

ارزیابی فرسایش قابل تحمل خاک در مقیاس حوضه آبخیز بر اساس باروری و کیفیت خاک (حوضه حاجی قوشان استان گلستان)

حیدر غفاری گوشه^۱، منوچهر گرگی^{۲*}، محمود عربخدری^۳، قربانعلی روشنی^۴، احمد حیدری^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران، کرج

۳. دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

۴. استادیار، مرکز تحقیقات کشاورزی استان گلستان

۵. استاد، گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۲۷)

چکیده

فرسایش خاک مهم‌ترین شکل تخریب منابع خاک و منبع آلودگی‌های غیرنقطه‌ای به‌شمار می‌رود. هنگامی که مقدار فرسایش خاک از آستانه قابل تحمل تجاوز کند طیف وسیعی از مشکلات اقتصادی-اجتماعی-محیط‌زیستی رخ می‌دهند. روش‌های مختلفی برای تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه شده است که هر کدام دارای مزیت و محدودیت‌های خاص خود هستند. در این پژوهش، روش مبتنی بر شاخص باروری و روش مبتنی بر عمق و کیفیت خاک به‌عنوان رایج‌ترین روش‌ها برای تعیین فرسایش قابل تحمل مورد استفاده قرار گرفتند. هر دو روش مجموعه‌ای از ویژگی‌های اساسی خاک شامل نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب، کربن آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری و وضعیت حاصل‌خیزی خاک شامل عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم را دربر دارند. نتایج نشان داد بین مقدار فرسایش قابل تحمل محاسبه‌شده با هر دو روش ارتباط نزدیکی وجود دارد. میانگین وزنی مقدار فرسایش قابل تحمل محاسبه‌شده برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل شاخص باروری حدود ۹/۲ و بر اساس عمق و کیفیت خاک حدود ۱۰/۲ تن بر هکتار در سال برآورد شد. هرچند روش مبتنی بر عمق و کیفیت خاک به‌عنوان یک روش استاندارد مطرح است اما نتایج نشان داد که روش باروری خاک نیز کارایی قابل‌قبولی داشته و حتی به لحاظ مفهومی قوی‌تر به نظر می‌رسد؛ زیرا در این روش، وضعیت باروری خاک سطحی با خاک زیرسطحی مقایسه می‌شود اما در روش کیفیت خاک فقط به وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی توجه می‌شود. از طرف دیگر، روش مبتنی بر عمق و کیفیت خاک، دامنه خاک‌های متعلق به یک گروه بسیار زیاد بوده و بنابراین دقت تخمین فرسایش قابل تحمل پایین است. از آنجایی که هر دو مدل تنها اثرات درون-مزرعه‌ای فرسایش را حساب می‌کنند، بنابراین مقادیر به‌دست‌آمده بدون در نظر گرفتن اثرات برون مزرعه‌ای فرسایش، برای برنامه‌های حفاظت خاک منطقه قابل توصیه هستند.

واژه‌های کلیدی: تخریب خاک، آلودگی غیرنقطه‌ای، حفاظت خاک

مقدمه

خاک و هدررفت مواد آلی و عناصر غذایی و در نتیجه کاهش باروری خاک می‌شود (Lal, 1998; Li et al., 2009). گرچه فرسایش خاک در زیست‌بوم‌های طبیعی بسیار کند انجام می‌شود اما اثرات تجمعی آن بر کیفیت خاک در بلندمدت معنی‌دار بوده و حتی فرسایش‌هایی با مقادیر بسیار کم پس از گذشت سال‌ها باعث از بین رفتن مقادیر قابل‌توجهی خاک می‌شوند. بر اساس گزارش‌های ارائه‌شده، هر ساله حدود ۷۵ میلیارد تن خاک حاصل‌خیز از اراضی کشاورزی هدر می‌رود (Eswaran et al., 1999)، به طوری که آمارها نشان داده، طی سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۵۴، حدود ۳۰ درصد اراضی کشاورزی در سراسر جهان

محدود بودن و تجدیدنپذیر منابع خاک در مقیاس عمر انسان، باعث شده که تخریب خاک در نتیجه فرسایش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در عرصه منابع طبیعی و محیط‌زیست در سراسر جهان مطرح شود. پدیده فرسایش هم از بعد تخریب خاک و کاهش تولیدات کشاورزی و هم از بعد آلودگی محیط‌زیست حائز اهمیت است. فرسایش خاک سطحی حاصل-خیز در بلندمدت باعث کاهش عمق خاک، ظرفیت رطوبتی

* نویسنده مسئول: mgorji@ut.ac.ir

حاصل خیزی خود را به دلیل فرسایش خاک از دست داده و به ارضی غیرقابل کشت تبدیل شده‌اند (Pimentel and Burgess, 2013).

فرسایش قابل تحمل^۱ مفهومی است که به‌عنوان یک معیار برای مهار فرسایش و اثرات مخرب آن به‌ویژه حفظ کیفیت خاک و پایداری تولیدات کشاورزی در بلندمدت و سلامتی محیط‌زیست در کوتاه‌مدت پیشنهاد شده (Johnson, 2005) و در سال‌های گذشته توجه به آن افزایش یافته است (Verheijen *et al.* 2009; Bui *et al.* 2011; Mandal and Sharda 2011; Duan *et al.*, 2017). فرسایش قابل تحمل خاک، یکی از اساسی‌ترین و درعین‌حال پیچیده‌ترین موضوعات در تحقیقات فرسایش خاک می‌باشد. (Li *et al.* (2009). مطالعات انجام‌شده درباره فرسایش قابل تحمل در سال‌های گذشته را بررسی کردند و اظهار داشتند که آستانه فرسایش قابل تحمل مقداری تغییرپذیر بوده و با توجه به نیاز جامعه و بر اساس مطالعات کافی در هر منطقه می‌تواند تغییر کند. به‌طور کلی سه روش اصلی برای تعیین فرسایش قابل تحمل خاک وجود دارد: (۱) روش‌های مبتنی بر ضخامت و خصوصیات خاک، (۲) روش‌های مبتنی بر نرخ تشکیل و تکامل خاک و (۳) روش‌های مبتنی بر اثر فرسایش بر باروری خاک (Bui *et al.* 2011; Li *et al.* 2009). مفاهیم اولیه فرسایش قابل تحمل عمدتاً بر مبنای پایداری باروری خاک و تولیدات کشاورزی شکل گرفته‌اند (Wischmeier, and Smith, 1978). Alexander (1988) بر مبنای نرخ تشکیل خاک روشی برای تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه داد اما به دو دلیل چندان مورد توجه قرار نگرفت: اول اینکه نرخ تشکیل خاک از مواد مادری مختلف متفاوت بوده و به عوامل متعددی بستگی دارد و دوم اینکه سرعت تشکیل خاک بسیار کند بوده و بنابراین اندازه‌گیری آن دشوار است (Duan *et al.*, 2017). در سال‌های اخیر با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و آلودگی آب‌های سطحی برخی دانشمندان پیشنهاد داده‌اند که بیش از یک آستانه قابل تحمل برای فرسایش تعریف شود (Bazzoffi, 2009; Renschler and Harbor, 2002). یعنی یک آستانه به‌عنوان مقدار فرسایش قابل تحمل بر مبنای باروری خاک و پایداری تولیدات کشاورزی و آستانه دوم به‌عنوان فرسایش قابل تحمل بر مبنای تقاضای زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی شامل کنترل سیل، آلودگی منابع آب‌های سطحی تعیین شود (Li *et al.* 2009).

Browning *et al.* (1948) مقدار فرسایش قابل تحمل

1. soil erosion tolerance

خاک‌های غرب آمریکا را بین ۴/۵ تا ۱۳/۵ تن در هکتار در سال تعیین کردند و اظهار داشتند باروری خاک یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین فرسایش قابل تحمل است. علاوه بر آن، عمق خاک نیز یکی از عوامل مهم در تعیین فرسایش قابل تحمل می‌باشد (Duan *et al.* 2017). سرویس حفاظت خاک آمریکا گروهی را برای بررسی عوامل تأثیرگذار در تعیین فرسایش قابل تحمل سازمان‌دهی کرد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که عمق خاک، هدررفت آب و عناصر غذایی، آلودگی آب‌های سطحی، کنترل رسوبات و فرسایش خندقی و کاهش باروری خاک از جمله عوامل هستند که در تعیین فرسایش قابل تحمل تأثیرگذار هستند (Paschall *et al.* 1956). بر اساس این عوامل حداکثر فرسایش قابل تحمل ۱۱/۲ تن در هکتار در سال تعیین شد. در سال ۱۹۷۳ سازمان حفاظت خاک آمریکا پس از بحث و بررسی‌های زیاد یک راهنمای کلی برای تعیین فرسایش قابل تحمل خاک‌ها بر اساس عمق خاک و ظرفیت خاک‌سازی ارائه داد که هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Li, *et al.* 2009). در دو دهه گذشته نیز روش‌های جدیدی برای این منظور ابداع شده است که مبنای آن‌ها عمدتاً ضخامت و باروری (یا کیفیت) خاک می‌باشد. به‌عنوان نمونه، Mandal *et al.* 2006; 2010 از یک مدل بیوفیزیک برای تعیین فرسایش قابل تحمل خاک‌های هندوستان استفاده کرده است که مبنای آن عمق و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. در تازه‌ترین مطالعه، Duan *et al.* (2017) روش جدیدی برای محاسبه فرسایش قابل تحمل اراضی کشاورزی ارائه داده‌اند که مبنای آن معادله Skidmore 1982 بوده و عامل اصلی در آن باروری خاک می‌باشد. اصل و اساس روش‌های مبتنی بر باروری خاک این است که در یک بازه زمانی مشخص مقدار کاهش باروری خاک نباید از یک حد معینی تجاوز کند (Li *et al.* 2009). در منابع مختلف بازه زمانی استاندارد بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال و حد مجاز کاهش باروری خاک بین ۰/۵ تا ۰/۱ درصد در سال استفاده شده است (Mandal *et al.*, 2006; Sparovek and Schnug, 2001; Benson *et al.*, 1989). فرض این است که این مقدار افت باروری خاک در اثر فرسایش، توسط فرایندهای مخالف تخریب خاک یعنی تشکیل و تکامل خاک و همچنین پیشرفت فن‌آوری جبران خواهد شد. علیرغم همه این‌ها هنوز بر سر این موضوع که برای تعیین فرسایش قابل تحمل کدام عامل مهم‌تر و کدام روش مناسب‌تر است بین متخصصان و دانشمندان این رشته اتفاق نظر وجود ندارد.

هدف اصلی از این پژوهش مقایسه دو مدل رایج در تعیین فرسایش قابل تحمل به لحاظ کارایی و شناخت محدودیت‌ها به‌منظور کاربرد آن‌ها در کشور می‌باشد.

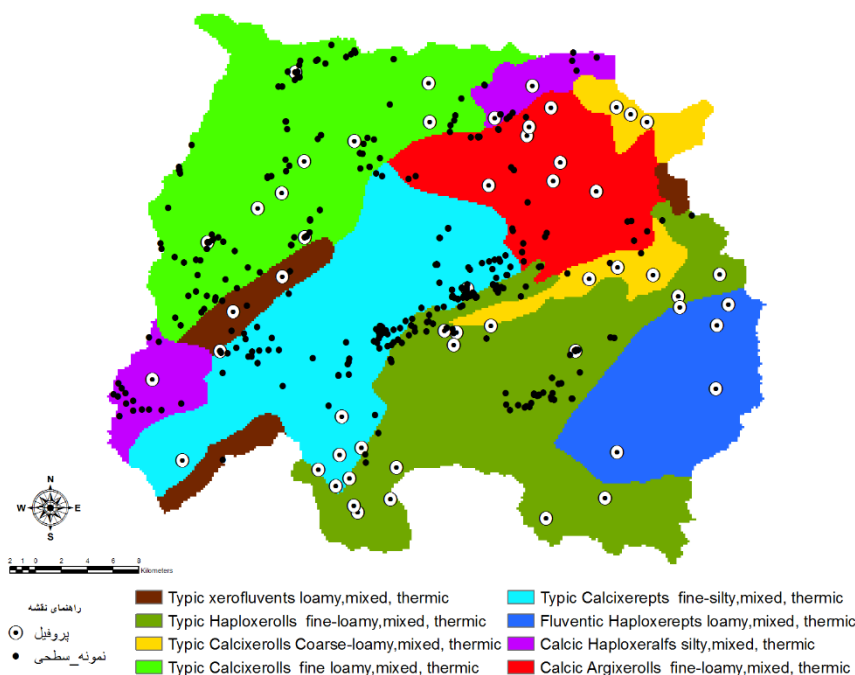
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه حاجی قوشان در بالادست سد بوستان (گلستان ۲) با مساحت حدود ۱۵۶۰ کیلومتر مربع در محدوده عرض شمالی ۲۴° ۳۷' تا ۲۹° ۴۹' و طول شرقی ۲۹° ۵۵' تا ۳۰° ۵۶' می‌باشد که بخشی از حوضه بزرگ گرگان رود را پوشش می‌دهد. خاک‌های منطقه از نوع لسی (بادرفتی) با میانگین بیش از ۶۰ درصد سیلت بوده و در سه رده مالی سول، انتی سول و اینسیتی سول طبقه‌بندی می‌شوند (Khormali et al. 2009). میانگین سالانه بارندگی در این حوضه حدود ۵۵۰ میلی‌متر و شیب متوسط حوضه ۱۹ درصد می‌باشد. از کل مساحت حوضه به ترتیب حدود ۳۲، ۳۷ و ۲۹ درصد به کاربری مرتع، کشاورزی و جنگل اختصاص دارد و مابقی آن را مناطق مسکونی و اراضی لخت بدون پوشش گیاهی اشغال کرده است. عمده اراضی زراعی منطقه زیر پوشش گندم پائیزه (دیم) قرار دارد که در مجموع ۵۵۴۸۳ هکتار را شامل می‌شود.

نمونه‌برداری

بخش‌های وسیعی از اراضی واقع در محدوده حوضه آبخیز گرگان رود در طول سالیان متمادی و با اهداف متفاوت مورد مطالعه خاک‌شناسی قرار گرفته است (مرکز تحقیقات خاک و آب کشور). علاوه بر اطلاعات جمع‌آوری شده در سراسر حوضه تعداد ۵۴ پروفیل در کاربری‌های مختلف حفر و تشریح شدند.

نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده خاک از هر افق تهیه شد. نمونه‌های دست‌خورده پس از هواخشک و عبور از الک ۲ میلی-متری برای اندازه‌گیری خصوصیات از قبیل بافت خاک، مقدار کربن آلی (روش واکلی-بلک)، فسفر (روش اولسن) و پتاسیم قابل‌جذب (روش فلیم فتومتری) مورد استفاده قرار گرفتند (Page et al., 1992). نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی مخصوص (قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری و رطوبت قابل‌دسترس گیاه برداشته شدند. برای این کار ابتدا نمونه‌های دست‌خورده پس از اشباع کامل برای تعیین رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در دستگاه صفحات فشار به ترتیب تحت فشار ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند (Romano and Santini, 2002). پس‌از آن برای تعیین جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها درون دستگاه آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها مقدار ۴ گرم خاکدانه‌های با قطر ۱ تا ۲ میلی‌متر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۵ دور در دقیقه بالا و پایین شد (John and Kim, 2002). نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نفوذ آب به خاک با استفاده از استوانه‌های مضاعف تعیین شد (Bouwer, 1986). علاوه بر این، تعداد ۳۵۰ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتر در اراضی کشاورزی از سازمان‌های دولتی استان جمع‌آوری شد (شکل ۱).



شکل ۱- زیر حوضه‌ها و موقعیت نیم‌رخ‌ها و نمونه‌های سطحی

تعیین فرسایش قابل تحمل با استفاده از روش فازی این روش را می‌توان نسخه تعدیل‌یافته روش ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (USDA, NRCS, 1999) به حساب آورد. روش سازمان حفاظت خاک آمریکا به‌عنوان یک راهنمای کلی شناخته شده است و به‌طور رایج در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار فرسایش قابل تحمل خاک‌ها در روش ابداع‌شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا، بر اساس عمق خاک تا لایه محدودکننده و قدرت ترمیم‌پذیری خاک تعیین می‌شود. در این روش، قدرت ترمیم‌پذیری خاک^۱ به‌طور کیفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ اما در نسخه تعدیل‌یافته، قدرت ترمیم‌پذیری یا مقاومت^۲ خاک در برابر اثرات فرسایش به‌طور کمی محاسبه و گروه‌بندی می‌شود (Mandal et al., 2006). برای گروه‌بندی کیفیت خاک، معیارهایی که بیشترین ارتباط را با کارکردهای اصلی خاک دارند انتخاب شده و سپس هرکدام از معیارها با استفاده از توابع فازی مناسب پیشنهادشده توسط (McBratney and Odeh, 1997) به اعدادی بدون بعد بین صفر و یک (۱ برای حالت بهینه) تبدیل شدند. شکل کلی مدل فازی پایه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$MF(x_i) = \left[1 / \left(1 + \left\{ \frac{(x_i - b)}{d} \right\}^2 \right) \right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن MF(x_i) مقدار تابع عضویت منحصره‌فرد برای

1. soil resilience
2. soil resistance

ویژگی i ام خاک می‌باشد و پارامترهای مدل شامل نقطه تقاطع پایین (LCP)، مقدار بهینه (b)، نقطه تقاطع بالا (UCP) و عرض ناحیه انتقالی (d) می‌باشند. نقاط تقاطع پایین و بالا بیان‌گر شرایطی هستند که مقدار یک ویژگی خاک برای یک هدف مشخص در یک سطح بحرانی قرار دارد. با توجه به اینکه در این روش چندین ویژگی مهم خاک ارزیابی می‌شود، از یک مدل جمع‌پذیر وزنی به‌منظور تجمیع توابع عضویت تمام ویژگی‌های خاک (Y) به شکل زیر استفاده شد:

$$RI = \sum_{i=1}^n \lambda_i MF(x_i) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن RI شاخص مقاومت خاک در برابر فرسایش و λ عامل وزنی ویژگی i ام خاک است.

ویژگی‌های مهم خاک انتخاب‌شده در این مدل شامل نفوذپذیری خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک، پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب می‌باشند که بر اساس آنالیز حساسیت در پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP) توسط (Nearing et al., 1990) به‌عنوان معیارهای مقاومت خاک در برابر فرسایش پیشنهادشده‌اند و عامل وزنی هرکدام بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها تعیین می‌شود (Mandal et al., 2010) (جدول ۱). به‌عنوان مثال در رابطه با فرسایش آبی، سرعت نفوذ آب به خاک (نفوذپذیری خاک) بیشترین اهمیت را دارد و بنابراین بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است (Karlen and Stott, 1994).

جدول ۱- پارامترها و عامل وزنی توابع عضویت هر یک از ویژگی‌های خاک مرتبط با عملکرد موردنظر (Bhattacharyya et al., 2008)

عامل وزنی	d	UPC	b	LCP	ویژگی خاک (منبع)	کارکرد خاک
۰/۳۵	۳	-	۵	۲	نفوذپذیری [#] (Karlen and Stott, 1994)	ورود آب به خاک و تصفیه
۰/۱۰	۰/۷	۱/۴۷	۱/۴	-	جرم مخصوص ظاهری ^{#*} (Doran and Parkin, 1994)	نگهداری و انتقال آب
-	۷/۵	-	۲۰	۱۲/۵	ظرفیت رطوبتی خاک [*] (Karlen et al., 1996)	مقاومت خاک در برابر تخریب فیزیکی
۰/۲۵	۳۰	-	۸۰	۵۰	پایداری خاکدانه‌ها [#] (Karlen et al., 1996)	مقاومت خاک در برابر تخریب بیوشیمیایی
۰/۱۵	۰/۷	-	۱/۵	۰/۸	کربن آلی خاک ^{#*} (Doran and Parkin, 1994)	مقاومت خاک در برابر تخریب بیوشیمیایی
۰/۱۵					وضعیت حاصل‌خیزی [#] (Doran and Parkin, 1994)	رشد گیاه
۰/۰۵	۰/۰۷	-	۰/۱	۰/۰۳	نیتروژن	
۰/۰۵	۱۵	-	۲۵	۱۰	فسفر	
۰/۰۵	۱۶۰	-	۲۸۰	۱۲۰	پتاسیم	

* : عوامل مؤثر در تعیین شاخص باروری خاک

: عوامل مؤثر در تعیین کیفیت خاک

تعیین فرسایش قابل تحمل بر اساس شاخص باروری خاک در این روش، ابتدا شاخص باروری خاک بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف پروفیل خاک تعیین می‌شود. شاخص باروری پروفیل خاک برابر با مجموع باروری لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۱۰۰ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود (Duan et al., 2012). نقش هر کدام از ویژگی‌ها در تولید محصول، با استفاده از منحنی‌های امتیازدهی بین یک و صفر نرمال‌سازی گردید. حاصل ضرب امتیازها برای هر لایه، باروری آن لایه را مشخص می‌کند و در نهایت مجموع امتیازهای تمام لایه‌ها باروری پروفیل تا عمق ۱۰۰ سانتیمتری را بیان می‌کند. مدل باروری خاک به‌عنوان تابعی از مؤثرترین ویژگی‌های خاک در تولید محصول طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود (Delgado, 2003; Duan et al., 2011).

$$PI = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot B_i \cdot O_i \cdot K_i) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$K_{cum(i)} = 0.024 x_i^{0.81} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$K_i = K_{cum(i)} - K_{cum(i-1)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن PI شاخص باروری خاک، عامل A_i بیانگر شرایط رطوبتی یا تهویه‌ای، عامل B_i بیانگر شرایط محدودکننده رشد گیاه، عامل O_i حاصل‌خیزی بالقوه خاک می‌باشند. عامل K_i اهمیت نسبی لایه i ام خاک، x_i عمق افق از سطح خاک تا لایه زیرین لایه i ام، K_{cum} اهمیت نسبی تجمعی از سطح خاک تا لایه i ام را نشان می‌دهند (Lobo, et al., 2003; Delgado, 2005). در مدل شاخص باروری فرض بر این است که عملکرد گیاه تابعی از رشد ریشه است که توسط عوامل فوق کنترل می‌شود. عامل‌های دیگر مانند نوع مدیریت، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های مکانی ثابت فرض شده است. از زمان ابداع مدل تاکنون به دلیل در دسترس بودن داده‌های موردنیاز آن، محققان زیادی این مدل را در مطالعات خود استفاده کرده‌اند که در اغلب آن‌ها اعتبار و کارایی این شاخص در بیان کمی باروری خاک قابل قبول گزارش شده است (Lobo, et al., 2005; Udawatta and Henderson, 2003; Yang et al., 2003; Schumacher et al., 1994; Gale et al., 1991). در برخی مطالعات با توجه به شرایط اقلیمی و خاک مدل تعدیل‌شده و اضافه شدن یک یا چند ویژگی دیگر مانند اسیدیته خاک، شوری و یا مقدار رس نتایج بهتری را ارائه داده است (Duan et al., 2011).

به‌طورکلی بر اساس روش SI دو مدل تابع عضویت پیشنهادشده است (Burrough et al., 1992): مدل تابع عضویت متقارن^۱ و نامتقارن^۲. مدل تابع عضویت نامتقارن خود به دو نوع تابع نامتقارن به راست^۳ (کمتر بهتر) و نامتقارن به چپ^۴ (بیشتر بهتر) تقسیم می‌شود. معمولاً در تعیین کیفیت خاک، ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری خاک، پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب از مدل نامتقارن به چپ و جرم مخصوص ظاهری خاک از مدل نامتقارن به راست پیروی می‌کنند. به‌عنوان مثال، پایداری خاکدانه هر چه بیشتر باشد مقاومت خاک در برابر فرسایش بیشتر است، اما هر چه جرم مخصوص ظاهری بیشتر باشد نفوذپذیری کمتر و رواناب سطحی بیشتر خواهد بود و در نتیجه مقاومت خاک در برابر فرسایش کاهش می‌یابد. شکل کلی معادلات به شرح زیر است:

$$\text{مدل نامتقارن به چپ، بیشتر بهتر:} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$MF(x_i) = \left[1 / \left(1 + \left\{ \frac{(x_i - b_1 - d_1)}{d_1} \right\}^2 \right) \right] \quad \text{if } x_i < (b_1 + d_1)$$

مدل نامتقارن به راست، کمتر بهتر:

$$(\text{رابطه ۴})$$

$$MF(x_i) = \left[1 / \left(1 + \left\{ \frac{(x_i - b_2 + d_2)}{d_2} \right\}^2 \right) \right] \quad \text{if } x_i > (b_2 - d_2)$$

مدل مقدار بهینه:

$$(\text{رابطه ۵})$$

$$MF(x_i) = 1 \quad \text{if } (b_1 + d_1) \leq x_i \leq (b_2 - d_2)$$

در نهایت، هر خاک بر اساس مجموع توابع عضویت به یکی از سه گروه شامل گروه ۱ با مجموع امتیاز بین ۰ و ۰/۳۳، گروه ۲ با مجموع امتیاز بین ۰/۳۴ و ۰/۶۶ و گروه ۳ با مجموع امتیاز بیشتر از ۰/۶۶ تعلق می‌گیرد (جدول ۲). پس‌از آن با استفاده از دستورالعمل توسعه‌یافته توسط سرویس حفاظت خاک امریکا، مقدار فرسایش قابل تحمل برآورد گردید (Mandal and Sharda, 2011).

جدول ۲- مقدار فرسایش قابل تحمل بر مبنای عمق خاک تا لایه

محدودکننده و کیفیت خاک (Mandal et al., 2006)

مقدار فرسایش قابل تحمل سالانه (تن بر هکتار)			عمق خاک تا لایه محدودکننده (سانتی‌متر)
گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱	
۷/۵	۲/۵	۲/۵	کمتر از ۲۵
۷/۵	۵	۲/۵	۲۵-۵۰
۱۰	۷/۵	۵	۵۰-۱۰۰
۱۰	۱۰	۷/۵	۱۰۰-۱۵۰
۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	بیشتر از ۱۵۰

1. symmetric
2. asymmetric
3. Asymmetric right
4. Asymmetric left

نتایج و بحث

میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. مقدار نفوذپذیری سطحی خاک در منطقه به دلیل بافت سنگین (سیلتی کلی لوم) و عدم وجود خلل و فرج درشت (Zhang et al., 2004) نسبتاً کم بوده و بین ۱/۴ تا ۲/۶ میلی‌متر در ساعت تغییر می‌کند. ظرفیت رطوبتی خاک (اختلاف بین رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی) در منطقه متوسط به بالا بوده و بیشترین مقدار آن در زیرحوضه سوار که بخش زیادی از آن پوشیده از جنگل است و کمترین مقدار ظرفیت نگهداری رطوبت در اراضی مرتعی زیر حوضه کل‌شور با مقدار ماده آلی کم مشاهده گردید. به‌طور کلی پایدار خاکدانه‌ها متوسط به بالا بوده و بیشترین مقادیر آن ۶۹، ۶۸ و ۶۷ درصد به ترتیب متعلق به زیر حوضه‌های چنارلی، گلیداغ و سوار می‌باشد که کاربری غالب این زیر-حوضه‌ها جنگل و مراتع بوده و دارای مقدار ماده آلی نسبتاً زیاد-تری هستند. مقدار کربن آلی خاک سطحی بین ۱/۷۳ و ۰/۶۳ درصد متغیر بوده و بیشترین مقدار آن مربوط به زیر حوضه سوار است. تغییرات زیاد فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک‌های مختلف احتمالاً به دلیل مقدار مصرف کود و یا تخلیه این عناصر در اثر شدت کشت و زرع باشد.

هرکدام از ویژگی‌ها با توجه به مقادیر بهینه و بحرانی توسط مدل فازی مناسب به امتیازهای استاندارد بین صفر و یک تبدیل شدند و مجموع وزنی آن‌ها به‌عنوان معیار مقاومت خاک در برابر اثرات فرسایش محاسبه گردید. هرچه خاک در برابر اثرات فرسایش مقاومت بیشتری داشته باشد فرسایش قابل تحمل آن خاک بیشتر است. علاوه بر مقاومت خاک در برابر اثرات فرسایش، عمق خاک نیز در مقدار فرسایش قابل تحمل تأثیرگذار است (Mandal et al., 2010). به‌طور کلی مقاومت خاک منطقه در برابر اثرات فرسایش مطلوب بوده مقدار آن بین ۰/۵۱ و ۰/۷۳ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده وضعیت مناسب خاک‌ها می‌باشد. بر اساس گروه‌بندی، تمام خاک‌ها در گروه ۲ و ۳ قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، پایداری خاکدانه‌ها باوجود داشتن وزن کمتر نسبت به نفوذپذیری خاک، دارای بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت خاک در برابر اثرات فرسایش بوده است. این نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه به لحاظ پایداری خاکدانه‌ها از شرایط مطلوب‌تری برخوردار بوده و نفوذپذیری خاک‌ها از مقدار بهینه فاصله بیشتری دارند.

جدول ۳- مؤلفه‌های مدل شاخص باروری خاک و تابع امتیازدهی آن‌ها

عوامل تأثیرگذار بر رشد گیاه	ویژگی خاک	نوع تابع فازی امتیازدهی
وضعیت رطوبت-تهویه	ظرفیت نگهداری آب	تابع فازی نامتقارن به راست (بیشتر-بهتر)
وضعیت فیزیکی خاک	جرم مخصوص ظاهری	تابع فازی نامتقارن به راست (کمتر-بهتر)
حاصل‌خیزی بالقوه	ماده آلی	تابع فازی نامتقارن به راست (بیشتر-بهتر)

با فرض بر اینکه باروری خاک با کاهش عمق خاک در نتیجه فرسایش به‌طور خطی کاهش می‌یابد، مقدار فرسایش قابل تحمل (T value) توسط معادله زیر برآورد گردید (Duan et al., 2012; Mandal, 2010; Delgado, 2003).

$$T \text{ value} = \frac{R \cdot Db \cdot PI_0}{V \times t} \quad (\text{رابطه ۹})$$

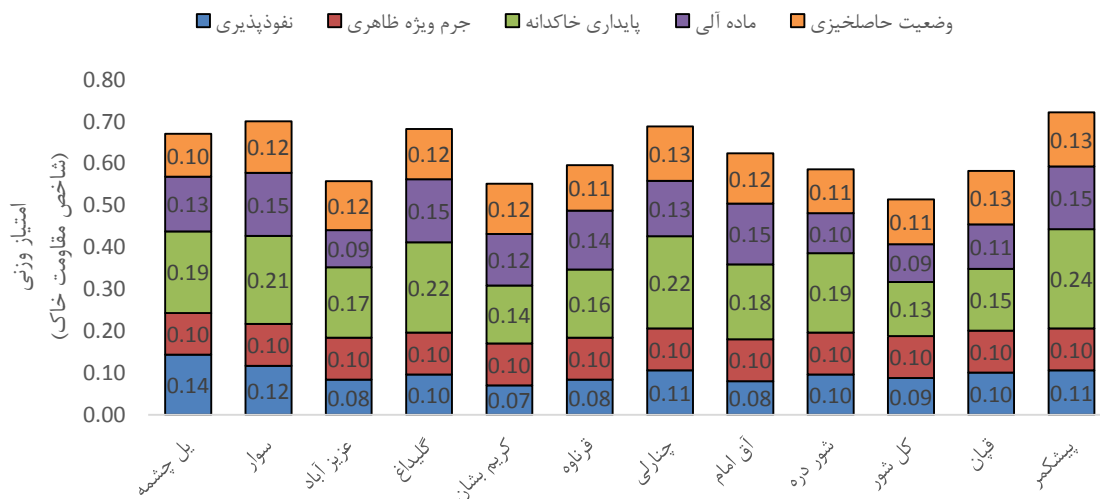
$$V = -\frac{\Delta PI}{d} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن R نرخ کاهش قابل‌قبول باروری خاک (٪) در یک بازه زمانی مشخص t (سال)، Db جرم مخصوص ظاهری خاک، PI₀ باروری اولیه و V آسیب‌پذیری خاک می‌باشند. به‌طور رایج مقدار ۰/۱ درصد در سال به‌عنوان نرخ کاهش قابل‌قبول باروری و ۱۰۰ سال به‌عنوان بازه زمانی استاندارد برای تعیین فرسایش قابل‌تحمل توصیه شده است. با توجه به اینکه عوامل تخریب خاک (فرسایش) و عوامل تشکیل و تکامل خاک به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند فرض بر این است که این مقدار کاهش باروری خاک توسط فرایند تشکیل و تکامل خاک و همچنین توسعه تکنولوژی جبران می‌شود؛ زیرا پایه و اساس فرسایش قابل‌تحمل بر اصل حفظ و پایداری باروری خاک در بلندمدت بنا شده است. آسیب‌پذیری خاک^۱ طبق تعریف عبارت از مقدار تغییر باروری خاک (ΔPI) به ازای یک سانتی‌متر فرسایش (d) می‌باشد. برای تخمین آسیب‌پذیری خاک در برابر فرسایش، ابتدا لازم است شاخص باروری خاک در سناریوهای مختلف شامل (۱) شرایط کنونی خاک، (۲) حذف ۴ سانتی‌متر لایه سطحی، (۳) حذف ۸ سانتی‌متر لایه سطحی، (۴) حذف ۱۲ سانتی‌متر لایه سطحی و (۵) حذف ۱۶ سانتی‌متر لایه سطحی محاسبه گردد. شیب خط حاصل از ترسیم مقادیر مختلف شاخص باروری خاک در برابر ضخامت حذف‌شده از لایه سطحی بیان‌گر آسیب‌پذیری خاک است.

1. Soil Vulnerability

جدول ۴- میانگین و دامنه تغییرات ویژگی‌های خاک به تفکیک زیرحوضه

زیر حوضه	نفوذپذیری (mm/h)	ظرفیت نگهداری رطوبت (mm)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	پایداری خاکدانه در آب (%)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	فسفر (ppm)	پتاسیم (ppm)
یل چشمه	۲/۶±۰/۳۲	۱۸/۲±۱/۴	۱/۲۷±۰/۰۶	۶۴/۷±۵/۲	۱/۲۳±۰/۳۳	۰/۱۱±۰/۰۲	۴/۷±۱/۲	۱۸۰±۲۵
سوار	۲/۵±۰/۳۵	۱۸/۸±۱/۸	۱/۲۱±۰/۰۲	۶۷/۳±۳/۱	۱/۷۳±۰/۲۷	۰/۱۲±۰/۰۱	۹/۳±۰/۸	۴۹۰±۳۸
عزیز آباد	۱/۸±۰/۲۷	۱۸/۶±۱/۷	۱/۳۰±۰/۰۳	۵۹/۹±۶/۲	۰/۹۲±۰/۲۲	۰/۰۷±۰/۰۱	۶/۷±۰/۰۶	۳۱۵±۴۳
گلیداغ	۲/۱±۰/۲۵	۱۷/۹±۲/۲	۱/۲۵±۰/۰۳	۶۸/۶±۸/۰	۱/۳۱±۰/۱۶	۰/۱۴±۰/۰۲	۷/۲±۰/۸	۳۸۰±۲۸
کریم بشان	۱/۴±۰/۱۶	۱۷/۳±۱/۵	۱/۲۸±۰/۰۳	۵۳/۲±۴/۷	۱/۱۷±۰/۱۲	۰/۱۰±۰/۰۱	۶/۶±۰/۰۶	۳۵۴±۴۷
قرناوه	۱/۸±۰/۱۹	۱۸/۱±۱/۸	۱/۳۲±۰/۰۴	۵۸/۳±۵/۳	۱/۱۲±۰/۲۳	۰/۱۱±۰/۰۱	۴/۹±۰/۳	۲۰۵±۲۹
چنارلی	۲/۳±۰/۲۱	۱۸/۷±۲/۳	۱/۲±۰/۰۲	۶۹/۶±۴/۸	۱/۲۴±۰/۱۴	۰/۱۲±۰/۰۲	۱۳/۱±۱/۶	۳۸۰±۳۴
آق امام	۱/۷±۰/۱۸	۱۷/۴±۱/۲	۱/۲۶±۰/۰۲	۶۱/۴±۷/۶	۱/۳۸±۰/۲۶	۰/۱۱±۰/۰۲	۶/۱±۰/۸	۳۲۰±۴۷
شور دره	۲/۱±۰/۲۲	۱۶/۴±۲/۵	۱/۲۴±۰/۰۲	۶۳/۱±۵/۸	۰/۸۷±۰/۱۴	۰/۰۸±۰/۰۱	۹/۲±۱/۱	۱۶۰±۳۳
کل شور	۱/۹±۰/۲۱	۱۶/۱±۲/۳	۱/۳۳±۰/۰۲	۵۱/۶±۸/۳	۰/۶۳±۰/۱۱	۰/۰۷±۰/۰۱	۵/۳±۰/۸	۱۸۵±۲۴
قیان	۲/۲±۰/۲۸	۱۷/۳±۱/۸	۱/۲۴±۰/۰۳	۵۵/۸±۴/۶	۰/۹۵±۰/۱۶	۰/۰۸±۰/۰۱	۹/۵±۱/۳	۲۰۸±۳۱
پیشکمر	۲/۳±۰/۳۷	۱۷/۷±۱/۲	۱/۲۷±۰/۰۳	۷۳/۳±۴/۲	۱/۲۷±۰/۱۹	۰/۱۳±۰/۰۲	۱۲/۴±۲/۲	۲۷۵±۴۲



شکل ۲- امتیاز وزنی ویژگی‌های مختلف خاک در هر زیرحوضه (مجموع آن‌ها برابر است با شاخص مقاومت خاک در برابر اثرات فرسایش)

می‌دهند و در نتیجه آسیب‌پذیری کمتری دارند. از طرف دیگر در شرایط یکسان، خاک‌های دارای عمق زیاد پتانسیل تخریب کمتری دارند (Lakaria et al., 2010). طبق این روش میانگین وزنی فرسایش قابل قبول برای منطقه ۱۰/۲ تن بر هکتار در سال می‌باشد.

شاخص باروری خاک بر اساس مدل باروری خاک با در نظر گرفتن ۱۰٪ کاهش قابل قبول باروری خاک در طول ۱۰۰ سال محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد مقدار باروری خاکهای منطقه بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۸ تغییر می‌کند که بر اساس گروه‌بندی (Delgado 2003) در خاک‌های حاصل خیز طبقه‌بندی می‌شوند. برخلاف روش پیشین (شاخص مقاومت خاک) که فقط

در روش شاخص مقاومت خاک، عامل‌های تعیین کننده فرسایش قابل قبول یکی شماره گروه خاک و دیگری عمق خاک می‌باشد. به لحاظ گروه‌بندی خاک، شاخص مقاومت خاک منطقه تماماً در گروه ۲ و ۳ قرار گرفت در نتیجه عامل مهم در تعیین فرسایش قابل تحمل در این منطقه، عمق خاک می‌باشد. به‌عنوان مثال در گروه ۲، بسته به عمق خاک، مقدار فرسایش قابل تحمل بین ۲/۵ و ۱۲/۵ تغییر می‌کند. از آنجایی که خاک منطقه نسبتاً عمیق بوده و از شرایط مطلوبی برخوردار است، بنابراین، مقدار فرسایش قابل تحمل در حوضه بین ۷/۵-۱۲/۵ تن در هکتار در سال برآورد شد (جدول ۳). خاک‌های متعلق به گروه ۳ در برابر فرسایش حالت بافری بیشتری از خود نشان

حوضه یل چشمه و کمترین مقدار مربوط به حوضه سوار به ترتیب برابر با ۱/۵۸ و ۱/۳۲ می‌باشند. علامت منفی در کنار مقدار آسیب‌پذیری خاک نشان‌دهنده جهت تغییرات باروری خاک در نتیجه فرسایش به سمت کاهش است. طبق این روش مقدار فرسایش قابل‌تحمل بین ۸/۲۳ و ۹/۸۲ به دست آمده است و میانگین وزنی فرسایش قابل‌تحمل برای کل حوضه برابر با ۹/۲۴ تن بر هکتار در سال می‌باشد. به دلیل اینکه خاک منطقه از مواد مادری لسی (بادرفتی) نسبتاً همگن تشکیل شده است، تغییرپذیری فرسایش قابل‌تحمل در سراسر منطقه بسیار کم می‌باشد.

ویژگی‌های خاک سطحی در نظر گرفته شده است، در این روش ویژگی‌های مهم خاک در لایه‌های مختلف تا عمق یک متری خاک ارزیابی می‌شوند و مجموع وزنی باروری لایه‌ها، باروری کل خاک را تعیین می‌کند (Duan *et al.*, 2009). آسیب‌پذیری و باروری اولیه خاک بیشترین تأثیر را در مقدار فرسایش قابل‌تحمل دارند. هرچه آسیب‌پذیری خاک بیشتر باشد، مقدار فرسایش قابل‌تحمل کمتر برآورد می‌گردد و بالعکس، هرچه باروری اولیه خاک بیشتر باشد فرسایش قابل‌تحمل نیز بیشتر است. آسیب‌پذیری خاک، به تغییرات وضعیت حاصل‌خیزی خاک در لایه‌های سطحی و زیرسطحی و همچنین به عمق خاک بستگی دارد. بیشترین مقدار آسیب‌پذیری خاک مربوط به

جدول ۵- فرسایش قابل‌تحمل خاک بر اساس شاخص مقاومت و عمق خاک

زیر حوضه	مساحت (%)	عمق خاک (cm)	شاخص مقاومت خاک (بدون بعد)	شماره گروه مربوط به کیفیت خاک	فرسایش قابل‌قبول (tones/ha)
یل چشمه	۵/۵	۵۰-۱۰۰	۰/۶۷	۳	۱۰
سوار	۷/۵	۱۰۰-۱۵۰	۰/۷۰	۳	۱۰
عزیز آباد	۱۱/۴	>۱۵۰	۰/۵۶	۲	۱۲/۵
گلیداغ	۱۰/۲	۵۰-۱۰۰	۰/۶۸	۳	۱۰
کریم بشان	۹/۸	۱۰۰-۱۵۰	۰/۵۵	۲	۱۰
قرناوه	۳/۶	۵۰-۱۰۰	۰/۶۰	۲	۷/۵
چنارلی	۶/۹	۱۰۰-۱۵۰	۰/۶۹	۳	۱۰
آق امام	۹/۶	۱۰۰-۱۵۰	۰/۶۲	۲	۱۰
شور دره	۴/۵	۱۰۰-۱۵۰	۰/۵۹	۲	۱۰
کل شور	۱۷/۰	۱۰۰-۱۵۰	۰/۵۱	۲	۱۰
قپان	۱۰/۶	۱۰۰-۱۵۰	۰/۵۸	۲	۱۰
پیشکمر	۲/۷	>۱۵۰	۰/۷۲	۳	۱۲/۵

جدول ۶- فرسایش قابل‌تحمل خاک بر اساس شاخص باروری خاک

زیر حوضه	مساحت (%)	شاخص باروری خاک (بدون واحد)	آسیب‌پذیری خاک (cm ⁻¹)	فرسایش قابل‌تحمل (tones/ha)
یل چشمه	۵/۵	۰/۴۸۵	-۱/۵۷۹	۸/۲۳
سوار	۷/۵	۰/۴۳۸	-۱/۳۲۶	۹/۸۲
عزیز آباد	۱۱/۴	۰/۴۷۵	-۱/۳۸۷	۹/۵۰
گلیداغ	۱۰/۲	۰/۴۱۴	-۱/۳۸۵	۸/۴۹
کریم بشان	۹/۸	۰/۴۳۰	-۱/۳۵۶	۹/۵۹
قرناوه	۳/۶	۰/۴۱۶	-۱/۴۰۳	۸/۵۷
چنارلی	۶/۹	۰/۴۰۶	-۱/۴۰۷	۹/۲۴
آق امام	۹/۶	۰/۴۳۷	-۱/۳۷۲	۹/۴۸
شور دره	۴/۵	۰/۴۳۷	-۱/۴۱۴	۹/۱۹
کل شور	۱۷/۰	۰/۳۸۷	-۱/۴۰۷	۹/۲۴
قپان	۱۰/۶	۰/۴۱۷	-۱/۳۸۱	۹/۴۱
پیشکمر	۲/۷	۰/۴۳۶	-۱/۳۴۷	۹/۶۵

نتیجه‌گیری

فرسایش قابل تحمل یکی از مسائل پیچیده و مهم در برنامه‌های حفاظت خاک می‌باشد اما تاکنون روش استاندارد برای تعیین آن ارائه نشده است. روش مبتنی بر شاخص باروری خاک و روش مبتنی بر عمق و کیفیت خاک از جمله روش‌هایی است که امروزه به دلیل عملی بودن و در دسترس بودن داده‌های موردنیاز آن‌ها عمدتاً مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقایسه نتایج روش مبتنی بر شاخص باروری خاک با نتایج روش مبتنی بر عمق و کیفیت خاک به‌عنوان روش استاندارد نشان داد که استفاده از شاخص باروری خاک اطلاعات قابل قبول و کافی برای برآورد مقدار فرسایش قابل تحمل فراهم می‌کند. همچنین مشخص شد که فرض اصلی این روش یعنی در نظر گرفتن ۱۰ درصد در ۱۰۰ سال به‌عنوان افت مجاز باروری خاک فرض صحیحی بوده است.

مدل شاخص باروری خاک نسبت به مدل استاندارد دارای دو مزیت است: یکی اینکه مدل شاخص باروری خاک علاوه بر

ویژگیهای سطحی خاک، اطلاعات مربوط به وضعیت باروری لایه‌های زیرسطحی را نیز در بردارد و دوم اینکه اختلاف بین فرسایش قابل تحمل خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در روش استاندارد مبتنی بر عمق و کیفیت خاک، مقدار فرسایش قابل تحمل دو خاک با عمق یکسان و کیفیت خاک ۰/۳۵ و ۰/۶۵ مقدار ثابتی است. از طرف دیگر در روش استاندارد مبتنی بر عمق و کیفیت خاک، هر چه خاک کیفیت بیشتری داشته باشد فرسایش قابل تحمل آن نیز بیشتر است و برعکس؛ یعنی "هرچه خاک ارزش بیشتری داشته باشد اجازه دهیم بیشتر هدر رود و هرچه خاکی ارزش کمتری داشته باشد بیشتر محافظت شود". به نظر می‌رسد این موضوع به لحاظ منطقی صحیح نیست؛ بنابراین، روش مبتنی بر شاخص باروری خاک را به‌عنوان یک روش کاربردی و علمی پیشنهاد می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌های حفاظت خاک منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

REFERENCES

- Bazzoffi, B. (2009). Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. *Reg Environ Change* 9:169–179.
- Bhattacharyya, P., Mandal, D., Bhatt, V. K., Yadav, R. P. (2011). A Quantitative Methodology for Estimating Soil Loss Tolerance Limits for Three States of Northern India. *Journal of Sustainable Agriculture*, 35:3, 276-292.
- Bui, E. N., Hancock, G. J. & Wilkinson, S. N. (2011). 'Tolerable' hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 136-149.
- Burrough, P.A., MacMillan, R.A., Deursen van, W. (1992). Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *Journal of Soil Science* 43 (2), 193–210.
- Delgado, F. (2003). Soil physical properties on Venezuelan steepplands: Applications to conservation planning. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. College on Soil Physics.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., *et al.* (Ed.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America Special Publication, vol. 35. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 3–21.
- Duan, X., Xie, Y., Liu, B., Liu, G., Feng, Y. and GAO, X. (2012). Soil loss tolerance in the black soil region of Northeast China. *J. Geogr. Sci* 22(4): 737-751.
- Duan, X., Xie, Y., Ou, T., Lu, H. (2011). Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China. *Catena* 87: 268–275.
- Duan, X.W., Xie, Y., Feng, Y.J., Yin, S.Q. (2009). Study on the method of soil productivity assessment in black soil region of Northeast China. *Agric. Sci. China* 8 (4), 472–481.
- Eswaran, H.; Lal, R.; Reich, P.F. (1999) Land Degradation: An overview. In *Response to Land Degradation, Proceedings of the 2nd International Conference on Land Degradation and Desertification*, Khon Kaen, Thailand, 25–29 January; Bridges, E.M., Hannam, I.D., Oldeman, L.R., Pening de Vries, F.W.T., Scherr, S.J., Sompatpanit, S., Eds.; Oxford University Press: New Delhi, India, 2002.
- John, R. N. and Kim, S. P. (2002). Aggregate stability and size distribution. In: H.D. Jacob and G. Clarke Topp, Co-editor (Ed.). pp. 201-414. *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Soc. A., Madison, WI., USA.
- Johnson, L.C. (2005). Soil loss tolerance: fact or myth. *Journal of Soil and Water Conservation* 60 (3), 52-60.
- Karlen, D.L., Parkin, T.B., Eash, N.S. (1996). Use of soil quality indicators to evaluate conservation reserve program sites in Iowa. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America Special Publication, vol. 49. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 345–356.
- Karlen, D.L., Stott, D.E. (1994) A frame work for evaluating physical and chemical indicators of

- soil quality. In: Doran, J.W., *et al.* (Ed.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America Special Publication, vol. 35. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 53–72.
- Lakaria, B.L., Mandal, D., and Biswas, H. (2010). Permissible soil erosion limits under different landscapes of Chhattisgarh, Indian J. Soil Cons., 38, 148–154.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Review Plant Sci.*, 4, 319-464.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*. 12: 519-539.
- Li, L., Du, S., Wu, L., and Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena* 78 (2009) 93–99.
- Lobo, D., Lozano, Z., and Delgado, F., (2005). Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuela soil. *Catena* 64 (2–3), 297–306.
- Mandal, D., and Sharda, V. N., and Tripathi K. P. (2011). Assessment of permissible soil loss in India employing a quantitative bio-physical model. *Current Science*. 100 (3): 383-390.
- Mandal, D., Sharda, V. N., and Tripathi K. P. (2010). Relative efficacy of two biophysical approaches to assess soil loss tolerance for doon valley soils of india. *Journal of soil and water conservation*. 65 (1): 42-49.
- McBratney, D.E., Odeh, I.O.A. (1997). Application of fuzzy sets in soil science; Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decision. *Geoderma* 11, 85–113.
- Nearing, M.A., Deer-Ascough, L., Laflen, J.M. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transaction of ASAE* 33, 839–849.
- Pimentel, D., Burgess, M. (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture*, 3, 443-463.
- Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J., Smith, C.J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth Science Reviews* 94, 23–38.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USA: United States Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*. No.537, Washington, D.C.
- Zhang, K., Li, S., Peng, W., Yu, B. (2004). Erodibility of Agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil Till. Res.* 76, 157–165.
- 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. *Agron. Sustain. Dev.* 37 (2).
- Alexander, E.B., 1988. Rates of soil formation implications for soil loss tolerance. *Soil Sci.* 145 (1), 37–45.
- Renschler, C.S., Harbor, J. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scale: The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology* 47, 189–209.
- Paschall, A. H., Klingebiel, A. A., Allaway, W. H. (1956). Committee report: permissible soil loss and relative erodibility of different soils. *Agr. Res. Serv. and Soil Cons. Serv.*, Washington DC.
- Sparovek, G., Schnug, E. (2001). Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. *Soil Sci Soc Am J* 65(5):1479–1486.
- Benson, V.W., Rice, O.W., Dyke, P.T., Williams, JR, Jones, C.A. (1989) Conservation impacts on crop productivity for the life of a soil. *J Soil Water Conserv* 44(6):600–604.
- Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C., Wani, S.P., (2009). Role of deformation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province. *Iran. Agric. Ecosyst. Environ.* 134, 178–189.
- Page, A.L., Miller, R.H., Jeeney, D.R., (1992). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Mineralogical Properties*. SSSA Pub, Madison, 1159 p.
- Romano, N., and Santini, A. (2002). Water retention and storage: Field. In: J.H. Dane and G.C. Topp, editors, *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. p. 721–738.
- Bouwer, H. (1986) Intake rate: cylinder infiltrometer. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical Analysis*. SSSA, Madison, WI, pp. 825–844.