



Tolerable soil erosion: concepts and estimation methods suitable for Iran's conditions

Yahya Parvizi¹ and Zahra Gerami^{2*}

¹ Professor, Water and Soil Conservation Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Researcher, Water and Soil Conservation Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 31 May 2024

Accepted: 05 October 2024

Extended abstract

Introduction

Estimates in Iran indicate an annual loss of about one billion cubic meters of soil from the country's land resources. Although quantifying the economic value of this volume of soil resource loss is difficult, the fragile ecological balance of ecosystems in the country's land resources suggests that this volume of resource loss will cause irreparable and irreversible damage to the production capacity and functioning of these resources. A part of this soil loss is compensated for and replaced by soil formation processes, and as long as the rate of erosion does not exceed the rate of soil formation, it is considered a natural and inevitable process. Knowing the rate of natural replacement is necessary for monitoring changes in the quality and quantity of this natural resource and for understanding the process of its deterioration or recovery. In addition, soil erosion beyond its place of occurrence causes economic, biodiversity, and natural landscape damages. The tolerable limit for this type of damage also requires its own scientific standard. On the other hand, substantial amounts of the country's financial resources are spent annually on watershed management measures. However, there is no quantitative regional standard for the design of these measures, nor a practical guideline for evaluating their effectiveness of these measures. This standard, along with the rate of soil regeneration and renewability, is known worldwide as tolerable soil erosion.

Materials and methods

In this article, the development of the concepts of tolerable erosion worldwide has been monitored, and the developed techniques and methods have been investigated for their potential generalization and application to the conditions of Iran. In this study, 109 domestic and international research articles were reviewed, and a summary is provided of the evolution of the concept of tolerable soil erosion, the factors influencing the T-value, and the methods for its calculation. Additionally, a summary of the research conducted, their results related to tolerable erosion, and various methodologies in this field are presented. Recommendations, research needs, and optimal strategies for estimating tolerable erosion in the country's conditions are also presented.

Results and discussion

The concept of tolerable soil erosion used in soil conservation programs is not suitable for maintaining the long-term indefinite productivity of agricultural lands over the long term. This is because these values are based on incorrect assumptions about the rates of topsoil formation and mineral weathering processes. The concept is built on two assumptions: first, that soil scientists can reliably and accurately assess the maximum tolerable erosion rates; and second, that policymakers can objectively weigh and balance these assessments against various interests or needs. Both assumptions should be challenged. Short-term political considerations might require that public policies allow soil resources to be degraded gradually and continuously to the point where they are no longer usable for agriculture. However, sustained support for such policies must clearly take into account the quantity and quality of available information on soil formation rates under agricultural conditions. Another point is that assessing soil erosion damages beyond the site of erosion to facilities, infrastructures, and biological resources also requires monitoring indicators

* Corresponding author: z.gerami530@gmail.com

off-site for evaluation. Tolerable soil erosion values are crucial and should not be determined based on incorrect and unscientific assumptions. Overall, after reviewing the proposed methods for determining tolerable erosion, it can be concluded that the method suggested by Macedo could be appropriate for Iran's conditions, given that the parameters examined in this method are easily accessible and, considering the data scarcity in Iran, this method is well-suited to these conditions.

Conclusion

Given that the concept of tolerable erosion based on soil fertility and soil formation rates is insufficient, and that the off-site effects of soil erosion should also be considered, more extensive and scientific research in this field is necessary. Since the concept of tolerable soil loss is useful for planning soil conservation strategies, its quantitative estimation is essential and should be performed taking into account extreme rainfall events rather than average conditions. Therefore, research on the statistical distribution of maximum annual soil losses in different regions of the world is necessary.

Keywords: Erosion models, Soil fertility, Soil loss, Soil quality, Soil formation

Cite this article: Parvizi, Y., Gerami, Z., 2026. Tolerable soil erosion: concepts and estimation methods suitable for Iran's conditions. *Water. Eng. Manag.* 17(4), 448-476.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



فرسایش قابل تحمل: مفاهیم و روش‌های برآورد متناسب با شرایط ایران

یحیی پرویزی^۱ و زهرا گرامی^{۲*}

^۱ استاد، گروه حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۲ پژوهشگر، گروه حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

چکیده مبسوط

مقدمه

برآوردهای انجام شده در کشور، نشان از هدررفت سالانه حدود یک میلیارد مترمکعب خاک از عرصه منابع اراضی کشور است. اگرچه ارزش‌گذاری اقتصادی این حجم از اتلاف منابع خاک از این رهگذر کار دشواری است، ولی با توجه به تعادل شکننده زیست‌بوم‌های موجود در منابع اراضی کشور، می‌توان پیش‌بینی کرد که این حجم اتلاف منابع چه زیان جبران‌ناپذیر و برگشت‌ناپذیری را به ظرفیت تولید و کارکرد این منابع وارد می‌کند. بخشی از این اتلاف خاک به‌وسیله فرایندهای خاک‌سازی جبران و جایگزین می‌شود و تا زمانی که میزان فرسایش از نرخ خاک‌سازی پیشی نگرفته است، به نوعی فرایندی طبیعی و اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود. داشتن اطلاع از نرخ جایگزینی طبیعی برای رصد تغییرات کیفیت و کمیت این منبع طبیعی و دانستن روند زوال یا بهبودی آن ضروری است. به‌علاوه، فرسایش خاک در خارج از محل وقوع خود، خساراتی را از منظر اقتصادی، تنوع زیستی و نیز بر چشم‌انداز طبیعی وارد می‌کند. حد قابل تحمل این نوع خسارات نیز استاندارد علمی خاص خود را طلب می‌کند. از سوی دیگر، سالانه ارقام کلانی از منابع مالی کشور صرف اقدامات آبخیزداری می‌شود. این در حالی است که یک استاندارد منطقه‌ای کمی برای طراحی این اقدامات و همچنین یک شیوه‌نامه کاربردی، برای ارزیابی میزان اثرگذاری این اقدامات در دست نیست. این استاندارد و نیز کمیت نرخ باززایی و تجدیدپذیری خاک، در جهان تحت عنوان فرسایش قابل تحمل خاک (T) شناخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این نوشتار تلاش شده تا ضمن رصد توسعه مفاهیم فرسایش قابل تحمل در جهان، فنون و شیوه‌های توسعه یافته، با نگاهی به قابلیت تعمیم و کاربرد در شرایط ایران مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش، مروری بر ۱۰۹ مقاله علمی پژوهشی داخلی و خارجی صورت گرفته است و خلاصه‌ای از نحوه شکل‌گیری مفهوم فرسایش قابل تحمل در علوم خاک، عامل‌های مؤثر بر مقدار T و همچنین روش‌های محاسبه آن معرفی و ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، خلاصه‌ای از تحقیقات صورت‌گرفته و نتایج آن‌ها در ارتباط با فرسایش قابل تحمل و آشنایی با روش‌های مختلف در این زمینه ارائه و پیشنهادها و نیازهای تحقیقاتی و راهکارهای بهینه برآورد فرسایش قابل تحمل برای شرایط کشور معرفی شده است.

نتایج و بحث

مفهوم فرسایش قابل تحمل خاک که در برنامه‌های حفاظت خاک به‌کار می‌رود، برای حفظ قابلیت تولید نامحدود زمین‌های زراعی در درازمدت مناسب نیست. زیرا این مقادیر بر اساس فرضیات نادرستی درباره نرخ‌های تشکیل لایه

* مسئول مکاتبات: z.gerami530@gmail.com

سطحی خاک و فرایندهای هوازدگی معدنی تعیین شده‌اند. این مفهوم بر دو فرض بنا شده است: اول، دانشمندان خاک می‌توانند به‌طور قابل اعتماد و دقیق، بیشینه نرخ‌های فرسایش قابل تحمل را ارزیابی کنند. دوم، سیاست‌گذاران می‌توانند این ارزیابی‌ها را به‌طور عینی در برابر منافع یا نیازهای مختلف سنجش و متعادل کنند. در حالی که هر دو فرض باید به چالش کشیده شوند تا صحت آن‌ها مشخص شود. ممکن است ملاحظات سیاسی کوتاه مدت ایجاب کند که سیاست‌های عمومی به تدریج اجازه دهند منابع خاک بدون وقفه تخریب شوند. تا حدی که دیگر برای کشاورزی قابل استفاده نباشند. اما حمایت مستمر از چنین سیاستی باید به وضوح به میزان و کیفیت اطلاعات موجود درباره نرخ‌های تشکیل خاک در شرایط کشاورزی توجه داشته باشد. مقادیر فرسایش قابل تحمل خاک بسیار مهم هستند و نباید بر اساس فرضیات نادرست و غیرعلمی تعیین شوند. نکته دیگر آن‌که، بررسی خسارات فرسایش خاک در خارج از محل وقوع فرسایش بر روی تأسیسات، زیرساخت‌ها و منابع زیستی نیز مستلزم رصد کردن شاخص‌هایی در خارج از محل وقوع فرسایش برای ارزیابی است. در مجموع با بررسی روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه شده می‌توان بیان کرد که روش‌های پیشنهادی Macedo می‌تواند روش مناسبی برای شرایط ایران باشد، با توجه به کمبود داده در ایران و از این نظر که ویژگی‌های مورد بررسی در این روش سهل‌الوصول هستند.

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که پذیرش مفهوم فرسایش قابل تحمل بر اساس شرایط حاصلخیزی (توان تولید) و سرعت تشکیل خاک کافی نیست و اثرات برون عرصه‌ای فرسایش خاک نیز باید در آن لحاظ شود، در نتیجه تحقیقات بیشتر و علمی‌تری در این زمینه ضروری است. از آنجایی که مفهوم تحمل از دست دادن خاک برای برنامه‌ریزی راهبردهای حفاظت خاک مفید است، برآورد کمی آن نیز ضروری است و بهتر است با در نظر گرفتن رگبارهای حدی به جای شرایط متوسط انجام شود. به همین دلیل، باید تحقیقاتی در زمینه توزیع آماری بیشینه تلفات سالانه خاک در مناطق مختلف جهان انجام شود.

واژه‌های کلیدی: تشکیل مجدد خاک، تلفات خاک، حاصلخیزی خاک، کیفیت خاک، مدل‌های فرسایش

مقدمه

خاک به‌عنوان یک منبع تجدیدناپذیر در نظر گرفته می‌شود، زیرا فرایند تشکیل آن بسیار کند است و برای تشکیل چند سانتی‌متر لایه سطحی خاک در شرایط عادی کشاورزی، به صدها تا هزاران سال زمان نیاز دارد (Singh et al., 2023)، درحالی‌که تخریب آن به‌دلیل پدیده‌های مختلف فرسایشی، سریع بوده، می‌تواند به‌وسیله فعالیت‌های متنوع انسانی مانند کشاورزی، ساخت و ساز و معدن‌کاری که عامل تخریب سطح زمین هستند و مناطق مجاور خود را در معرض فرسایش شدید خاک قرار داده‌اند، تسریع شود (Dash et al., 2021).

فرسایش خاک به‌وسیله آب باعث کاهش بهره‌وری خاک می‌شود. اگر نرخ فرسایش خاک بیشتر از نرخ تشکیل خاک باشد، بهره‌وری خاک کاهش می‌یابد. در مقابل، فرسایش زمین‌شناسی که با نرخ کمتر از تشکیل

خاک رخ می‌دهد، تأثیر منفی بر بهره‌وری خاک ندارد. اما فرسایش تسریع شده که به‌وسیله فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود، در نهایت به تهدیدی برای بیابان‌زایی تبدیل می‌شود (Di Stefano et al., 2023). برآوردهای جهانی نشان از خسارات گسترده فرسایش به منابع اراضی و مقدار تولید در مناطق مختلف جهان و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است. برآوردهای انجام شده در کشور نشان از اتلاف حدود یک میلیارد مترمکعب خاک در سال است (Arabkhedri et al., 2016). تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در جهان انجام شده تا مشخص شود که چه میزان از این فرسایش به‌وسیله توان ذاتی تشکیل خاک قابل جبران است. فرسایش قابل تحمل^۱ از نظر تصمیم‌سازی در حوزه مدیریت منابع اراضی، یک متغیر بسیار مؤثر و کلیدی است و به‌عنوان معیار قضاوت برای این‌که آیا خاکی دارای پتانسیل خطر فرسایش و از

¹ Soil loss tolerance (T_{value})

ظرفیت نگهداری آب عامل کاهش عملکرد محسوب شود، ناچیز خواهد بود. فرسایش قابل تحمل برحسب اقلیم و کشت و زرع متفاوت است. از دست رفتن عناصر غذایی در اثر فرسایش منجر به کاهش رشد و نمو گیاهان و در نتیجه عملکرد محصول می‌شود. در ادامه، ضمن تبیین تعاریف و مفاهیم مطرح شده درباره فرسایش قابل تحمل، مهم‌ترین روش‌های ارزیابی و تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه شده و نقاط ضعف و قوت این روش‌ها بازگو خواهد شد.

تعاریف فرسایش قابل تحمل: فرسایش قابل تحمل، مفهومی مفید برای قضاوت در مورد این است که آیا خاک دارای خطر بالقوه فرسایش برای از دست‌دادن بهره‌وری و آسیب‌های خارج از محل به‌عنوان مثال رسوب بیش از حد ورودی به رودخانه یا مخزن را دارد یا خیر (Li et al., 2009). فرسایش قابل تحمل همچنین معیاری مفید برای طراحی شیوه‌های حفاظتی است و برای کنترل فرسایش به‌کار می‌آید یا می‌تواند به‌عنوان شاخص کیفیت خاک استفاده شود (Johnson, 2005). اصطلاح فرسایش خاک قابل تحمل زمانی استفاده می‌شود که به خاک از دست رفته در اثر فرسایش در زمینه حفاظت از خاک اشاره می‌شود و فرسایش قابل تحمل، متغیری است که برای بیان این مفهوم استفاده می‌شود و اغلب به واحد تن بر هکتار در سال گزارش می‌شود. در جدول ۱، برخی تعاریف مختلف فرسایش خاک قابل تحمل ارائه شده است.

مفاهیم فرسایش قابل تحمل و معادله جهانی فرسایش^۱ به‌طور هم‌زمان در دهه ۱۹۴۰ در ایالات متحده آمریکا در زمینه حفاظت خاک و آب ایجاد شد (Schertz, 1983; Wischmeier and Smith, 1978). مفاهیم اولیه مقدار T بر اساس عوامل فیزیکی خاک از قبیل حفظ قدرت باروری و عوامل حاصلخیزی خاک از قبیل هزینه جایگزینی عناصر غذایی از دست رفته به‌وسیله فرسایش بود. با تعیین مقادیر فرسایش قابل تحمل (T) به‌وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا برای اغلب خاک‌های اصلی در ایالات متحده در اوایل ۱۹۶۰، استفاده از آن به‌طور قابل توجهی گسترش یافت.

دست دادن حاصلخیزی است یا نه و آیا رودخانه‌ای دارای رسوب بیش از حد در پایین دست خود است یا نه، استفاده می‌شود.

فرسایش قابل تحمل در واقع شاخصی از کیفیت خاک است که حاصلخیزی خاک و محیط زیست را برای مدت طولانی حفاظت می‌کند (Johnson, 2005) و از این‌رو باید به روش‌های علمی تعیین شود.

فرسایش قابل تحمل بالاترین مقدار فرسایش است که می‌تواند صورت بگیرد، بدون این‌که در میزان تولید محصولات زراعی برای مدت طولانی تأثیر داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر، مقدار فرسایش قابل تحمل بایستی برابر تشکیل مجدد خاک مناسب برای توسعه ریشه باشد. بنابراین، اگر فرسایش پیش‌بینی شده کمتر از حد قابل تحمل باشد، می‌توان انتظار حفظ قدرت تولید در درازمدت را داشت. فرسایش قابل تحمل را معمولاً با T نشان می‌دهند (Lee et al., 2023).

اخیراً توجه به مقدار فرسایش قابل تحمل افزایش یافته است که این امر به‌دلیل ارتباط مستقیم با مشکلات اساسی ناشی از فرسایش خاک، و معیاری برای تشخیص اراضی با فرسایش بالا از سایر اراضی است. همچنین از کاربردهای بسیار مهم و اساسی عامل T، تعیین اقدامات کنترل فرسایش در اراضی کشاورزی و سایر اراضی است. بنابراین لازم است که علمی و منطقی تعیین شود. تعیین استانداردهای سخت‌گیرانه برای فرسایش قابل تحمل به معنی صرف هزینه‌های بسیار زیاد مالی، تحقیقات آزمایشگاهی و غیره است و بالعکس هرچند مقدار زیاد T، هزینه حفاظت خاک را کاهش می‌دهد، اما ممکن است منجر به فرسایش زیاد و ایجاد مشکلات بسیاری مانند کاهش حاصلخیزی خاک، تخریب اراضی، آسیب به محیط‌زیست و غیره شود.

تشکیل خاک در اثر هوازدگی سنگ‌ها، کند و بطئی است و در مناطق نیمه‌خشک به‌طور متوسط ۰/۱۰ و در مناطق معتدله مرطوب ۰/۲۵ میلی‌متر در سال خاک تشکیل می‌شود. بنابراین، برای این‌که حدود ۱۰ سانتی‌متر خاک در مناطق نیمه‌خشک تشکیل شود، چهار هزار سال زمان لازم است (Blanco-Canqui and Lal, 2008). محاسبه کاهش عملکرد تا هنگامی که ضخامت خاک به حدی کاهش نیافته باشد که در آن

¹ The Universal Soil Loss Equation (USLE)

جدول ۱- تعاریف فرسایش قابل تحمل

Table 1. Definitions of tolerable soil erosion

Author(s)	Definition
Smith (1941)	Tolerable soil erosion is defined as the maximum amount of soil loss that can occur without reducing soil fertility or compromising the capacity to produce agricultural crops.
Browning et al., (1947)	They were the first to define tolerable erosion as the highest rate of erosion that can occur without adversely affecting long-term productive capacity or causing the formation of gullies.
Stamey and Smith (1964)	The quantity of surface soil that can be lost without reducing crop yield, expressed as a function of time.
Wischmeier and Smith (1978)	The maximum rate of soil erosion that permits sustained crop production at an economically acceptable level and on an indefinite time scale.
Roose (1996)	The amount of soil loss equal to the rate of soil formation from parent material (bedrock).
Skidmore (1998)	Tolerable soil erosion is defined as a mathematical function that maintains soil depth.
Salviano et al. (1998)	Tolerable soil erosion is a mathematical function that relates to the time-dependent change in soil depth, where a minimum soil depth is required to maintain soil productivity.
Verheijen (2009)	The average annual soil erosion rate at which the loss of one or more soil functions (e.g., production, habitat, reservoir, filtering, etc.) does not occur.
USDA Soil Conservation Service (cited in Carollo et al., 2023)	The maximum rate of soil erosion that allows maintenance of a high level of agricultural crop production economically and for an indefinite period.

مفهوم فرسایش قابل تحمل عموماً به عنوان بیشینه تلفات قابل قبول خاک است که اجازه حفظ توان تولید را برای مدت طولانی می‌دهد (Carollo et al., 2023). همچنین، برخی از دانشمندان (Skidmore et al., 1982) پیشنهاد می‌کنند که چندین مقدار T بایستی استفاده شود. با افزایش درک اثرات مخرب سیلاب‌ها، رسوبات، و پدیده به‌پروردگی^۱ در منابع آب سطحی و غیره، اخیراً به دو مقدار T که معمولاً به عنوان T_1 و T_2 معرفی می‌شوند، تأکید بیشتری شده است. T_1 محدوده پایینی مقدار فرسایش قابل تحمل و به عنوان مقدار تلفات خاکی است که اجازه کاهش توان تولید خاک را از یک حد معین در یک دوره زمانی مشخص بر اساس قدرت باروری خاک نمی‌دهد.

این مقدار برای یک خاک کم عمق، برابر با سرعت تشکیل خاک، و برای یک خاک عمیق، برابر با حفظ تولید محصول است. T_2 محدوده بالایی مقدار فرسایش قابل تحمل است که با توجه به نیازهای محیط زیستی، اجتماعی، اقتصادی، و سیاسی تعیین می‌شود. این شاخص در ارتباط با سایر مشکلات فرسایش است و اهداف اجتماعی را بازتاب می‌دهد. عوامل اصلی T_2 شامل کنترل سیلاب، آلودگی آب، بار رسوب قابل قبول رودخانه‌ها و غیره هستند. با توجه به پیشرفت‌های اجتماعی و توسعه صنعتی، ضرورت حیاتی برای تعیین T_2 در برخی مناطق وجود دارد (Di Stefano et al., 2023).

همچنین، طبق نظر Verheijen et al., (2009)، با بررسی تعاریف موجود برای مفهوم فرسایش قابل تحمل، دو رویکرد متفاوت وجود دارد: (۱) ایجاد فرسایش قابل تحمل به عنوان مقداری که قادر به حفظ تعادل پویای^۲ کمیت خاک (به عنوان جرم یا حجم) در هر مکان و تحت هر شرایطی است و (۲) ارتباط فرسایش قابل تحمل با عملکرد تولید زی‌توده^۳ خاک. رویکرد اول بر کمیت خاک متمرکز است، درحالی‌که رویکرد دوم فقط بر عملکرد تولید زی‌توده (به ویژه محصولات زراعی) خاک متمرکز است. تعریف اول، تا جایی از دست دادن خاک را قابل تحمل می‌داند که از نرخ تشکیل خاک تجاوز نمی‌کند، ولی تعریف دوم، مقدار تحمل شده را به نتیجه یک عملکرد خاص خاک مرتبط می‌کند (Di Stefano and Ferro, 2016).

Verheijen et al., (2009) پیشنهاد کردند که بهتر است هر دو رویکرد را ادغام و تعریفی جامع‌تر از فرسایش خاک قابل تحمل ارائه شود. به‌طوری‌که آن تعریف، به عنوان میانگین سالانه تجمعی نرخ فرسایش خاک (ترکیبی از همه انواع فرسایش) که در آن زوال یک یا چند عملکرد (اصلی) خاک رخ نمی‌دهد، ارائه شده باشد (به عنوان مثال، زیستگاه، تولید، ذخیره‌سازی، فیلتر کردن). به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که عملکرد خاک زمانی که فرسایش خاک با شرایط زمین‌شناسی یا نرمال مطابقت دارد، بیشتر نمی‌شود.

³ Biomass¹ Eutrophication² Maintain dynamic balance

عوامل مؤثر بر دامنه فرسایش قابل تحمل خاک:

عواملی نظیر نوع بهره‌برداری از عرصه، شرایط اقلیمی مؤثر بر نرخ تشکیل خاک و اثرات برون‌حوضه‌ای ناشی از فرسایش خاک، در تعیین کمیت و دامنه فرسایش قابل تحمل مؤثر هستند. به‌عنوان مثال همان‌طور که در بندهای آتی تشریح خواهد شد، فرسایش قابل تحمل در ایالات متحده آمریکا بین ۲/۳ تا ۱۱/۲ تن در هکتار در سال تعیین شده است (Guo et al., 2020).

عوامل مؤثر در انتخاب این محدوده عبارتند از ضخامت خاک سطحی، عمق کل خاک، و ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت و ساختمان خاک که در توسعه و گسترش ریشه مؤثرند. در واقع مقدار تحمل فرسایش یک خاک عمیق با نفوذپذیری متوسط نسبت به یک خاک کم عمق با نفوذپذیری کم، بیشتر است و بنابراین برای خاک‌های کم عمق فرسایش قابل تحمل کمتر از خاک‌های عمیق است. در تعیین فرسایش قابل تحمل از نظر کنترل کیفیت آب، عمق پروفیل خاک اثری ندارد بلکه اندازه ذرات و تمایل آن‌ها برای تعلیق و نیز جنس خاک، بیشتر مؤثر است. عوامل مؤثر در انتخاب بیشینه فرسایش قابل تحمل ۱۱/۲ تن در هکتار در سال در ایالات متحده آمریکا به شرح زیر است (Di Stefano et al., 2023).

- امکان تشکیل ۲/۵ سانتی‌متر خاک سطحی در طی ۳۰ سال در خاک‌های قابل نفوذ با بافت متوسط با مدیریت معمولی است، در صورتی که جرم مخصوص ظاهری خاک ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شود، مقدار فرسایش برابر مقدار تشکیل افق A در اثر شخم و افزایش بقایای گیاهی و مواد آلی خواهد بود.

- رسوب حاصل از فرسایش بیش از این حد، کارایی سازه‌های آبی مانند نهرها و استخرها را کاهش و هزینه نگهداری آنها را افزایش خواهد داد.

- تلفات خاک بیش از این می‌تواند سبب فرسایش آب‌بندی شدید در مزرعه شود که موجب بروز مشکلات زیادی در انجام عملیات شخم و کشت می‌شود.

عوامل دهگانه‌ای که مقدار T در یک خاک مشخص را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به شرح زیر قابل دسته‌بندی هستند (USDA, 1956):

- سرعت تشکیل خاک از مواد مادری
 - سرعت تشکیل خاک سطحی از خاک تحت الارض
 - کاهش میزان عملکرد محصول در اثر فرسایش
 - عمق خاک
 - تغییر در ویژگی‌های مطلوب خاک برای رشد گیاه در اثر فرسایش
 - از دست رفتن عناصر غذایی به‌وسیله فرسایش
 - احتمال تشکیل شیار و آب‌بند
 - مشکلات رسوب‌گذاری در داخل مزرعه
 - امکانات عملی، اقتصادی، فرهنگی، و اجتماعی قابل قبول برای اقدامات حفاظت پایدار خاک^۱
- هرچند ملاک‌های تعیین مقدار فرسایش قابل تحمل چندین بار اصلاح شده‌اند، لیکن عوامل ضروری تعیین T، معمولاً سرعت تشکیل خاک و حاصلخیزی آن هستند (Toy et al., 2002).

محدوده فرسایش قابل تحمل و مقدار تشکیل

خاک: اگر فرضیه تشکیل خاک از هواپدگی و تخریب سنگ‌ها مد نظر قرار گیرد، نتیجه‌ای که حاصل خواهد شد این است که سنگ‌های آذرین قبل از انجام این فرایند و با سرد شدن مواد مذاب تشکیل شده‌اند. متعاقباً در اثر پدیده‌های جوی بر سطح سنگ‌ها به تدریج ساییده شده، تخریب یافته و خاک تشکیل شده است. در ادامه این فرایند، بر ضخامت خاک افزوده شده، فعالیت‌های زیستی نیز در آن شروع شده است.

خاک فرسایش یافته به‌وسیله آب وارد دریاها و اقیانوس‌ها شده، سپس سنگ‌های رسوبی تشکیل شده‌اند و در نهایت در اثر فعل و انفعالات دیگر سنگ‌های دگرگونی حاصل شده‌اند. در حال حاضر سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی برحسب مشخصات زمین‌شناسی می‌توانند سنگ بستر خاک را تشکیل دهند. لایه خاک بر روی سنگ زیرین قرار گرفته است. این لایه که اصطلاحاً خاک‌کره^۲ گفته می‌شود محل تلاقی عوامل محیطی، زیستی، و غیره با سنگ بستر است (Hartemink and Bockheim, 2013).

دگرگونی فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها و کانی‌ها در سطح زمین یا نزدیک آن را هواپدگی می‌گویند. سنگ‌ها و کانی‌ها با شرایط محیط خودشان از نظر دما،

^۲ Geosphere^۱ Sustainable soil conservation

فشار، و رطوبت در تعادل نیستند. هوادیدگی موجب خرد شدن سنگ‌ها و تجزیه و تغییراتی در کانی‌های اولیه و ثانویه می‌شود و آن‌ها را به حالت پایدارتری در محیط خودشان می‌رساند. هوادیدگی بر دو نوع، فیزیکی و شیمیایی است. این دو نوع هوادیدگی اگرچه با هم عمل می‌کنند ولی ممکن است در مرحله‌ای از پیدایش خاک تأثیر یکی بیش از دیگری باشد (Wang et al., 2024).

اگر شدت فرسایش خاک بیشتر از خاک‌سازی باشد و فرسایش خاک با تشکیل خاک جبران نشود، منجر به تخریب خاک و نهایتاً موجب بیابان‌زایی خواهد شد. از آنجایی که مواد خاکی از تولیدات هوادیدگی سنگ‌ها هستند، شدت تشکیل خاک با شدت هوادیدگی خاک خیلی نزدیک است. بنابراین، براساس روش‌های ژئوشیمیایی که تأکید بر شدت هوازدگی سنگ‌ها دارند می‌توان برآورد قابل قبولی از شدت خاک‌سازی داشت. تحقیقات وسیعی در ارتباط با فرسایش قابل تحمل بر اساس سرعت تشکیل خاک صورت گرفته است. اتفاق آرا در رابطه با این‌که، تلفات خاک بایستی حاصلخیزی بلندمدت خاک را تثبیت کند و موازنه بین تلفات خاک و سرعت تشکیل خاک ایجاد شود، وجود دارد (Carollo et al., 2023; Ostovari et al., 2020; Schertz, 1983; Pierce et al., 1984; Alexander, 1988a,b).

دو سرعت متفاوت برای تشکیل خاک در ارتباط با فرسایش قابل تحمل مطرح است. اولی سرعت تشکیل خاک سطحی با کیفیت و با دانه‌بندی خوب با ضخامت بیشتر از ۲۵۰ میلی‌متر که اجازه رشد ریشه، تهویه خوب، نگهداری رطوبت خاک با تأمین عناصر غذایی و مواد آلی، که امکان رشد گیاه را فراهم می‌کند، است. در شرایط مطلوب، از قبیل پوشش مناسب درختان، چمن، و سایر گیاهان حفاظتی، سرعت تشکیل خاک سطحی ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۸۵ میلی‌متر در سال است (Bennett, 1936).

طبق نظر Bennett (1939)، در یک خاک معمولاً در شرایط دست نخورده حدود ۳۰۰ سال طول می‌کشد تا ۲۵ میلی‌متر خاک سطحی تشکیل شود. این مقدار

خاک تشکیل شده به مراتب کمتر از خاک فرسایش یافته است. در یک زمین تحت کشت و بدون رعایت همه جانبه اصول حفاظت خاک برای تشکیل همین ۲۵ میلی‌متر خاک حدود ۱۰۰ سال وقت لازم است. به این ترتیب، در چنین شرایطی در هر سال حدود چهار تن خاک در هکتار ایجاد می‌شود. در شرایط بهینه و با به کار بردن روش‌های مناسب کاشت، داشت و برداشت هر ۳۰ سال ۲۵ میلی‌متر خاک می‌تواند تشکیل شود که این مقدار خاک تشکیل شده برابر ۱۲/۵ تن در هکتار در سال است (Lee et al., 2023). فرسایش در اثر دخالت بشر ممکن است از ۰/۲ میلی‌متر در سال تجاوز کند (Kliment'ev and Tikhonov, 2001) که به‌طور معنی‌دار بیشتر از سرعت تشکیل خاک و فرسایش طبیعی است.

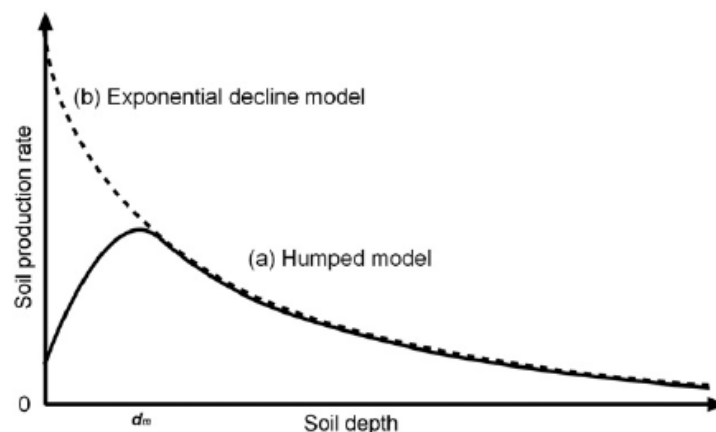
سرعت دوم تشکیل خاک، سرعت تشکیل از مواد مادی یا سنگ بستر است. مقدار T اشاره شده در واقع سرعت تشکیل خاک از مواد مادری است. از آنجایی که تشکیل خاک داخل نیم‌رخ^۱ است تعیین این سرعت تشکیل بسیار دشوار بوده، به‌طور قابل ملاحظه‌ای با جنس مواد مادری و اقلیم تغییر می‌کند (Di Stefano et al., 2023).

در شرایطی که بشر در سرعت تشکیل خاک دخالت می‌کند، سرعت تشکیل خاک تحت تأثیر عوامل زیادی از قبیل عمق خاک، مدت زمانی که از خاک در کاربری مزرعه استفاده شده است، تناوب محصول، نوع شخم، میزان مصرف کود و مقدار فرسایش کنونی، قرار می‌گیرد. مطالعات اولیه نشان داد که سرعت تشکیل خاک از مواد مادری تابعی از عمق خاک است که به آن تابع تولید خاک^۲ گفته می‌شود. براساس مطالعات اخیر، دو مدل تابع تولید خاک یکی تابع a در شکل ۱، که تولید خاک با افزایش عمق خاک تا حدی افزایش و سپس کاهش می‌یابد، و دیگری، تابع b در همان شکل که تولید خاک با افزایش عمق خاک به‌طور نمایی کاهش می‌یابد، شکل ۱ نشان می‌دهد که نمودار عمق خاک در برابر سرعت تولید خاک یک نمودار کوهان شکل^۳ است (Gabet and Mudd, 2010; Humphreys and Wilkinson, 2007).

³ Humped

¹ Profile

² Soil production function



شکل ۱- نمودار عمق خاک در برابر سرعت تولید خاک (Gabet and Mudd, 2010)

Fig. 1. Soil depth versus soil production rate (Gabet and Mudd, 2010)

اندازه‌گیری شدت و مقدار جریان آب خروجی از حوضه است در حوضه‌های مناطق خشک که آبی از آن خارج نمی‌شود، برآوردهای قابل قبولی به‌دست ندهد (Ott et al., 2023).

بنابراین، انتخاب مدل مناسب، خود مقوله‌ای قابل تأمل است. مدل‌های مختلف نیازمند ورودی‌های متفاوت و خاص خود هستند. در نظر گرفتن این موضوع برای برآورد هزینه‌های انجام آزمایش بسیار حایز اهمیت است. برای نمونه، انتخاب مدلی که نیازمند اندازه‌گیری‌های زیاد و پرهزینه است، ولو این‌که نتایج بسیار دقیقی به‌دست دهد، در شرایطی که همه هزینه‌های آن تأمین نشود، گزینه مناسبی نیست و شاید هیچ نتیجه‌ای به‌دست نیاید. از طرفی، هر مدل دارای پیش فرض‌هایی است که باید شرایط موجود با این پیش فرض‌ها همخوانی داشته باشند و به عبارتی، این شرایط با فرض‌های مدل صدق کنند.

همچنین (Huber et al., 2008)، این سوال را مطرح می‌کند که آیا مقادیر آستانه متفاوتی برای نرخ فرسایش خاک قابل تحمل در مناطق مختلف به‌طور مثال اروپا، باید پیشنهاد کرد؟ که در پاسخ بیان می‌کند که هر منطقه بسته به شرایط محلی خود باید مقادیر فرسایش قابل تحمل مختص به خود را معرفی کنند تا از حفاظت از عملکرد خاک و استفاده پایدار از خاک اطمینان حاصل شود.

به‌طور کلی تعیین سرعت تشکیل خاک پیچیده است و عموماً دو روش برای تعیین آن وجود دارد: یکی بر اساس فرضیه بیلان موازنه جرم ژئوشیمیایی^۱ و دیگری با استفاده از رادیوایزوتوپ‌های کیهانی^۲ است. به‌طور کلی، سرعت تشکیل خاک در مقیاس جهانی بین ۰/۳۱ تا ۰/۱۰۸ (به‌طور میانگین ۰/۰۵۱) میلی‌متر در سال است (Wakatsuki and Rasyldin, 1992). بیشتر گزارشات مربوط به تعیین سرعت تشکیل خاک به‌وسیله رادیوایزوتوپ‌های ¹⁰Be و ²⁶Al نشان می‌دهد که در مناطق مختلف سرعت تشکیل خاک متفاوت است (Minasny and McBratney, 1999; Small et al., 2001; Heimsath et al., 2001, 2002).

علاوه بر این دو روش، برخی از محققین تلاش کردند سرعت تشکیل خاک را با استفاده از کمی کردن سرعت هوازدگی شیمیایی خاک به‌دست آورند (Bouchard et al., 2000; Peter et al., 2002; Green et al., 2006; Anderson et al., 2005). تمامی این روش‌ها، روش‌های محاسبه غیرمستقیم سرعت تشکیل خاک هستند و تاکنون به‌وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی کالیبره نشده‌اند (Li et al., 2009).

در نهایت این‌که، مدل‌های مختلفی برای تعیین شدت هوازدگی و برآورد سرعت خاک‌سازی ارایه شده است که هر کدام با توجه به شرایط محیطی و فرض‌های مدل دارای متغیرهای مختلف و دقت‌های متفاوت هستند. برای نمونه ممکن است مدلی که نیازمند

² Cosmogenic radionuclides

¹ Geochemical mass balances

خاک می‌تواند حاصلخیزی خاک را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد (Gantzer et al., 1990).

Biggelaar et al., (2003) با تجزیه و تحلیل گزارش‌ها، به کاهش ۰/۳ درصد در سال حاصلخیزی در مقیاس جهانی پی بردند، که کاهش عملکرد محصول نسبتاً سریع‌تر از مقدار فرسایش صورت می‌گیرد. با توسعه علوم، فناوری‌ها و ایجاد راه‌های جدید و ایجاد گونه‌های جدید گیاهان، کودها و آفت کش‌ها، شدت خسارت‌های ناشی از فرسایش گاهی اوقات مبهم است. بنابراین، در تعیین مقدار T باید فناوری کشاورزی که کاهش عملکرد محصول در اثر فرسایش را جبران می‌کند، هزینه‌های به‌کارگیری فناوری‌های جدید و پایداری سامانه کشاورزی به کمک این فناوری‌ها را باید در نظر گرفت.

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل: حتی اگر تحمل فرسایش خاک به‌عنوان یک مفهوم عمومی پذیرفته شده و یک ابزار مفید برای برنامه‌ریزی حفاظت شناخته شود (Toy et al., 2002)، برآورد کمی آن همچنان مورد بحث است، زیرا یک روش علمی قوی برای برآورد آن هنوز وجود ندارد. در اروپا، یک روش عمومی برای برآورد آن وجود ندارد (Panagos et al., 2015). Syrbe et al., (2018) فرسایش خاک را در اتحادیه اروپا با استفاده از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) ارزیابی کردند و پیشنهاد دادند که استفاده از تناوب زراعی و اعمال روش‌های مدیریت کشاورزی، به‌عنوان عواملی مفید برای برآورد شرایط پوشش خاک باشد.

در حال حاضر، مقدار T به‌وسیله روش‌های مختلف از جمله عمق خاک، سرعت تشکیل خاک، دستورالعمل وزارت کشاورزی آمریکا (سازمان حفاظت منابع طبیعی) و شاخص توان تولید خاک تعیین و اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، با توجه به این‌که بخش مهمی از خسارات فرسایش خاک، ناظر به اثرات و خسارات برون منطقه‌ای فرسایش خاک، نظیر رسوب‌گذاری در مخازن و کانال‌ها، آلودگی آب‌های سطحی، سیل و رسوب‌گذاری است، از این منظر نیز روش‌هایی برای تعیین فرسایش قابل تحمل در مقیاس حوضه مطرح و ارائه شده است. در ادامه این روش‌ها به‌طور خلاصه معرفی می‌شوند.

بر این اساس، Sokouti Oskouei and Arabkhedri, (2018) بر اساس آمار کرت‌های فرسایشی، ضخامت خاک، لایه محدود کننده، نوع کاربری اراضی و اقلیم، میزان فرسایش قابل تحمل کشور را به پنج طبقه بر اساس شکل ظاهری اراضی تقسیم‌بندی کردند. طبق طبقات پیشنهادی، مقادیر کمینه فرسایش قابل تحمل خاک از ۰/۲۵ تا بیشینه ۱/۲۵ تن در هکتار در سال بر اساس شکل ظاهری اراضی و عمق خاک متغیر است.

مقدار فرسایش قابل تحمل، آب خاک در دسترس گیاه و حاصلخیزی خاک: تولید محصول به شدت وابسته به رطوبت خاک است زیرا تمامی گیاهان نیازمند آب کافی برای رشد هستند (Ratke et al., 2023). بنابراین، آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصول در زیست‌بوم‌های کشاورزی است (Islam et al., 2023).

فرسایش باعث از بین رفتن خاک و کاهش عمق خاک سطحی می‌شود، که منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب خاک و در نتیجه کاهش تولید محصول می‌شود. در اثر کاهش ۱۰ تا ۲۵ درصد، کارایی مصرف آب در زیست‌بوم‌های کشاورزی در اثر فرسایش، تولید محصول بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد (Qiao et al., 2024). عناصر غذایی خاک نیز تعیین کننده تولید محصول هستند. از دست رفتن عناصر غذایی خاک در اثر فرسایش علت اصلی کاهش حاصلخیزی خاک است. بنابراین، یک مقدار منطقی برای عامل T بایستی در نظر گرفته شود تا حاصلخیزی خاک به‌طور پایدار و تا مدت طولانی در اثر عوامل طبیعی و اقدامات بشری ثابت بماند (Wolf et al., 2023).

ارتباط بین حاصلخیزی و فرسایش خاک پیچیده است زیرا هر دو تحت تأثیر عواملی که به‌طور مکانی و زمانی تغییر می‌کنند، قرار می‌گیرند (Toy et al., 2001)، هرچند این ارتباط می‌تواند به‌طور کمی به‌وسیله شاخص فرسایش‌پذیری EPIC^۱ محاسبه شود (Williams et al., 1984). نتایج طولانی مدت کرت‌های آزمایشی نشان داد که حتی زمانی که خاک فرسایش یافته با مصرف زیاد کود مدیریت می‌شود، فرسایش

¹ Erosion Productivity Impact Calculator

آن معادل ۱۲ تن در هکتار در سال در نظر گرفت، Z عمق فعلی پروفیل خاک و Z_1 و Z_2 به ترتیب کمینه و بهینه عمق پروفیل خاک برای رشد گیاه است که برای خاک‌ها و محصولات مختلف و در مناطق مختلف متغیر است. علامت π برحسب رادیان است. براین اساس، فرسایش قابل تحمل بین نقاط (T_1, Z_1) و (T_2, Z_2) تابعی است که بستگی به عمق خاک دارد و تغییرات آن سینوسی خواهد بود و عبارت $(T_2 - T_1)/2$ دامنه تغییرات این تابع است.

Mirtskhulava, (2001) روش جدیدی را برای تعیین فرسایش قابل تحمل با توجه به عمق نیمرخ بر اساس تئوری ارزیابی احتمال خطر^۱ خاک ایجاد نمود. رابطه‌ای را برای پیش‌بینی سرعت فرسایش در سطح احتمالاتی داده شده، با فرض این‌که ضخامت خاک در زمان t تحت تأثیر فرسایش به‌طور خطی کاهش می‌یابد، پیشنهاد نمود (رابطه ۳).

$$I = \frac{(H_0 - 0.033H_0Z - H_p)}{t} \quad (3)$$

که در آن، H_0 عمق اولیه خاک، H_p ضخامت قابل تحمل و I میانگین سرعت فرسایش سالانه خاک است. با داشتن سطح احتمالاتی (ریسک) یا حدود اعتماد $P = \phi(Z)$ (ضریب coupling) مقدار Z با استفاده از جدول ۱ به دست می‌آید و مقدار فرسایش قابل تحمل در سطح ریسک معین محاسبه خواهد شد.

جدول ۱- مقادیر $\phi(Z)$ یا ضریب اتصالTable 1. Values of $\phi(Z)$ or the bonding coefficient

Z	$\phi(Z) = P$	Z	$\phi(Z) = P$	Z	$\phi(Z) = P$
0	0.5000	2.0	0.9773	4.0	0.9468
0.5	0.6915	2.5	0.9237	4.5	0.9566
1.0	0.8413	3.0	0.9286	5.0	0.9600
1.5	0.9332	3.5	0.9376		

سرعت تشکیل خاک را برای تخمین سرعت تشکیل خاک از مواد مادری ارائه داد (رابطه ۴).

$$W = D + S \quad (4)$$

که در آن، W جرم سنگ هوازده، S جرم مواد معدنی ایجاد شده از مواد مادری و D سرعت حذف عناصر حل شده در آبدوی است. به دلیل وجود دو پارامتر ناشناخته (W و S)، رابطه فوق به‌صورت رابطه (۵) در می‌آید تا با

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش عمق خاک: در این روش، مقدار T وابسته به عمق خاک است و به سادگی از اختلاف عمق خاک و کمینه عمق قابل تحمل فرسایش، تقسیم بر دوره زمانی فرسایش قابل محاسبه است. (Stamey and Smith (1964) رابطه (۱) را برای تعیین مقدار عامل T ارائه کردند.

$$T_{(x,y,t)} = (T_1 + T_2) / 2 - \quad (1)$$

$$[(T_2 - T_1) / 2 \cos [\pi (Z - Z_1) / (Z_2 - Z_1)]]$$

که در این رابطه، $T_{(x,y,t)}$ مقدار فرسایش قابل تحمل در نقطه x و y و در زمان t محدود پائینی T_1 و T_2 محدوده بالایی $T_{(x,y,t)}$ عمق پروفیل خاک در حال حاضر، Z_1 و Z_2 به ترتیب کمینه و مناسب‌ترین عمق خاک که می‌تواند رشد پایدار گیاه فراهم کند، است. Skidmore (1982) بر اساس برآوردهای روش USDA که در بندهای آبی بیان خواهد شد و بر اساس عمق خاک مؤثر در رشد گیاه، روش دیگری را برای تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه کرد (رابطه ۲).

$$T = ((x,y,t)) = ((T_1 + T_2)) / 2 - \quad (2)$$

$$\{((T_2 - T_1)) / 2 \times \cos [\pi ((Z - Z_1)) / ((Z_2 - Z_1))]\}$$

که در آن، $T_{(x,y,t)}$ آستانه فرسایش قابل تحمل در موقعیت x و y در زمان t حد پائینی فرسایش قابل تحمل که آن را معادل ۲/۵ تن بر هکتار در سال در نظر گرفت و T_2 بیشینه فرسایش قابل تحمل است که

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش سرعت تشکیل خاک: منطقی‌ترین تخمین از میزان تشکیل خاک از رسوبات تحکیم یافته و یا مواد مادری رابطه موازنه عنصر^۲ است که به روش بیلان جرمی ژئوشیمیایی^۳ عناصر نیز موسوم است (Huang et al., 2013). یکی از این روش‌ها به‌وسیله Alexander (1988a) در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است که رابطه

³ Geochemical Mass-Balance¹ Risk assessment² Elemental balance equation

تعیین نسبت S/W سرعت هوا دیدگی سنگ بستر تعیین شود.

$$W = \frac{D}{1 - \frac{S}{W}} \quad (5)$$

سپس، Alexander در سال ۱۹۸۶ رابطه فوق را به صورت رابطه (۶) تبدیل کرد.

$$C_i W = D_i + S_i S \quad (6)$$

که در آن، W جرم سنگ هوا زده، S جرم مواد معدنی ایجاد شده از مواد مادری، C_i و S_i به ترتیب غلظت عنصر i در سنگ غیر هوا زده و خاک، و D_i سرعت حذف عنصر i حل شده در آبدوی، که عموماً با شدت جریان یون^۱ تخمین زده می شود، است. این رابطه مشخص می کند که فرایندهای حذف و تجمع عنصر i به شدت آزاد شدن آن از مواد مادری بستگی دارد. فرض شده است که خاک و جامعه زنده آن در شرایط پایدار چرخه عناصر غذایی قرار دارند. در رابطه فوق، سه پارامتر قابل اندازه گیری و دو پارامتر ناشناخته (S و W) وجود دارد، که می تواند به رابطه (۷) تبدیل شود (Li et al., 2009).

$$W = D_i / (C_i - \frac{S_i S}{W}) \quad (7)$$

نسبت S/W در رابطه فوق، می تواند به وسیله یک عنصر پایدار که در آبدوی وجود ندارد، تعیین می شود. بنابراین، $D_i = 0$ در رابطه (۳) می شود، پس $C_i W = S_i S$ و $S/W = C_i / S_i$ است. وقتی که W از رابطه (۴) محاسبه شد، S می تواند از نسبت S/W تعیین شود. با داشتن نسبت S/W ، مقدار W به دست می آید. نهایتاً، با مشخص شدن مقدار W مقدار تشکیل خاک (S) با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است.

$$S = W \left(\frac{S}{W} \right) \quad (8)$$

از آنجایی که غلظت آنیون ها به غیر از اکسیژن در سنگ ها ناچیز است، هوا دیدگی شیمیایی در سنگ ها به وسیله کاتیون های منیزیم، کلسیم، پتاسیم و سدیم و سیلیس (SiO_2) تعیین می شود. هر چند در برخی مناطق از طریق هوا دیدگی آهن و یا آلومینیوم نیز قابل تعیین است (Alexander, 1988a). Alexander, (1988b)، اظهار کرد که نسبت S/W مواد مادری و مقدار توسعه خاک بستگی دارد که این نسبت را برای خاک های کم عمق ۰/۹۵، برای خاک های کم عمق اینسپتی سول ها ۰/۹، برای خاک های نسبتاً عمیق تا

عمیق اینسپتی سول و اسپودوسول ها ۰/۸۵، برای آلفی سول ها ۰/۸ و برای اولتی سول ها ۰/۷ تخمین زده شد. Ruan, (1997) از آلومینیوم به عنوان عنصر پایدار در محاسبه نسبت $S/W = 0.73$ ، به وسیله میانگین وزنی Al_2O_3 موجود در هر لایه پروفیل خاک، استفاده کرد. Shtompel et al., (1998) دریافتند که نسبت S/W همبستگی مثبت با عرض جغرافیایی دارد، به طوری که هوا دیدگی شیمیایی بستر خاک در عرض های کمتر کامل تر از عرض های جغرافیایی بیشتر است.

تشکیل خاک ارتباط نزدیک با حجم خاک و آب از دست رفته در حوزه های آبخیز کوچک دارد. Alexander, (1988a,b) ادعا کرد که سرعت های واقعی تر تشکیل خاک از رسوبات تحکیم شده، یا مواد مادری بر اساس مطالعات بر روی حوزه آبخیز کوچک به دست می آید. با فرض این که حوزه آبخیز به عنوان یک سامانه قابل درک با انرژی ورودی، تبدیل شده، خروجی است، همان گونه که ماده در یک دوره زمانی پایدار است، میانگین سرعت تشکیل خاک در یک حوزه آبخیز به وسیله موازنه کاتیون های ورودی و خروجی می تواند تخمین زده شود. Alexander, (1988b)، رابطه خود را بر اساس رابطه ای که Langbein and Dawdy, (1964) جهت غلظت مواد محلول در آب رودخانه ارائه کرده بود، به دست آورد (رابطه ۹).

$$\frac{dC}{dt} = k(C_m - C) / C_m \quad (9)$$

که در آن، C غلظت واقعی و C_m بیشینه غلظت جامدات محلول، dC/dt سرعت انحلال مواد سنگی و یا نسبتاً سنگی و k یک ثابت است، با فرض این که مقدار C قابل صرفه نظر کردن و مقدار $t=0$ است (رابطه ۱۰).

$$\ln \left(1 - \frac{C}{C_m} \right) = - \frac{kt}{C_m} \quad (10)$$

مدت زمانی که آب در روی سطح و در نزدیک بستر سنگی و یا نیمه سنگی قرار می گیرد، وابسته به مقدار بارندگی، نفوذ و آبدوی دارد. از طرفی مقدار D از حاصل ضرب Q در C به دست می آید، در نتیجه $D = QC$ است (رابطه ۱۱).

$$D = m q (1 - e^{-h/Cm Q}) \quad (11)$$

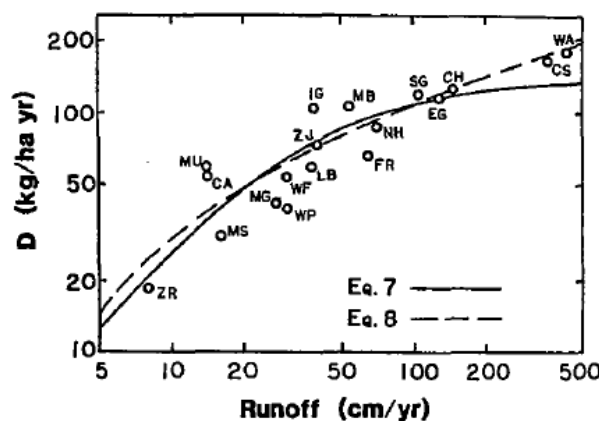
در نهایت، رابطه پیشگویی سرعت تشکیل خاک (S) بر اساس حجم آبدوی به صورت رابطه (۱۲) است.

¹ Ion flux

رابطه بین آبدوی و مقدار عنصر حل شده در آبدوی برای ۱۸ حوضه آبخیز کوچک در شکل ۳ آورده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، تا آبدوی ۲۰۰ سانتی‌متر در سال، رابطه D و Q خطی است (Alexander, 1988a,b). وقتی که S تعیین شود، مقدار T با در نظر گرفتن شرایط تشکیل خاک، ویژگی‌های محیط طبیعی و میزان حاصلخیزی تعیین می‌شود.

$$S = C_m Q (1 - e^{-h/C_m Q}) / (W/S - 1) \quad (12)$$

که در آن، C_m بیشینه غلظت جامدات حل شده، Q حجم آبدوی در زمان t ، k' یک ثابت است و W/S معکوس نسبت S/W است. مقدار C_m در یک حوضه آبخیز ثابت است و بستگی به مواد مادری، دما و مقدار CO_2 دارد. این رابطه، برای تخمین سرعت تشکیل خاک در مواد مادری غیرآهکی، قابل استفاده است.



شکل ۳- رابطه بین آبدوی و مقدار عنصر حل شده در آبدوی (Alexander, 1988a)

Fig. 3. Relationship between runoff and the amount of dissolved elements in runoff (Alexander, 1988a)

مطابق معیارهای فوق، خاک‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- گروه ۱- دارای محدودیت‌های شدید یا دارای لایه‌های دائمی محدودکننده رشد ریشه
- گروه ۲- دارای محدودیت‌های متوسط برای توسعه ریشه، یا دارای کاهش غیر دائمی حاصلخیزی در اقلیم مورد نظر
- گروه ۳- محدودیت‌ها در اقلیم مورد نظر قابل فائق آمدن هستند، به‌وسیله فرایندهای طبیعی و مدیریتی می‌توان به حاصلخیزی خاک‌های فرسایش نیافته دست یافت. بعد از تعیین گروه خاک، مقدار T برای یک خاک مشخص مطابق راهنمای عمومی تعیین می‌شود (جدول ۲).

USDA-NRCS با استفاده از این شیوه‌نامه، مقدار T را برای خاک‌های امریکا بر مبنای عمق خاک، میزان تشکیل خاک (میزان تجدید افق A)، فرسایش قبلی و حفظ ظرفیت تولید بین ۲/۱۱ تا ۵/۴ تن در هکتار در سال تعیین کرد.

Arabkhedri et al., (2016) با توسعه و بازنگری در شیوه‌نامه استاندارد (USDA-NRCS 1999)

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش

دستورالعمل USDA-NRCS: فرسایش قابل تحمل (T) به ویژگی‌های لایه محدود کننده رشد ریشه متناسب می‌شود (USDA-NRCS, 1999). USDA-NRCS در دهه ۱۹۹۹ بر این مبنا که یک لایه محدودکننده دلالت بر وجود موادی در بالای این لایه با ویژگی‌های مطلوب‌تر برای رشد گیاه است، مقدار T value را برای خاک‌های امریکا بر مبنای عمق خاک، فرسایش میزان تشکیل خاک (میزان تجدید افق A)، فرسایش قبلی و حفظ ظرفیت تولید تعیین کرد. با نزدیک شدن لایه محدود کننده و یا نامطلوب به سطح خاک، توانایی خاک برای حفظ حاصلخیزی از طریق فرایندهای طبیعی و مدیریتی کاهش می‌یابد. معیارهای تعیین T به شرح زیر است:

۱. شدت ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی لایه‌های زیرسطحی
۲. ویژگی‌های اقلیمی که رطوبت و دمای خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند.
۳. امکانات اقتصادی استفاده از اقدامات مدیریتی برای فائق آمدن بر لایه محدودکننده و یا شرایط موجود

فرسایش قابل تحمل در کشور را بین ۰/۲۵ تا یک تن در هکتار در سال تعیین کردند. آن‌ها توصیه کردند که این کمیت را در اراضی زراعی درجه طبقه ارزیابی یک و دو و نیز جنگل‌های زاگرس و هیرکانی این ارقام تا پنج برابر قابل افزایش است.

شیوه‌نامه‌ای را برای تعیین میزان فرسایش قابل تحمل در مراتع خشک و نیمه خشک ایران ارائه دادند. در این پژوهش، آن‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای شکل ظاهری و واحدهای فیزیوگرافی اراضی، نوع کاربری و نیز عمق خاک و وضعیت لایه محدود کننده زیرین، میزان

جدول ۲- راهنمای تعیین مقدار T (Li et al., 2009)

Table 2. Guidelines for determining tolerable soil loss (T) values (Li et al., 2009)

Depth to limiting layer (cm)	Group 1	Group 2	Group 3
	Annual soil loss tolerance (t.ha ⁻¹)		
0-25	2.5	2.5	7.5
25-50	2.5	5.0	7.5
50-100	5.0	7.5	10.0
100-150	7.5	10.0	10.0
>150	12.5	12.5	12.5

سرعت نفوذ، جرم مخصوص ظاهری خاک، خاکدانه‌های مقاوم در برابر آب، ماده آلی و وضعیت حاصلخیزی، برای ارزیابی کیفیت خاک که مقاومت خاک را در برابر فرسایش تعیین می‌کند، ایجاد کردند. آن‌ها پارامترهای خاک را به مقیاس صفر تا یک تبدیل کردند. سپس مقادیر نرمال شده پارامترهای خاک، با وزن‌های مربوطه (جدول ۳) که به‌وسیله اهمیت نسبی و تحلیل حساسیت تعیین شده بودند، ضرب کردند. خاک‌ها بر اساس امتیازات جمع شده در طبقه‌های ۱، ۲ و ۳ تقسیم‌بندی شدند (جدول ۴). پس از تعیین گروه خاک با استفاده از دستورالعمل (USDA-NRSC (1999) مقدار فرسایش قابل تحمل تعیین شد (جدول ۵).

محققانی همچون، Mandal et al., (2006)، Bhattacharyya et al., و Lakaria et al., (2010) (2008)، با تلفیق روش USDA-NRCS با روش شاخص باروری خاک یک مدل کمی برای خلاصه کردن عملکرد کلی خاک‌ها و تقسیم کردن آن‌ها به گروه‌های مختلف ایجاد کردند و سپس این دستورالعمل‌ها برای تنظیم مقدار T در شمال هیمالایا و هند استفاده شد. تحقیقات مختلف، ویژگی‌های متفاوتی از خاک و محیط را برای تعیین مقدار T پیشنهاد کردند (Bork Renschler، Lal, 1998 and Frienlinghaus, 1997 and Harbor, 2002). Bhattacharyya et al., (2008). یک مدل کمی، با استفاده از شاخص‌های خاک از قبیل

جدول ۳- وزن‌های مربوطه برای شاخص‌های خاک (Li et al., 2009)

Table 3. Relevant weights for soil indicators (Li et al., 2009)

Functions	Indicators	Weights
Accommodate water entry	Final infiltration rate	0.35
Water transport and retention	Bulk density	0.10
Resist physical degradation	Water Stable Aggregates	0.25
Resist bio-chemical degradation	Organic Carbon (O.C)	0.15
	Fertility status	0.15
Sustain plant growth	N	0.05
	P	0.05
	K	0.05
Total score		1.00

جدول ۴- طبقه بندی خاک به‌وسیله امتیازات جمع شده

Table 4. Soil classification based on accumulated scores

Aggregated Score (Q)	Soil group
0 to 0.33	Group 1
0.34 to 0.66	Group 2
> 0.66	Group 3

(جزئیات بیشتر در مقاله Ghafari et al., (2016) آمده است).

پس از تعیین شاخص باروری خاک، آسیب‌پذیری خاک^۳ که نرخ تغییر باروری خاک (ΔPI) به ازای کمیت فرسایش (d) است، به صورت تجربی تعیین می‌شود. برای این کار، با رسم مقادیر مختلف شاخص باروری خاک در برابر میزان خاک فرسایش یافته (بر حسب عمق)، یک رابطه ریاضی به دست می‌آید که نرخ یا ضریب آسیب‌پذیری خاک در برابر فرسایش را نشان می‌دهد (Duan et al., 2012؛ Ghafari et al., 2016) با داشتن شاخص باروری و ضریب آسیب‌پذیری خاک، مقدار فرسایش قابل تحمل از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است (Ghafari et al., 2016).

Duan et al., (2017) با تلفیق روش Skidmore (1982)، با روش شاخص باروری خاک، روش جدیدی برای تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه کردند. در این روش، عمق خاک (z) در رابطه اسکیدمور با شاخص باروری خاک (PI) جایگزین شد و رابطه مربوطه به شکل زیر تغییر کرد.

$$T_{(x,y,t)} = \frac{(T1+T2)}{2} - \frac{(T2-T1)}{2} \times \cos \left[\pi \frac{(PI-PI_1)}{(PI_2-PI_1)} \right] \quad (15)$$

که در آن، $T(x, y, t)$ مقدار فرسایش قابل تحمل در نقطه (x, y) در زمان t ، $T1$ آستانه پایین فرسایش قابل تحمل (برابر با $2/5$ تن در هکتار در سال)، $T2$ آستانه بالای فرسایش قابل تحمل (برابر با $11/8$ تن در هکتار در سال)، PI باروری خاک در حالت موجود، PI_1 سطح بحرانی باروری خاک و PI_2 سطح بهینه باروری خاک ($PI=1$) است (Duan et al., 2017).

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش پیشنهادی Di Stefano et al., (2023): بر اساس نظر Toy et al., (2002)، مفهوم فرسایش خاک قابل تحمل یک ابزار مفید برای برنامه‌ریزی حفاظت است که در آن عناصر فنی و غیرفنی با هم ترکیب شده و با یک عدد واحد بیان می‌شوند. Wischmeier and Smith, (1978) پیشنهاد کردند که از معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) به همراه مقدار TSL (تن در هکتار در سال) برای ایجاد استراتژی‌های حفاظت خاک یا طراحی اقدامات استفاده شود.

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش شاخص توان تولید خاک^۱: اساس روش توان تولید یا توان باروری برای تعیین T به عنوان تلفات خاک مترادف یک کاهش قابل تحمل در حاصلخیزی خاک (Δ) در افق مورد نظر است. رابطه محاسبه T (Pierce et al., 1984) به صورت رابطه (۱۳) است.

$$T = (\Delta \cdot SP_{0,\chi}) / (V \cdot t) \quad (13)$$

که در آن، T فرسایش قابل تحمل (تن بر هکتار در سال)، SP شاخص توان تولید نرمال شده در محدوده صفر و یک است. اندیس t و 0 بیان کننده SP در شرایط موجود و در زمان t است. χ جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب ضرب در 100)، V 100 برابر شیب منحنی SP در برابر عمق خاک حذف شده (سانتی متر)، که عمق خاک حذف شده بین صفر و 50 سانتی متر تعریف می‌شود.

ارتباط بین خاک فرسایش یافته و باروری خاک (SP) می‌تواند به وسیله مدل EPIC^۲ تعیین شود که برای شبیه‌سازی فرسایش واقعی و رشد گیاه می‌تواند استفاده شود (Williams et al., 1984). بنابراین، SP می‌تواند به وسیله این مدل برای یک خاک مشخص در شرایط مختلف فرسایش تعیین شود. پس از تعیین مقدار SP ، مقدار T می‌تواند به وسیله رابطه (۱۱) تعیین شود.

در روش دیگری شاخص باروری خاک به صورت تابعی از ویژگی‌های خاک قابل برآورد است (Pierce et al., 1984). نقش هر کدام از این ویژگی‌ها در تولید محصول، با استفاده از روش‌های امتیازدهی کارشناسی و نیز روش‌هایی نظیر فازی بین یک و صفر نرمال‌سازی می‌شوند. مجموع حاصل ضرب امتیازها برای هر لایه، باروری آن لایه را مشخص می‌کند، و در نهایت جمع جبری امتیازهای لایه‌های مختلف، باروری کل خاک است (رابطه ۱۴). (Duan et al., 2012).

$$PI = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot B_i \cdot C_i \cdot O_i \cdot K_i) \quad (14)$$

که در آن، A عامل شرایط رطوبتی یا تهویه‌ای، B عامل وضعیت مقاومت خاک در برابر رشد ریشه، C عامل بافت خاک، O عامل وضعیت حاصلخیزی بالقوه خاک و K عامل اهمیت نسبی هر افق را بیان می‌کند

³ Soil vulnerability

¹ Productivity index

² Erosion productivity impact calculator

فرسایش خاک رخ می‌دهد یا نیاز به استراتژی‌های حفاظت از خاک دارند، استفاده شده است.

$$TSL/RKS = LCP \quad (۱۶)$$

که در آن، R ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ year^{-1}$) مقدار میانگین سالانه عامل فرسایش بارش، K ($t\ ha^{-1}$) به ازای هر واحد R عامل فرسایش‌پذیری خاک، S عامل شیب، L عامل طول شیب، C عامل پوشش و مدیریت و P عامل اقدامات حمایتی است. رابطه (۱۶) بیان می‌کند که عوامل L ، C و P می‌توانند تغییر کنند تا میزان فرسایش خاک برابر با مقدار TSL شود (Di Stefano et al., 2023).

روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل-روش‌های

پیشنهادی (Macedo et al., 2023): پیشرفت روزافزون فناوری در کشاورزی که از طریق معرفی ماشین‌آلات، کودها، ارقام جدید و گسترش اراضی کشاورزی تأیید شده است، به‌طورکلی باعث افزایش میانگین بازده محصولات به‌دلیل مدیریت منطقی سامانه خاک-اقلیم-گیاه شده است. با این حال، وقتی که خاک بدون اتخاذ روش‌های حفاظتی مدیریت می‌شود، عدم تعادل و ناپایداری رخ می‌دهد که مشکلات جدی مانند بیابان‌زایی، شوری، فرسایش خاک و غیره را به وجود می‌آورد. (Macedo et al., 2023) در پژوهشی، با هدف تعیین فرسایش قابل تحمل خاک به علت فرسایش در برزیل انجام شد. سه روش برای تعیین فرسایش قابل تحمل خاک در این پژوهش استفاده شده است که ویژگی‌های عمق مؤثر (h)، نسبت بافت (r)، نسبت بافت و محتوای رس در افق A ، مواد آلی و نفوذپذیری، در آن‌ها به کار برده شده است.

روش اول که به‌وسیله Lombardi Neto and Bertoni, (1975) پیشنهاد شده است؛ روش دوم، یک اصلاح از روش اول به‌وسیله Bertol and Almeida, (2000) و روش سوم، یک اصلاح از روش به‌وسیله Galindo and Margolis, (1989) بوده است. عمق مؤثر خاک و رابطه بافتی بین افق‌های B و A ، مطابق با معیارهای تعیین شده به‌وسیله Lombardi Neto and Bertoni, (1975)، به‌عنوان متغیرهای مهم در برآورد فرسایش قابل تحمل خاک به دلیل فرسایش آبی استفاده شدند. رابطه (۱۷) روش اول را نشان می‌دهد.

$$T = h * r * 1000^{-1} \quad (۱۷)$$

(Di Stefano et al., 2023) در این روش بیان کرده است که رویدادهای اخیر در اروپا نشان داده‌اند که حفاظت از مناظر اغلب ناکافی است و مداخلات برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از ناپایداری زمین‌شناسی اندک است. تعیین مقدار "فرسایش خاک قابل تحمل" (TSL) برای تعیین یک استاندارد کمی برای اندازه‌گیری اثربخشی استراتژی‌ها و فناوری‌های کنترل فرسایش خاک مفید است. با این حال، استراتژی‌ها و اقدامات حفاظت خاک که بر اساس مقدار متوسط سالانه متغیرهای اقلیمی مانند عامل فرسایش باران R طراحی شده‌اند، برای برخی رویدادهای فرسایشی که مقادیر رسوب غیرقابل تحمل تولید می‌کنند، مناسب نیستند. بنابراین، پذیرش یک TSL مناسب که می‌تواند به تضمین حفاظت از عملکردهای خاک و استفاده پایدار از خاک کمک کند، باید هدف اصلی سیاست‌گذاران باشد.

در این پژوهش (Di Stefano et al., 2023)، یک روش جدید برای تعریف فرسایش خاک قابل تحمل پیشنهاد کرده است. این رویکرد بر اساس تجزیه و تحلیل آماری مقادیر سالانه اندازه‌گیری شده شاخص فرسایش‌پذیری R ، است و به تعیین عامل پوشش و مدیریت منجر می‌شود که در آن بیشینه فرسایش خاک قابل تحمل برابر با فرسایش سالانه خاک در یک دوره بازگشت معین است. تحلیل نشان داد که برای محدود کردن فرسایش خاک به مقدار قابل تحمل، می‌توان مداخلاتی برای تغییر کاربری زمین، کاهش طول مزرعه یا اعمال اقدامات حمایتی انجام داد.

در این پژوهش، یک روش جدید برای برآورد تحمل فرسایش خاک در مقیاس منطقه‌ای پیشنهاد شده است. یک روش برای تعریف یک مقدار هدف از عامل محصول و مدیریت معادله جهانی فرسایش خاک ($USLE$) که مطابق با شرایط قابل تحمل باشد، ارائه شده است. این روش پیشنهادی برای منطقه سیسیل (جنوب ایتالیا) برای دو کاربری مهم زمین (زمین‌های زراعی، یعنی عمدتاً غلات و حبوبات، و تاکستان‌ها) اعمال شده است. هم‌پوشانی بین نقشه کاربری زمین و توزیع مکانی مقدار هدف عامل محصول و مدیریت که از نقشه هم‌بارش به‌دست آمده، برای تعریف مناطقی که شرایط تحمل

یک دوره طولانی کاهش نیابد (حفظ باروری زراعی به‌عنوان هدف اولیه). مبنای تعیین T2 فهم رابطه بین فرسایش و باروری خاک است و T3، بیشینه مقدار تلفات خاک که اثری در تخریب محیط‌های زیست آبی نداشته باشد (شالیزارهای، مخازن آب، رودخانه‌ها، چاه‌های آب و غیره). حد مجاز نهاده‌های کود و آفت‌کش‌ها و حد قابل تحمل خاکورزی، آبیاری، و عملیات زراعی نیز در این تعریف می‌گنجد. T1 و T2 برای سطح دامنه و T3 برای سطح کل حوضه که رسوب از آن به سامانه آبی منتقل، تعریف می‌شود. برای تعیین T2 رابطه بین تغییرات کیفی خاک و فرسایش خاک و همچنین رابطه بین متغیرهای کیفی خاک و تولید محصول باید مشخص شود. در نهایت، با داشتن میزان قابل قبول از کاهش تولید محصول می‌توان به فرسایش قابل تحمل T2 رسید. در تعیین T3 کلیه منابع و عوامل فرسایش در سطح حوضه باید در نظر گرفته شود و باید مشخص شود، هدف از حفاظت چه چیزی است (جریان سطحی رودخانه یا مثلاً حفاظت از یک گونه خاص و غیره).

از روش رادیوایزوتوپ‌های کیهانی نیز در برخی پژوهش‌ها به‌منظور تعیین نرخ خاک‌سازی و در نهایت مشخص کردن فرسایش قابل تحمل خاک استفاده می‌شود. یکی از این ایزوتوپ‌ها، ایزوتوپ بریلیم-۱۰ (Be-10) است که از طریق برخورد پرتوهای با انرژی بالای کیهانی با اکسیژن و نیتروژن در جو (منشاء جوی) و همچنین با کوارتز در سطح زمین (در محل) تولید می‌شود (Darvill, 2013; Willenbring and Blau, 2010).

(Lal, 1991)، میزان تولید رادیونوکلوئیدهای کیهانی تولید شده در محل را در شرایط مختلف ارتفاع، عرض جغرافیایی، خصوصیات تشعشعات و وجود محافظ^۱ را به خوبی شرح داده است. در دهه‌های اخیر، Be-10 در محل تولید شده برای اندازه‌گیری میزان فرسایش در سطوح در معرض تشعشعات کیهانی (Nishiizumi et al., 1989)، برای کل حوضه (Granger et al., 1996; von Blanckenburg, Bierman and Steig, 1996; Small et al., 2005)، سرعت تشکیل خاک (Heimsath et al., 2001; Minasny and McBratney, 2001)

که در آن، T فرسایش قابل تحمل خاک (میلی‌متر در سال)، h عمق مؤثر خاک (میلی‌متر) که به ۱۰۰۰ میلی‌متر محدود شده است، r خارج قسمتی که اثر رابطه بافتی بین افق‌های B و A را بر وزن‌دهی از تلفات خاک بیان می‌کند (گرم بر کیلوگرم) و ۱۰۰۰، ثابتی که دوره زمانی لازم برای فرسایش یک لایه خاک به ضخامت ۱۰۰۰ میلی‌متر را بدون در نظر گرفتن تشکیل خاک در طول این دوره بیان می‌کند.

$$T = h * r_a * 1000^{-1} \quad (18)$$

که در آن، T فرسایش قابل تحمل خاک (میلی‌متر در سال)، h عمق مؤثر خاک (میلی‌متر) که به ۱۰۰۰ میلی‌متر محدود شده است، r_a نسبتی که به‌طور مشترک اثر رابطه بافتی بین افق‌های B و A و محتوی رس افق A را بیان می‌کند و ۱۰۰۰ ثابتی که دوره زمانی لازم برای فرسایش یک لایه خاک به ضخامت ۱۰۰۰ میلی‌متر را بدون در نظر گرفتن تشکیل خاک در طول این دوره بیان می‌کند.

$$T = h * r_a * m * p * 1000^{-1} \quad (19)$$

که در آن، T، h، r_a و ۱۰۰۰، همان تعاریف موجود در روش‌های اول و دوم و m عاملی که اثر ماده آلی در لایه صفر تا ۲۰ سانتی‌متری را بیان می‌کند و p عاملی که اثر نفوذپذیری خاک را بیان می‌کند.

برخی کوشش‌های دیگر در محاسبه عامل T:

(Dwan et al., 2012)، از روش تعیین شاخص باروری خاک به کمک توابع فازی و با در نظر گرفتن چهار شاخص کیفی مقدار آب قابل استفاده، درصد رس، ماده آلی و pH کمیت و نقشه تغییرات فرسایش قابل تحمل را تعیین کردند. (Sudnshiri et al., 2014)، با شیوه‌نامه مشابه ولی با استفاده از شاخص‌های کیفی هدایت هیدرولیکی اشباع، فرسایش پذیری، درصد کربن آلی، و مقادیر NPK کمیت و تغییرات T را تعیین و ترسیم کردند. (Chandal and Hadda, 2016) از نتایج تحلیل حساسیت ورودی‌های مدل WEPP برای تعیین شاخص‌های مؤثر در تعیین T استفاده کردند.

(Li et al., 2009)، رهیافتی سه سطحی از Tvalue ارائه کردند که شامل T1، تلفات خاک معادل یا کمتر از میزان تشکیل خاک (انعکاسی از تجدیدپذیری خاک) T2، بیشینه تلفات خاک است که باروری خاک برای

¹ Shielding

نتایج محاسبه شده برای مقدار T مشخص شود. روش‌های تعیین مقدار T پایدار نیستند، و برای یک خاک مقادیر متفاوت T به‌وسیله روش‌های مختلف محاسبه می‌شوند (Li et al., 1999). برای مثال، مقدار T در اراضی لسی در چین با روش عمق پروفیل برابر با ۰/۸۳۳ میلی‌متر در سال و با رابطه Barth (سرعت تشکیل خاک) مقدار آن ۰/۰۷۸ میلی‌متر بر سال، محاسبه شد (Li et al., 2005). به‌علاوه، هر روش معایب مخصوص به خود را دارد:

۱. در روش عمق پروفیل، خاک ضخیم‌تر دارای مقدار T بیشتر است. در حقیقت سرعت هوادهی سنگ بستر در خاک‌های عمیق‌تر نسبتاً کندتر است و بنابراین مقادیر محاسبه شده معمولاً عکس رابطه Barth است.

۲. روش سرعت تشکیل خاک (رابطه Barth): مقدار T، بستگی به مقدار عنصر ژئوشیمیایی، به ویژه به مقدار عناصر متحرک در آبدوی دارد. این روش نیازمند اندازه‌گیری عناصر مختلف، متحرک و غیرمتحرک در سنگ بستر و خاک است.

از آنجایی که حجم آبدوی به‌طور عمده در سال‌های مختلف متفاوت هستند و مقدار عناصر در آبدوی با زمان تغییر می‌کند، بنابراین نیاز به برآورد بلندمدت از ورودی آتمسفر به حوزه آبخیز، اطلاعات هیدرولوژیکی و شرایط هیدرو-شیمیایی آبدوی سطحی است. به‌علت این محدودیت‌ها در اندازه‌گیری، قابلیت اعتماد این روش کاهش یافته است.

رابطه Barth برای ارزیابی چرخه جهانی عناصر در مقیاس زمانی زمین‌شناسی، بدون در نظر گرفتن جذب عناصر به‌وسیله توده زنده، استفاده شده است. Velbel (1989) مشخص نمود که سرعت تشکیل خاک محاسبه شده با رابطه Barth بسیار اندک است.

۳. دستورالعمل USDA-NRCS و شاخص حاصلخیزی: مقدار T عموماً به ویژگی‌های خاک مرتبط می‌شود. بنابراین، برای تعیین T، بایستی پارامترهای زیادی ارزیابی شود که مستلزم صرف وقت و نیروی انسانی است. به‌علاوه سرعت تشکیل خاک در این روش‌ها مورد توجه قرار نگرفته است، که یک عامل کلیدی در تعیین مقدار T است.

مثال‌هایی از مقادیر توصیه شده T: در بیشتر تحقیقات صورت گرفته از ضخامت پروفیل خاک و

2001, 2002) و برای بهبود فناوری‌های تعیین سن سطوح در معرض تشعشات برای دوره زمانی ۱۰۲ تا ۱۰۷ استفاده شده است (Gosse and Phillips, 2001; Cockburn and Summerfield, 2004).

همچنین، (Merchel et al., 2010)، امکان استفاده از رادیونوکلوئیدهای کیهانی تولید شده در محل، از جمله ^{41}Ca و ^{10}Be ، ^{26}Al و ^{36}Cl را برای سن سنجی سنگ‌های آهکی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که ^{26}Al به راحتی می‌تواند برای این منظور در کلسیت استفاده شود. هرچند مطالعات معدودی از کاربرد ^{10}Be و ^{26}Al تولید شده در محل در ایران وجود دارد (به‌عنوان مثال Shabanian et al., 2009; Le Dortz et al., 2009, 2012)، گزارشی از استفاده از رادیونوکلوئیدهای کیهانی تولید شده در محل در محیط‌های آهکی ایران، که مناطق وسیعی از کشور را می‌پوشانند، وجود ندارد. به‌طور کلی رادیونوکلوئیدهای کیهانی تولید شده در محل، ابزارهای مفیدی برای تعیین میزان تشکیل خاک، به ویژه در سنگ‌های آهکی که مناطق وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران را تشکیل می‌دهند، هستند.

علاوه بر ایزوتوپ ^{10}Be ، در پژوهش‌های دیگر از سنجش و اندازه‌گیری ایزوتوپ ^{26}Al و ^{36}Cl نیز استفاده می‌شود (Willenbring and Blanckenburg, 2010; Darvill, 2013). برای اندازه‌گیری، نمونه‌هایی از تخته‌سنگ‌های بدون درز و همچنین مرز سنگ بستر و خاک در محیط‌های سیلیسی و آهکی جمع‌آوری می‌شوند. جداسازی رادیوشیمیایی را می‌توان به روش (Merchel and Herpers, 1999) و روش (Merchel et al., 2010)، برای رسیدن به حدود یک میلی‌گرم BeO و یا Al_2O_3 انجام داد. نسبت رادیونوکلوئید به ایزوتوپ پایدار به‌وسیله شتاب دهنده طیف‌سنج جرمی (AMS) تعیین می‌شود.

عموماً دو مدل برای محاسبه میزان تشکیل خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند: (I) مدل شرایط پایدار با ضخامت خاک، تشکیل خاک و مقدار فرسایش ثابت؛ و (II) مدلی که در آن فرسایش با شرایط پایدار با یک دوره فرسایش تشدید دینال می‌شود.

معایب روش‌های موجود محاسبه عامل T: معایب روش‌های موجود محاسبه عامل T می‌تواند به‌وسیله

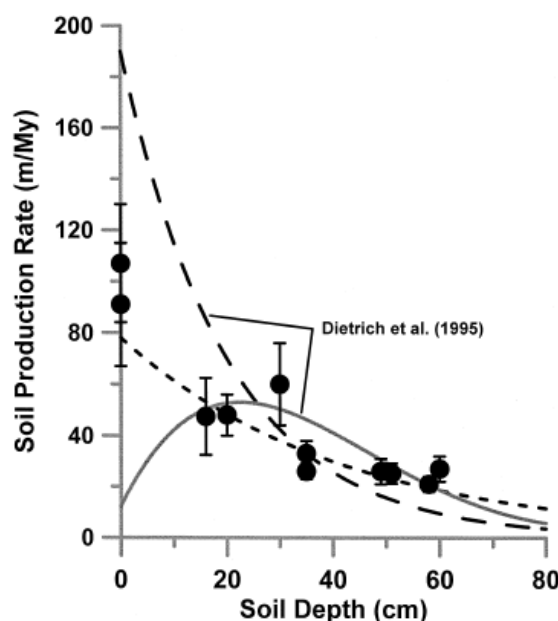
$$TL = [(Ra/Rm \times 100 \times B \times Dt) + 3t] / t \quad (20)$$

که در آن، TL مقدار فرسایش قابل تحمل (تن در هکتار در سال)، Ra کاهش عملکرد و تولید قابل قبول (درصد)، Rm کاهش عملکرد (درصد) در سطح پیش‌بینی شده پس از تلف شدن کلیه خاک سطحی، B جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مربع)، Dt عمق خاک سطحی (سانتی‌متر) و t زمان لازم و قابل قبول در جهت کاهش عملکرد (سال) است.

Heimsath et al., (1999) برای تعیین سرعت تشکیل خاک از اندازه‌گیری رادیونوکلوئیدهای کیهانی در سنگ بستر، در ایالات متحده آمریکا و در شمال کالیفرنیا، استفاده کردند. آن‌ها سرعت تولید رادیونوکلوئیدهای Be^{10} (با نیمه‌عمر 1.0×10^6 سال) و Al^{26} (با نیمه‌عمر 1.0×10^5 سال)، از سنگ بستر و عنصر کوارتز اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که سرعت تشکیل خاک به‌طور نمایی با ضخامت خاک، از 0.77 میلی‌متر در سال در خاک بسیار کم عمق به 0.077 میلی‌متر در سال برای خاکی با عمق کمتر از یک متر، کاهش می‌یابد. Dietrich, (1995) تابع تولید خاک را یک تابع کمانی شکل دانست. نتایج این پژوهش تابع کمانی تولید خاک را رد نمی‌کند، لیکن شواهد یک تابع نمایی ساده برای تولید خاک را نشان می‌دهند (شکل ۴).

سرعت تشکیل خاک، برای محاسبه T استفاده شده است. در دهه ۱۹۴۰، Smith and Whitt, (1948)، مقدار T را در خاک‌های Shelby و Marshall به‌ترتیب 0.333 و 0.250 میلی‌متر در سال تعیین کردند. عامل T در سال ۱۹۷۳، پس از تردیدهای بسیار در ضخامت خاک و ظرفیت تجدید دوباره خاک تعریف شد. مقدار 0.417 میلی‌متر در سال با دامنه 0.183 تا 0.933 هنوز در آمریکا استفاده می‌شود (Johnson, 1987).

در سال ۱۹۹۵، USDA مقدار T را برای خاک‌های مختلف آمریکا بر اساس عمق خاک و ویژگی‌های لایه بحرانی خاک تعریف نمود و محدوده فرسایش قابل تحمل را بین $2/5$ تا $12/5$ تن در هکتار در سال پیشنهاد نمود. فرسایش قابل تحمل بایستی به‌صورت کمی بر اساس عواملی که حاصلخیزی طولانی مدت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، ارزیابی شود. بر اهداف عملی، فرسایش قابل تحمل می‌تواند بر اساس عمق ریشه تخمین زده شود (McCormack et al., 1982). میانگین تلفات خاک پنج تن در هکتار در سال برای خاک‌های کم عمق تعیین شده است (Hudson, 1986). Lal (1985) فرسایش قابل تحمل برای خاک‌های کم عمق را یک تن در هکتار در سال تعیین نموده است. Rose (1993)، مقدار فرسایش قابل تحمل برحسب کاهش عملکرد را با رابطه (۲۰) تعیین نمود.



شکل ۴- سرعت تشکیل خاک در عمق‌های مختلف خاک (Gabet and Mudd, 2010)

Fig. 4. Soil formation rate at different soil depths (Gabet and Mudd, 2010)

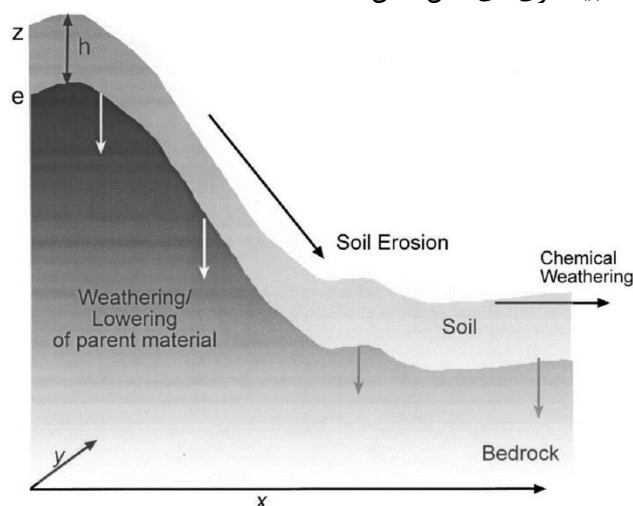
داد سرعت هوازدگی فیزیکی سنگ بستر به صورت نمایی با افزایش ضخامت خاک کاهش می‌یابد (شکل ۶). هوازدگی شیمیایی به صورت تابع نمایی منفی^۱ با افزایش ضخامت خاک و زمان کاهش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی تشکیل خاک در چشم‌انداز، بعد از ۱۰۰۰۰ سال نشان داد که در پای شیب خاک عمیق‌تر و در بالای شیب خاک کم عمیق‌تر می‌شود (شکل ۷) و خاک از بالای شیب به طرف پایین حرکت می‌کند. ضخامت خاک همبستگی زیادی با شکل زمین دارد. اثرات اقلیم، نوع سنگ بستر و مدیریت خاک به وسیله سرعت تشکیل خاک و جابه جایی آن به وسیله فرسایش نشان داده می‌شود. آن‌ها اظهار کردند که عمق خاک در هر نقطه بستگی به سرعت هوازدگی فیزیکی و شیمیایی و فرایند فرسایش و رسوب دارد. آن‌ها مقدار هوازدگی فیزیکی مواد مادری را ناچیز دانستند و عامل اصلی تشکیل خاک را هوازدگی شیمیایی معرفی کردند.

مقدار T پیشنهاد شده در بسیاری از کشورها تقریبی بوده، نمی‌تواند در خاک‌های کشاورزی مختلف و کاربری‌های متفاوت استفاده شود. بنابراین، مطالعات بیشتر برای تعیین مقدار T در مناطق مختلف به طور علمی برای حفظ حاصلخیزی خاک و محیط زیست، ضروری است.

اخیراً مقدار T (Mandal et al., 2006) را در شمال هیمالیا در هند در محدوده بین ۰/۴۱۶ تا ۱/۰۴۰ میلی‌متر در سال (۵۰۰ تا ۱۲۵۰ تن در کیلومتر مربع در سال) و برای بخش‌های مرکزی هند بین ۰/۲۰۸ تا ۱/۰۴۰ میلی‌متر بر سال (Lakaria et al., 2008) تعیین شده است. استانداردهای آمریکایی در کتاب "The soil erosion type and intensity grading standard" مربوط به سال ۱۹۹۷، مقدار T را با توجه به عمق خاک برای فلات‌های لسی ۰/۸۳۳ میلی‌متر بر سال، برای مناطق تپه ماهوری و صخره‌ای با خاک سیاه، ۰/۴۱۷ میلی‌متر بر سال و برای مناطق تپه ماهوری و صخره‌ای با خاک قرمز، ۰/۴۱۷ میلی‌متر بر سال پیشنهاد کرده است. مطالعات اخیر بر روی مقدار T در شیب‌های شخم خورده با مشکلات جدی تلفات خاک و آب صورت گرفته است. گرچه برخی گزارشات در ارتباط با جنگل و مرتع یافت می‌شود، لیکن استفاده از مقدار T پیشنهاد شده به وسیله آن‌ها، به دلیل فقدان اطلاعات مشکل است.

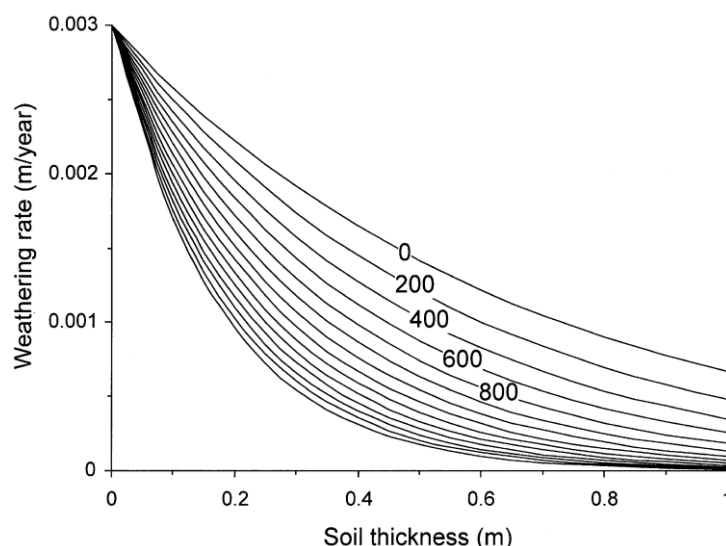
Minasny and McBratney, (2001) یک مدل ساده دو بعدی برای تشکیل خاک بر روی چشم‌انداز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) ایجاد کردند. مدل ضخامت خاک در طول زمان را بر اساس سرعت هوازدگی فیزیکی و شیمیایی سنگ بستر و فرایند فرسایش و رسوب تخمین می‌زند. شکل شماتیک مدل در شکل ۵ آورده شده است. شبیه‌سازی‌های مدل نشان



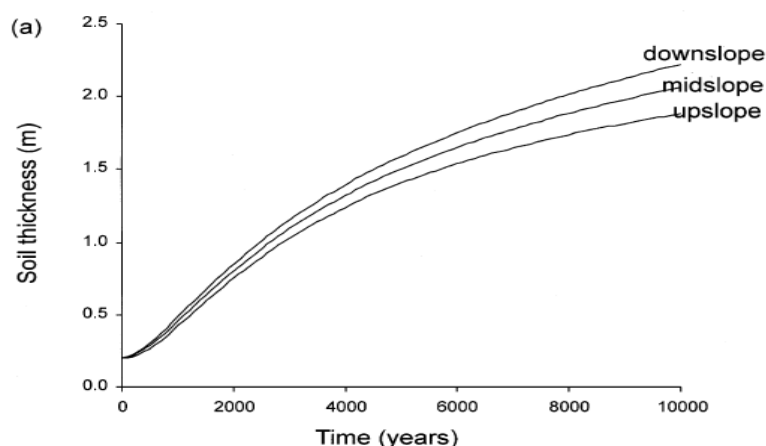
شکل ۵- شکل شماتیک مدل تشکیل خاک (Wesley, 2009)

Fig. 5. Schematic model of soil formation (Wesley, 2009)

¹ Negative exponential function



شکل ۶- سرعت هوازدگی در ضخامت‌های مختلف خاک (اعداد نوشته شده بر روی نمودارها زمان بر حسب سال است) (Wesley, 2009)
Fig. 6. Weathering rate at different soil thicknesses (numbers on the graphs represent time in years) (Wesley, 2009)



شکل ۷- تغییرات ضخامت خاک در طول زمان در قسمت‌های مختلف شیب (Wesley, 2009)
Fig. 7. Changes in soil thickness over time at different positions along the slope (Wesley, 2009)

روش‌های هیدرولوژیکی (Bennett and Rhoton, 2016)، اندازه‌گیری رسوبات در آبراهه‌ها (Rango and Shalaby, 1999)، روش‌های بیولوژیکی (تغییرات پوشش گیاهی) هستند. برای اندازه‌گیری فرسایش مجاز بیرون عرصه، ترکیبی از روش‌های میدانی، مدل‌های ریاضی، تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی به کار گرفته می‌شود. انتخاب روش مناسب به ویژگی‌های منطقه بستگی دارد. با اندازه‌گیری دقیق فرسایش، می‌توان از آسیب‌های احتمالی به محیط زیست و منابع خاک جلوگیری کرد و اقدامات حفاظتی مناسب را به کار گرفت.

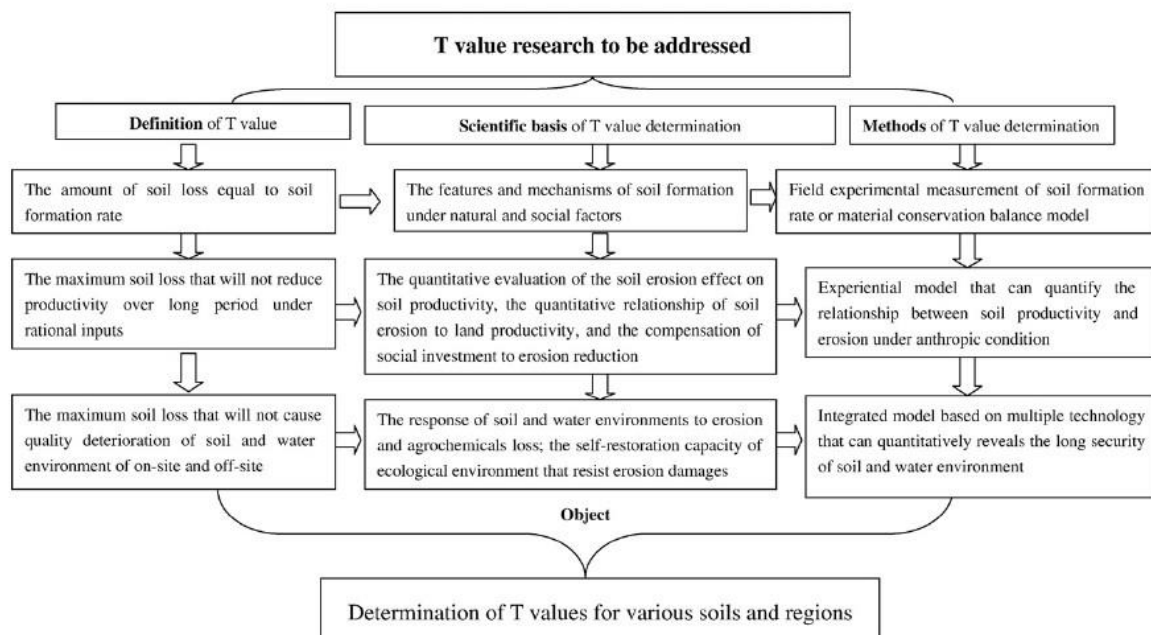
تحقیقات آینده عامل T: Nearing, (2002) اظهار کرد که مقادیر T تعیین شده برای خاک‌های آمریکا و جهان کافی نیست. در این ارتباط دو دلیل ارائه شده بود: شواهد علمی بسیار ضعیف بوده و منسوخ (قدیمی)

فرسایش مجاز بیرون عرصه: فرسایش مجاز بیرون عرصه، میزان فرسایشی است که در خارج از محدوده وقوع فرسایش رخ می‌دهد اما هنوز در حد قابل قبول و بدون تأثیرات مخرب شدید باقی می‌ماند. تعیین این حد مجاز، به عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های جغرافیایی بستگی دارد. مدیریت صحیح و استفاده از روش‌های علمی برای کاهش فرسایش بیرون عرصه، نقش مهمی در حفظ تعادل اکولوژیکی و کاهش خسارت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی دارد (Morgan, 2005).

چند روش متداول برای اندازه‌گیری فرسایش مجاز بیرون عرصه وجود دارد که شامل روش میدانی (به‌طور مثال پین فرسایشی)، مدل‌های ریاضی و کامپیوتری (مدل SWAT) (Toy et al., 2002)، روش‌های ژئومورفولوژیکی (اندازه‌گیری نهشته‌های رسوبی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای)

به صورت علمی تر نیاز است. بر اساس دانش امروز، به ضرورت تحقیقات بیشتر بر روی مقدار T پی برده شده است. (Li et al., 2009) سه معیار را برای تعیین مقدار T پیشنهاد کرده اند (به عنوان T_1 ، T_2 و T_3). تعاریف و تحقیقات مورد نیاز به شرح شکل ۸ است.

شده است و مسائل اقتصادی، محیط زیستی، و اجتماعی تغییر کرده است. اخیرا (Bazzoffi, 2009)، اشاره کرد که مفهوم مقدار T بر اساس حاصلخیزی خاک و سرعت تشکیل خاک کافی نیست و بایستی اثرات برون منطقه‌ای^۱ فرسایش نیز در نظر گرفته شود. بنابراین، به تحقیقات آینده برای تعیین فرسایش قابل تحمل



شکل ۸- ایده‌ها و ضروریات تحقیقات فرسایش قابل تحمل خاک در آینده (Li et al., 2009)

Fig. 8. Ideas and research priorities for future studies on tolerable soil erosion (Li et al., 2009)

خاکی به عمق ۶۰ سانتی‌متر در کشور چین، دارای سرعت هوادیدگی ۱/۰ میلی‌متر در سال است که به طور قابل ملاحظه‌ای دارای سرعت تشکیل بالاتر از سایر خاک‌ها است.

این خاک‌ها به دلیل سرعت تشکیل بیشتر، بایستی ماده آزمایشی ایده آلی برای تحقیقات فرسایش قابل تحمل باشند. به طور همزمان روش‌های دیگر برای تخمین سرعت تشکیل خاک، برای یافتن شیوه‌های مناسب‌تر برای تعیین فرسایش قابل تحمل در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی، بایستی بررسی شود. به وسیله این روش‌ها مقدار T برای خاک ذکر شده بین ۰/۵ تا یک میلی‌متر بر سال تخمین زده می‌شود (Liu et al., 2009).

مقدار T_1 ، مقدار فرسایش قابل تحمل برابر با سرعت تشکیل خاک است، و قابلیت تجدید خاک را در نظر می‌گیرد. سرعت تشکیل خاک بایستی به عنوان اولین عامل تعیین مقدار T برای هر خاکی در نظر گرفته شود. مقدار T اندازه‌ای از تلفات خاک است که کمتر و یا برابر سرعت تشکیل خاک باشد. بنابراین، مطالعات آینده بایستی شامل تعیین سرعت تشکیل خاک و روش‌های اندازه‌گیری آن باشد. اگرچه مقدار T می‌تواند به وسیله روش‌های ذکر شده تخمین زده شود، لیکن فاقد صحت کافی است. بنابراین اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت تشکیل خاک بسیار مهم هستند. عموماً سرعت تشکیل خاک بسیار کند بوده، اندازه‌گیری مزرعه‌ای را غیرممکن می‌سازد. در هر صورت، خاک‌های سنگی^۲ از قبیل رگوسول‌های^۳ به وجود آمده از سنگ‌های رسوبی در زیر

³ Regosols

¹ off-site

² Lithologic

می‌شود. این حدود قابل قبول شامل مقادیر قابل تحمل و روش‌های کاربرد نهاده‌های کشاورزی (مانند کودها و آفت‌کش‌ها)، و حدود قابل تحمل کشت و آبیاری هستند.

در واقع یک مقدار T_3 با عامل‌های ذکر شده ممکن است اساس ارزیابی صحیح تلفیق فعالیت‌های بشر با محیط زیست، و معیار علمی برای مدیریت خاک و گیاه، کاربری اراضی، و سایر فعالیت‌های بشر باشد. با این تعریف، در ابتدا باید فرایندها و ساز و کارهای مؤثر بر تلفات خاک، آب، و نهاده‌های کشاورزی و تأثیر آن‌ها بر خاک و محیط زیست، مشخص شود. سپس ظرفیت تجدید، که در برابر اثرات مخرب فرسایش در محیط زیست مقاومت می‌کند، مورد توجه قرار گرفته و عامل T_3 تعیین می‌شود. این قبیل تحقیقات به دلیل وجود عوامل مختلف و اثرات متقابل بین آنها، مشکل هستند. شکل ۹، خلاصه مطالب مربوط به فرسایش قابل تحمل ارائه شده در مقاله، شکل ۱۰، عوامل مؤثر بر فرسایش قابل تحمل را نشان می‌دهند.

T_2 ، حفظ حاصلخیزی مورد انتظار را منعکس می‌کند و بیشینه تلفات خاک است که حاصلخیزی را در یک دوره زمانی طولانی با نهاده‌های کشاورزی اقتصادی، کاهش نمی‌دهد. اساس تعیین مقادیر T_2 ، درک ارتباط بین فرسایش خاک و حاصلخیزی، است. در نتیجه، ارزیابی کمی اثرات فرسایش خاک بر حاصلخیزی خاک در شرایط مختلف محیط زیستی، ارتباط کمی بین فرسایش خاک و توان تولید و سرمایه گذاری برای کاهش فرسایش، جنبه‌های کلیدی این تحقیق هستند.

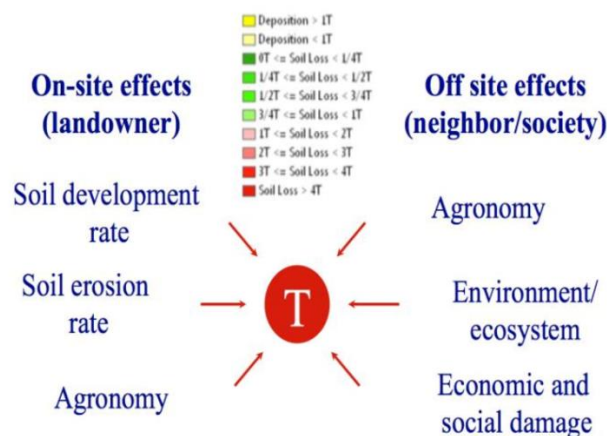
T_3 ، امنیت طولانی مدت خاک و آب، در محیط زیست را منعکس می‌کند و بیشینه تلفات خاک است که منجر به تخریب زیست‌محیطی خاک و آب در درون و خارج از منطقه نمی‌شود. تعیین مقدار T_3 ، منجر به تعیین استانداردها و یا مقادیر بحرانی فعالیت‌های انسانی در تولید محصول می‌شود. مقادیر T_3 نه تنها به وسیله تلفات قابل تحمل خاک و آب، بلکه به وسیله حدود قابل قبول بسیاری از عامل‌های دیگر تعیین



شکل ۹- خلاصه مطالب مربوط به فرسایش قابل تحمل ارائه شده

Fig. 9. Summary of concepts related to tolerable soil erosion

Tolerable Soil Loss (or Target value) T



شکل ۱۰- عوامل مؤثر بر فرسایش قابل تحمل (Fulajtár et al., 2019)

Fig. 10. Factors influencing tolerable soil erosion (Fulajtár et al., 2019)

نتیجه گیری

بررسی‌های انجام‌شده بر روی فرسایش قابل تحمل نشان می‌دهد که برای حفظ پایداری بلندمدت زمین‌های زراعی، نیاز به بازنگری در معیارها و فرضیات فعلی وجود دارد. مفهوم فرسایش قابل تحمل خاک که در برنامه‌های حفاظت خاک استفاده می‌شود، برای حفظ پایداری طولانی‌مدت زمین‌های زراعی مناسب نیست. دلیل این امر این است که این مقادیر بر اساس فرضیات نادرستی درباره نرخ‌های تشکیل لایه سطحی خاک و فرآیندهای هوازدهی معدنی تعیین شده‌اند. این مفهوم بر دو فرض اصلی استوار است: نخست، دانشمندان خاک می‌توانند به‌طور دقیق و قابل اعتماد بیشینه نرخ‌های فرسایش قابل تحمل را ارزیابی کنند. دوم، سیاست‌گذاران قادرند، این ارزیابی‌ها را به‌صورت عینی در مقابل منافع و نیازهای مختلف بسنجند و متعادل کنند. هر دو فرض نیاز به بازنگری دارند.

ملاحظات سیاسی کوتاه‌مدت ممکن است اقتضا کند که سیاست‌های عمومی اجازه دهند منابع خاک به تدریج و بی‌وقفه تخریب شوند، تا حدی که دیگر برای کشاورزی قابل استفاده نباشند. اما حمایت مستمر از چنین سیاستی باید به وضوح به میزان و کیفیت اطلاعات موجود درباره نرخ‌های تشکیل خاک در شرایط کشاورزی توجه داشته باشد. مقادیر فرسایش قابل تحمل خاک بسیار مهم هستند و نباید بر اساس فرضیات نادرست و غیرعلمی تعیین شوند.

در مجموع با بررسی روش‌های تعیین فرسایش قابل تحمل ارائه شده می‌توان بیان کرد که روش‌های پیشنهادی Macedo et al., (2023) می‌تواند روش مناسبی برای شرایط ایران باشد، از این نظر که ویژگی‌های مورد بررسی در این روش سهل الوصول هستند و با توجه به کمبود داده در ایران، این روش مناسب این شرایط است.

از سوی دیگر خسارات فرسایش خاک در خارج از محل وقوع فرسایش بر روی بدنه‌ها و تاسیسات آبی، زیرساخت‌های ارتباطی، صنعتی و مسکونی و دیگر زیرساخت‌ها و نیز منابع زیستی در دیگر مناطق حوزه آبخیز نیز سازوکارهایی را می‌طلبد که فراتر از شناخت توان ژئومیک خاک در باززایی فیزیکی خود و ظرفیت بازتولید باروری خود است و برای تعیین و ارزیابی مستلزم رصد کردن شاخص‌هایی در خارج از محل وقوع فرسایش است. بنابراین، مفهوم فرسایش قابل تحمل بر اساس حاصلخیزی خاک و سرعت تشکیل خاک کافی نیست و اثرات برون عرصه‌ای فرسایش خاک نیز باید در نظر گرفته شود. در نتیجه تحقیقات بیشتر و علمی‌تری در این زمینه ضروری است.

از آنجایی که برآورد کمی از فرسایش قابل تحمل خاک برای برنامه‌ریزی استراتژی‌های حفاظت از خاک و نیز طراحی عملیات حفاظت خاک ضروری است، استفاده از روشی کاربرپسند و با کمینه نیاز به داده پایه باید در دستور کار قرار گیرد. به‌علاوه، تجربه نشان داده که با توجه به فراوانی وقوع رویدادهای حدی متأثر از

می‌کند. درک رابطه بین کاربری زمین و ویژگی‌های هیدرولوژیکی (رواناب و از دست دادن خاک) برای پیش‌بینی بودجه عناصر غذایی برای استقرار در فعالیت‌های عرصه و پیش‌بینی اثرات خارج از عرصه حیاتی است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از تمامی افراد، جهت همکاری در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

پدیده تغییر اقلیم، برای طراحی عملیات حفاظت خاک وقایع حدی فرسایش و رگبارهای حدی به جای شرایط متوسط در نظر گرفته شود. همچنین، باید تحقیقاتی در زمینه توزیع آماری بیشینه تلفات سالانه خاک در مناطق مختلف جهان انجام شود.

در طی پیشرفت‌های حاصل شده دو دهه اخیر در بسط مفاهیم فرسایش قابل تحمل در جهان، اثرات خارج از محل از دست دادن خاک را نیز در نظر گرفته است و تحقیقات جدیدی باید برای پیوند توزیع اندازه دانه رسوبات فرسایش یافته با رسوبات نسبت به خاک مادری انجام شود تا غنای محتوی شیمیایی را توضیح دهد. برای این منظور استفاده از روش‌های انگشت‌نگاری رسوب و نیز روش‌های رادیوایزوتوپی به‌عنوان روش‌های مرجع و در تکمیل با روش‌ها و فنون تجربی قابل توصیه هستند.

در نهایت هزینه‌های فرسایش خاک قابل توجه است و بر اهمیت استراتژی‌های حفاظت از خاک تاکید

منابع مورد استفاده

- Alexander, E.B., 1986. Rates of soil formation from bedrock or consolidated sediments. *Phys. Geograph.* 6(1), 26-42.
- Alexander, E.B., 1988a. Rates of soil formation: implications for soil loss tolerance. *Soil Sci.* 145(1), 37-45.
- Alexander, E.B., 1988b. Strategies for determining soil loss tolerance. *Environ. Manage.* 12(6), 791-796.
- Anderson, S.P., 2005. Glaciers show direct linkage between erosion rate and chemical weathering fluxes. *Geomorphol.* 67, 147-157.
- Arabkhedri, M., Shadfar, S., Sokouti Oskouei, R., 2016. Improving the estimates of water erosion and determining soil loss tolerance for Iran tolerance for Iran. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. Code: 2-29-29-90025 (in Persian).
- Arriaga, F.J., Lowery, B., 2003. Corn production on an eroded soil: effects of total rainfall and soil water storage. *Soil Till. Res.* 71, 87-93.
- Bakker, M.M., Govers, G., Jones, R., Rounsevell, M., 2005. The effect of soil erosion on agricultural productivity. *Geophys. Res. Abstract.* 7, 695.
- Bazzoffi, B., 2009. Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. *Reg. Environ. Change.* 9, 169-179.
- Bennett, H.H., 1939. *Soil conservation*. McGraw-Hill Book Co., Inc, New York, 93-124.
- Bennett, S.J., Rhoton, F.E., 2016. *Field and laboratory methods for measuring soil erosion*. USDA Agricultural Research Service.
- Bertol, I., Almeida, J.A., 2000. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(3), 657-668.
- Bhattacharyya, P., V.K. Bhatt, D. Mandal, 2008. Soil loss tolerance limits for planning of soil conservation measures in Shivalik-Himalayan region of India. *Catena* 73, 117-124.
- Bierman, P.R., Steig, E.J., 1996. Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment. *Earth Surf. Proces. Landform* 21, 125-139.
- Biggelaar, C.D., Lal, R., Wiebe, K., Eswaran, H., Breneman, V., Reich, P., 2003. The global impact of soil erosion on productivity I: absolute and relative erosion-induced yield losses. *Advanc. Agronom.* 81, 148.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2008. *Principles of soil conservation and management*. Springer Dordrecht.
- Boardman, J., Poesen, J., 2006. Soil erosion in Europe: major processes, causes and consequences. *Soil Erosion in Europe*, 477-487.

- Bouchard, M., Jolicoeur, S., 2000. Chemical weathering studies in relation to geomorphological research in southeastern Canada. *Geomorphol.* 32, 213-238.
- Browning, G.M., Parish, G.L., Glass, J., 1947. A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in the control of soil erosion in Iowa. *J. Amer. Soci. Agron.* 39, 65-73.
- Cook, K., 1982. Soil loss: a question of values. *J. Soil Water Conserv.* 37 (2), 89-92.
- Carollo, F.G., Di Stefano, C., Nicosia, A., Palmeri, V., Pampalone, V., Ferro, V., 2023. A new strategy to assure compliance with soil loss tolerance at a regional scale. *Catena* 223, 106945.
- Cockburn, H.A.P., Summerfield, M.A., 2004. Geomorphological applications of cosmogenic isotope analysis. *Prog. Physi. Geograph.* 28, 1-42.
- Darvill, C.M., 2013. Cosmogenic nuclide analysis. *Geomorphological Techniques*.
- Dash, S., Sahoo, B., Raghuwanshi, N., 2021. How reliable are the evapotranspiration estimates by soil and water assessment tool (SWAT) and variable infiltration capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning? *J. Hydrol.* 592, 125838.
- Di Stefano, C., Nicosia, A., Pampalone, V., Ferro, V., 2023. Soil loss tolerance in the context of the European Green Deal. *Heliyon* 9, e12869.
- Dietrich, W.E., Reiss, R., Hsu, M.-L., Montgomery, D.R., 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrol. Process.* 9, 383-400.
- Duan X., Shi X., Li, Y., Rong, L., Fen, D., 2017. A new method to calculate soil loss tolerance for sustainable soil productivity in farmland. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 2.
- Duan, X., 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, 472-481.
- Duan, X., Xie, Y., Liu, B., Liu, G., Feng, Y., GAO, X., 2012. Soil loss tolerance in the black soil region of Northeast China. *J. Geogr. Sci.* 22(4), 737-751.
- Earth, T.F.W., 1961. Abundance of the elements, areal averages, and geochemical cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta* 23, 1-8.
- Fenton, T.E., Kazemi, M., Lauterbach-Barrett, M.A., 2005. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils. *Soil Till. Res.* 81, 163-171.
- Fulajtár, E., Mabit, L., Renschler, C., Amelialezhi, Y.I., 2019. Use of ¹³⁷Cs for soil erosion assessment. *Environ. Sci.*
- Gabet, E.J., Mudd, S.M., 2010. Bedrock erosion by root fracture and tree throw: A coupled biogeomorphic model to explore the humped soil production function and the persistence of hillslope soils. *J. Geophysic. Res. (Earth Surface)*, 115, F04005
- Galindo, I.C.L., Margolis, E., 1989. Tolerância de perdas por erosão para solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 13, 95-100.
- Gantzer, C.J., Anderson, S.H., Thompson, A.L., Brown, J.R., 1990. Estimating soil erosion after 100 years of cropping on Sanborn field. *J. Soil Water Conserv.* 45(6), 641-644.
- Ghafari, H., Gorji, M., Arabkhedri, M., Roshani, G.A., Heidaria, A., Akhavand, S., 2017b. Identification and prioritization of critical erosion areas based on onsite and offsite effect. *Catena* 156, 1-9.
- Gosse, J.C., Phillips, F.M., 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quat. Sci. Review.* 20, 1475-1560.
- Granger, D.E., Kirchner, J.W., Finkel, R., 1996. Spatially averaged long-term erosion rates measured from in situ-produced cosmogenic nuclides in alluvial sediment. *J. Geol.* 104, 249-257.
- Green, E.G., Dietrich, W.E., Banfield, J.F., 2006. Quantification of chemical weathering rates across an actively eroding hillslope. *Earth Planet. Sci. Letter.* 242, 155-169.
- Guo, Y., Zheng, H., Wu, T., Wu, J., Robinson, B.E., 2020. A review of spatial targeting methods of payment for ecosystem services. *Geogr. Sustainab.* 1(2), 132-140.
- Hancock, G.R., Wells, T., Martinez, C., Dever C., 2015. Soil erosion and tolerable soil loss: insights into erosion rates for a well-managed grassland catchment. *Geoderma* 237-238, 256-265.
- Hartemink, A.E., Bockheim, J.G., 2013. Soil genesis and classification. *Catena* 104, 251-256.
- Heimsath, A.M., Chappell, J., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 2002. Late quaternary erosion in southeastern Australia: a field example using cosmogenic nuclides. *Quat. Int.* 83-85, 169.
- Heimsath, A.M., Chappell, J., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 2002. Late quaternary erosion in southeastern Australia: a field example using cosmogenic nuclides. *Quat. Int.* 83-85, 169-185.
- Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 1997. The soil production function and landscape equilibrium. *Nature* 388, 358-361.
- Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 1999. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth. *Geomorphol.* 27, 151-172.
- Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 2001. Stochastic processes of soil production and transport: erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclide in the Oregon coast range. *Earth Surface Process. Landf.* 26, 531-552.

- Heimsath, A.M., Fink, D., Hancock, G.R., 2009. The 'humped' soil production function: eroding Arnhem Land, Australia. *Earth Surf Process Landf.* 34, 1674-1684.
- Huang, L.-M., Zhang, G.L., Yang, J.-L., 2013. Weathering and soil formation rates based on geo chemical mass balance in a small forested watersheds under acid precipitation in subtropical China. *Catena* 105, 11-20.
- Hudson, N., 1986. Soil conservation. BT Batsford Ltd, London.
- Humphreys, G.S., Wilkinson, M.T., 2007. The soil production function: a brief history and its rediscovery. *Geoderma* 139, 73-78.
- Islam, K., Yokoi, R., Pastor, A.V., Motoshita, M., 2023. Balancing water use and nutrition for crop production in a highly dense population – Bangladesh. *Sustain. Produc. Consump.* 43, 389-399.
- Johnson, L.C., 1987. Soil loss tolerance: fact or myth. *J. Soil Water Conserv.* 42(3), 155-160.
- Johnson, L.C., 2005. Soil loss tolerance: fact or myth [2]. *J. Soil Water Conserv.* 60(3), 52.
- Kapur, K.C., Lamberson, L.R., 2001. Reliability in engineering design. Wiley, New York, 10. 1997.
- Kliment'ev, A.I., Tikhonov, V.E., 2001. Ecohydrological analysis of soil loss tolerance in agrolandscapes. *Soil Erosion* 34 (6), 673-682.
- Kuznetsov, M.S., Abdulkhanova, D.R., 2013. Soil loss tolerance in the central chernozemic region of the european part of Russia. *Eurasian Soil Sci.* 46(7), 802-809.
- Lakaria, B.L., Biswas, H., Mandal, D., 2008. Soil loss tolerance values for different physiographic region of Central India. *Soil Use Manage.* 24, 192-198.
- Lal, D., 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth Planet. Sci. Letters* 104(2-4), 424-439.
- Lal, R., 1985. Soil erosion and crop productivity relationship for a tropical soil. In: EI-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., Lo, A. (Eds.), *Soil Erosion and Conservation*. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, 137-257.
- Langbein, W.B., Dawdy, D.R., 1964. Occurrence of dissolved solids in surface waters in the United States. *USDI Geol. Surv., Prof. Paper* 501-D, 115-117.
- Larson, W.E., 1981. Protecting the soil resource base. *J. Soil Water Conserv.* 36(1), 13-16.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sébrier, M., Braucher, R., Bourles, D., Benedetti, L., Nazari, H., Foroutan, M., 2012. Interpreting scattered in-situ produced cosmogenic nuclide depth-profile data. *Quat. Geochronol.* 11, 98-115.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Braucher, R., Fattahi, M., Benedetti, L., Foroutan, M., Siame, L., Bourlès, D., Talebian, M., 2009. Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, Central Iran. *Geophys. J. Int.* 179(2), 700-710.
- Lee, K., Song, Y., Koo, H., Kim, H., Kweon, H., Koo, N., 2023. Evaluation of soil loss tolerance and tree growth features based on planting ground methods in the Alpine center, degraded forestland in the republic of Korea. *Forests* 14, 200.
- Li, L., Du, S., Wu, L., Liu, G., 2009. An overview of soil loss tolerance. *Catena* 78, 93-99.
- Li, L., Zhou, Z.H., Liu, G.C., 2005. The present situation and conceive of soil loss tolerance study. *Advanc. Earth Sci.* 20(9), 65-72.
- Liu, G.C., Li, L., Wu, L., Wang, G., Zhou, Z., Du, S., 2009. Determination of soil loss tolerance of an Entisol in Southwest China. *Soil Sci. Soci. Amer. J.* 73(2), 412-417.
- Lombardi Neto, F., Bertoni, J., 1975. Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo. Instituto Agrônômico, Campinas.
- Macedo, L.T.S., Santos, L.A., Farias Filho, M.S., Oliveira, F.P., Almeida, R.G., Santos, R.V., Campos, M.C.C., 2023. Tolerance of soil loss by erosion in the western mesoregion of Maranhão. *Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS*, 11(1), e8292.
- Mallarino, A.P., Stewart, B.M., Baker, J.L., Downing, J.D., Sawyer, J.E., 2002. Phosphorus indexing for cropland: Overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index. *J. Soil Water Conserv.* 57, 440-447.
- Mandal, D., Dadhwal, K.S., Khola, O.P.S., Dhyani, B.L., 2006. Adjusted T values for conservation planning in Northeast Himalayas of India. *J. Soil Water Conserv.* 61(6), 391-397.
- Mandal, D., Sharda, V.N., Tripathi, K.P., 2010. Relative efficacy of two biophysical approaches to assess soil loss tolerance for Doon valley soils of India. *J. Soil Water Conserv.* 65(1), 42-49.
- Martha, M.B., Gerard, G., Rounsevell, M.D., 2004. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57, 55-76.
- McCormack, D.E., Young, K.K., Kimberlin, L.W., 1982. Current criteria for determining soil loss tolerance. In: Schmidt, B.I., allmaras, R.r., Mannering, J.V., Papendick, R.I. (Eds.), *Agronomy Society of America Special Publication*, 45. Agronomy Society of America, Madison, Wisconsin.
- Merchel, S., Benedetti, L., Bourlès, D.L., Braucher, R., Dewald, A., Faestermann, T., Finkel, R.C., Korschinek, G., Masarik, J., Poutivtsev, M., Rochette, P., 2010. A multi-radionuclide approach for in

- situ produced terrestrial cosmogenic nuclides: ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl and ^{41}Ca from carbonate rocks, *Nuclear Instruments Meth. Phys. Res. B*, 268(7), 1179.
- Merchel, S., Herpers, U., 1999. An update on radiochemical separation techniques for the determination of long-lived radionuclides via accelerator mass spectrometry. *Radiochimica Acta*. 84(4), 215.
- Midmore, D.J., Jansena, H.G., Dumsday, R.G., 1996. Soil erosion and environmental impact of vegetable production in the Cameron Highlands, Malaysia. *Agricul. Ecosys. Environ.* 60(1), 29-46.
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2001. A rudimentary mechanistic model for soil formation and landscape development II. A two-dimensional model incorporating chemical weathering. *Geoderma* 103, 161-179.
- Mirtskhulava, T.E., 2001. On the maximum soil loss tolerance. *Eurasian Soil Sci.* 34(3), 321-325.
- Morgan, R.P.C., 2005. Soil erosion and conservation.
- Nearing, M., 2002. Toward a new definition of soil loss tolerance for the United States. *International Soil Conservation Organization Conference*, Conference abstracts.
- Nishiizumi, K., Winterer, E.L., Kohl, C.P., Klein, J., Middleton, R., Lal, D., Arnold, J.R., 1989. Cosmic ray production rates of ^{10}Be and ^{26}Al in quartz from glacially polished rocks. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 94(B12), 17907-17915.
- Ott, R., Gallen, S.F., Helman, D.: Erosion and weathering in carbonate regions reveal climatic and tectonic drivers of carbonate landscape evolution. *Earth Surf. Dynam.* 11, 247-257.
- Peter, B.S., Donald, M.F., Thomas, W.G., Thomas, W.G., Katherine, M., Susan, L.B., 2004. Rate of weathering rind formation on Costa Rican basalt. *Geochimica ET Cosmochimica Acta* 68(7), 1453-1472.
- Pierce, F.J., Larson, W.E., Dowdy, R.H., 1984. Soil loss tolerance: maintenance of longterm soil productivity. *J. Soil Water Conserv.* 39(2), 136-138.
- Pimentel, D., Burgess, M., 2013. Soil erosion threatens food production. *Agricul.* 3, 443-463.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, Fitton, L., Saffouri, L., Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267, 1117-1123.
- Pimentel, D., Kounang, N., 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosys.* 1, 416-426.
- Qiao, X., Li, Z., Wang, H., Zheng, S., Yang, S., 2024. Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 12(2), 298-312.
- Rango, A., Shalaby, A.I., 1999. Applications of remote sensing to hydrology and water resources. *Hydrol. Sci. J.* 24(4), 485-498.
- Ratke RF, Zuffo AM, Steiner F, Aguilera JG, de Godoy ML, Gava R, de Oliveira JT, Filho TAdS, Viana PRN, Ratke LPT, 2023. Can soil moisture and crop production be influenced by different cropping systems? *AgriEngineering.* 5(1), 112-126.
- Roose, E., 1996. Land husbandry: components and strategy. *FAO soils Bulletin N° 1503* 70. FAO, Rome, 380 pages.
- Ruan, F.S., 1997. The discussion on the reference index of soil erosion intensity class in granite slope. *Res. Soil Water Conserv.* 4(1), 113-119.
- Salviano, A.A.C., Vieira, S.R., Sparovek, G., 1998. Erosion intensity and *Crotalaria juncea* yield on a southeast Brazilian Ultisol. *Advanc. Geocol.* 31, 369-374.
- Schertz, D.L., 1983. The base for soil loss tolerance. *J. Soil Water Conserv.* 38(1), 10-14.
- Shabanian, E., Bellier, O., Siame, L., Abbassi, M.R., Bourlès, D., Braucher, R. and Farbod, Y., 2012. The binalud mountains: A key piece for the geodynamic puzzle of NE Iran. *Tectonics* 31, 6.
- Shtompel, Y.A., Lisetskii, F.N., Sukhanovskii, Y.P., 1998. Soil loss tolerance of brown forest soils of Northwestern Caucasus under intensive agriculture. *Eurasian Soil Sci.* 31(2), 185-190.
- Singh, P.D., Klammerus-Iwan, A., Hawryło, P., Sierka, E., Pietrzykowski, M., 2023. Possibility of spatial estimation of soil erosion using revised universal soil loss equation model and generalized additive model in post-hard coal mining spoil heap. *Land Degrad. Dev.* 1-13.
- Skidmore, E.L., 1982. Soil loss tolerance. In: David, M.K. (Ed.), *Determinants of Soil Loss Tolerance*. ASA Spec. Publ., 45. ASA, Madison, pp. 87-93.
- Small, E.E., Anderson, R.S., Hancock, G.S., 1999. Estimates of the rate of regolith production using ^{10}Be and ^{26}Al from an alpine hillslope. *Geomorphol.* 27(1-2), 131-150.
- Smith, D.D., 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agricul. Engin.* 22, 173-175.
- Smith, D.D., Whitt, D.M., 1948. Evaluating soil losses from field area. *Agricul. Engin.* 29, 394-396.
- Sokouti Oskouei, R., 2011. An introduction to tolerable erosion and its measurement methods. *Pelk Publication* (in Persian).
- Stamey, W.L., Smith, R.M., 1964. A conservation definition of erosion tolerance. *Soil Sci.* 97, 183-186.
- Stocking, M.A., 2003. Tropical soil and food security: the next 50 years. *Sci.* 302(21), 1356-1359.

- Sudhishri, S., Kumar, A., Singh, J.K., Dass, A., Nain, A.S., 2014. Erosion tolerance index under different land use units for sustainable resource conservation in a Himalayan watershed using remote sensing and geographic information system (GIS). *Afr. J. Agri. Res.* 9(41), 3098-3110.
- Sverdrup, H., Warfvinge, P., 1993. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. *Appl. Geochem.* 8, 273-283.
- Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K.G., 2001. *Soil erosion: process, prediction, measurement and control.* John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 233-265.
- Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K.G., 2002. *Soil erosion: process, prediction, measurement, and control.* John Wiley & Sons Inc., New York, 352 pages.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2012. *Water quality assessment and total maximum daily loads information.*
- USDA-NRCS. 2014. General guidelines for assigning soil loss tolerance "T". <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=44089.wba>
- Velbel, M.A., Price, J.R., 2007. Solute geochemical mass-balances and mineral weathering rates in small watersheds: methodology, recent advances, and future directions. *Appli. Geochemist.* 22 (8), 1682-1700.
- Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J., Smith, C.J., 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth Sci. Rev.* 94, 23-38.
- Von Blanckenburg, F., 2005. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth Planet. Sci. Letters* 237, 462-479.
- Wakatsuki, T., Rasyldin, A., 1992. Rates of weathering and soil formation. *Geoderma* 52(34), 251-263.
- Wakatsuki, T., Rasyldin, A., Naganawa, T., 1993. Multiple regression method for estimating rates of weathering and soil formation in watersheds. *Soil Sci. Plant Nutri.* 39(1), 153-159.
- Wang, L., Li, X., Qin, B., Zheng, H., Zheng, Z., 2024. *Catena* 239, 107919.
- Wesley, L., 2009. *Soil formation, composition, and basic concepts.* Environmental Science, Geology.
- Willenbring, J.K., von Blanckenburg, F., 2010. Meteoric cosmogenic Beryllium-10 adsorbed to river sediment and soil: Applications for Earth-surface dynamics. *Earth-Sci. Review.* 98(1), 105-122.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses-a Guide to Conservation Planning,* USDA, Agriculture Handbook 537.
- Wolf, M.K., Wiesmeier, M., Macholdt, J., 2023. Importance of soil fertility for climate-resilient cropping systems: The farmer's perspective. *Soil Securit.* 13, 100119.