An overview of methods for economic valuation of soil erosion damages: fundamentals, approaches, and operational methodology

H. Ghafari *, Y. Parvizi, and M. Arabkhedri

Assistant Prof., Soil Science Department, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. **h.ghafari@scu.ac.ir**

Associate Prof., Water and Soil Conservation Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. **yparvizi1360@gmail.com**

Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran. **arabkhedri.mahmood@yahoo.com**

Received: June 2024 and Accepted: January 2025

Abstract

Soil is a vital natural resource with a multitude of functions, whose degradation leaves significant adverse effects on the beneficiary community. Given the pivotal role soil erosion plays in soil destruction and the mandatory measures prescribed by Article 15 of the Soil Protection Law to address these adverse consequences, the current study was performed to explore the prevailing methodologies along with their inherent limitations and advantages. The goal was to identify and propose solutions for economic assessment of damages ensuing from soil degradation. The types and extent of soil erosion damage pose significant challenges to practitioners and scientists in their efforts to assess and quantify soil degradation. It is, therefore, essential to develop a specialized evaluation framework and datasets for each type of damage. The majority of conventional methods used for quantifying erosion damage are cost-oriented, with the most prominent ones being characterized by replacement cost, avoidance cost, and opportunity cost. It is important to note that no single method is perfect as each is designed for a specific type of erosion or damage. Furthermore, it is likely that application of combined methods might lead to overestimation. Given these considerations, it is not feasible to provide a universal framework as a cure-all that can be used for all types of erosion under all conditions. Our literature review revealed that soil erosion damage assessment studies typically comprise three main parts: 1) measuring the amount of soil erosion, 2) identifying the types of erosion damage in each study area, and 3) pricing the damage, each entailing significant challenges. Consequently, it is essential to adopt the most effective and efficient approach tailored to the specific goals and conditions at hand. Based on the results obtained, the avoided cost method was identified as an optimal solution that might be recommended on practical grounds as it encompasses all damage types, its pricing is straightforward, and is applicable to all forms of erosion.

Keywords: Natural Resource, Soil Protection Law, Pricing, Avoided Cost Method

*- Corresponding author's email: **h.ghafari@scu.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/lmj.2025.365713.357

نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۲ / شماره ۲ / ۱۴۰۳. ص ۱۸۷-۲۰۸
https://doi.org/10.22092/lmj.2025.365713.357

مروری بر شیوه‌های ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش خاک؛ مبانی، رویکردها و روش‌شناسی عملیاتی

حیدر غفاری* ، یحیی پرویزی و محمود عرب‌خدری

استادیار مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
h.ghafari@scu.ac.ir
دانشیار، گروه حفاظت آب و خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
yparvizi1360@gmail.com
استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
arabkhedri.mahmood@yahoo.com

دریافت: خرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: دی ۱۴۰۳

چکیده

خاک یکی از منابع طبیعی مهم با کارکردهای بسیار متنوع است که تخریب آن خسارات هنگفتی را متوجه جامعه می‌سازد. باتوجه به اهمیت موضوع تخریب خاک ناشی از فرسایش و لزوم پرداختن به خسارات آن بر اساس ماده ۱۵ قانون حفاظت خاک، این پژوهش به دنبال بررسی روش‌های موجود، محدودیت‌ها و مزایای آنها و در نهایت ارائه راه‌کارهایی برای ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش خاک در ایران می‌باشد. تنوع و گستردگی دامنه خسارات فرسایش خاک، ارزیابی و کمی‌سازی آنها را با چالش مواجه کرده است. چرا که هر نوع خسارت به یک چارچوب ارزیابی خاص و داده‌های ویژه‌ای نیاز دارد. اغلب روش‌های رایج برای کمی سازی خسارات فرسایش از نوع هزینه‌محور هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روش هزینه جایگزینی، هزینه اجتناب و هزینه فرصت اشاره کرد. هیچ‌کدام از این روش‌ها کامل نبوده و هر کدام برای نوع خاصی از فرسایش یا نوع خاصی از خسارت کاربرد دارند. استفاده ترکیبی از روش‌های موجود نیز ممکن است منجر به بیش‌برآوردی گردد. لذا، ارائه یک چارچوب مشخص که برای انواع فرسایش تحت همه شرایط قابل استفاده باشد، عملا امکان‌پذیر نیست. بررسی منابع نشان داد که در مطالعات ارزیابی خسارات فرسایش خاک معمولا سه بخش اصلی وجود دارد: ۱) تعیین میزان فرسایش خاک، ۲) شناسایی انواع خسارات فرسایش در هر منطقه مطالعاتی، و ۳) قیمت‌گذاری خسارات، که هر کدام با چالش‌های بزرگی روبه‌رو است. لذا، بسته به اهداف و شرایط موجود لازم است در هر بخش بهترین و کارآمدترین رویکردها اتخاذ گردد. از نظر کاربردی، روش هزینه اجتناب به دلیل این‌که همه خسارات را را به‌صورت یکجا پوشش می‌دهد و قیمت‌گذاری آن آسان است، و همچنین برای همه اشکال فرسایش امکان کاربرد دارد، به عنوان بهترین روش پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: منابع طبیعی، قانون حفاظت خاک، قیمت‌گذاری، هزینه اجتناب

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **h.ghafari@scu.ac.ir**

نوع مقاله: مروری

مقدمه

خاک از منظر اکولوژی و مهندسی طبیعت، محیطی بسیار پیچیده و منبعی ارزشمند به شمار می‌رود. بدون شک خاک به دلیل ارائه کارکردهای متنوع یکی از مهم‌ترین و راهبردی‌ترین منابع برای بشر از دیدگاه‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی است (Yang et al., 2020). سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد یازده کارکرد برای خاک برشمرده که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به (۱) تأمین غذا، الیاف و سوخت، (۲) تجزیه بقایای آلی گیاهی و جانوری، (۳) چرخه عناصر غذایی، (۴) پیشگیری از سیل، (۵) ترسیب کربن، (۶) تصفیه آب و کاهش آلاینده‌های خاک، (۷) تأمین زیستگاه برای هزاران جانور و میکروارگانیسم خاک‌زی و (۸) تعدیل اثرات اقلیم بر کشاورزی و آب‌وهوا اشاره کرد (Blum, 2005). بااین‌حال، استفاده از روش‌های نامناسب کشاورزی و سودجویی بهره‌برداران در چند دهه اخیر باعث تخریب شدید خاک‌ها شده است (Sparovek and De Maria, 2003). بر اساس گزارش‌های جهانی (Lal, 2001)، فرسایش خاک مهم‌ترین فرایند تخریب خاک بوده که در نتیجه فعالیت‌های انسانی شدت یافته است. برآوردها نشان می‌دهد در مقیاس جهانی سالانه به‌طور متوسط حدود ۷۵ میلیارد تن خاک سطحی حاصلخیز از سطح اراضی کشاورزی بین می‌رود (Pimentel and Burgess, 2013) که معادل ۱۰ میلیون هکتار زمین زراعی با عمق ۵۰ سانتی‌متر است. برخی گزارش‌ها نیز نصف این مقدار یعنی حدود ۳۵ میلیارد تن در سال را ذکر کرده‌اند (Borrelli et al., 2017). فرسایش خاک تعادل طبیعی زیست‌بوم را به هم زده و منجر به اختلال در کارکردهای خاک می‌شود.

بررسی گزارش‌های مربوط به فرسایش خاک در ایران نیز حکایت از وخیم بودن اوضاع دارد. نخستین برآوردها از مقدار فرسایش آبی در ایران مربوط به دهه ۱۳۵۰–۱۳۴۰ است، که میانگین سالانه را بین ۱–۰/۶ میلیارد تن ارزیابی کردند. حدود ۲۰ سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۰ میلادی، یونسکو با همکاری فائو و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل اقدام به تهیه نقشه فرسایش خاک برای خاورمیانه و شمال آفریقا کردند. بر اساس این نقشه متوسط کلاس‌های مختلف فرسایش آبی در ایران حدود ۳/۲ میلیارد تن تخمین زده شد (به نقل از Asadi et al., 2022). برآوردهای اخیر نیز میانگین سالانه فرسایش آبی را بین ۰/۹ تا ۲/۷ میلیارد تن برآورد کرده‌اند (Arabkhedri, 2021; Nikkami and shadfar, 2021; Mohammadi et al., 2021). علت اختلاف چندین برابری بین برآوردهای موجود ناشی از پیچیدگی فرایندهای فرسایش، عدم وجود شبکه پایش و داده‌برداری مناسب، و تنوع در روش‌ها و رویکردهای مورد استفاده ذکر شده است (Asadi, 2022). هرچند که مطالعات کمتری در خصوص فرسایش بادی در کشور انجام شده، اما برآوردها نشان می‌دهد که اهمیت آن با فرسایش آبی برابری می‌کند. به‌عنوان مثال، Ekhtesasi and Jahanbakhshi (2016) با استفاده از مدل IRIFR متوسط سالانه فرسایش بادی برای کل کشور را حدود ۱/۳ میلیارد تن تخمین زدند. Azimzadeh and Tahmasebi-Birkani, (2022) نیز نشان دادند که بالغ بر ۷۰ درصد کل فرسایش بادی مربوط به پنج استان خراسان جنوبی، کرمان، سیستان و بلوچستان، اصفهان و خراسان رضوی است (به نقل از Asadi et al., 2022). به اعتقاد برخی از کارشناسان این حوزه، حتی با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار برآوردی، بازهم وضعیت فرسایش خاک در ایران نگران‌کننده است. زیرا، با توجه به نرخ خاک‌سازی در ایران، فرسایش خاک حداقل بیش از ۱۰ برابر حد قابل‌تحمل آن است (Asadi, 2022).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اغلب مطالعات علمی در زمینه فرسایش خاک (Dou et al., 2022; Borrelli et al., 2021; Guerra et al., 2020; Poesen, 2018) بر شناخت فرآیندهای حاکم بر آن و هچنین کمی‌سازی مقادیر فرسایش متمرکز شده‌اند و جنبه اقتصادی این پدیده کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Panagos et al., 2018). بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تنها ۰/۴ درصد از انتشارات مربوط به فرسایش خاک بر بعد اقتصادی تمرکز کرده‌اند. این در حالی است که فرسایش

خاک سالانه هزینه‌های اقتصادی متعدد و قابل توجهی را به جامعه وارد می‌سازد. به‌عنوان مثال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده از هزینه‌های اقتصادی تخریب خاک در مقیاس جهانی تا ۴۹۰ میلیارد دلار در سال می‌رسد (Nkonya et al., 2016). هزینه فرسایش خاک بر اساس یک رویکرد چندبعدی تخصصی در ایالات‌متحده آمریکا حدود ۴۴ میلیارد دلار (پیمنتل و همکاران (۱۹۹۵)، در اتحادیه اروپا حدود ۳۵۰ میلیون دلار (Panagos et al., 2018)، و در قاره آفریقا حدود ۲۸۰ میلیارد دلار (Wolka et al., 2018) برآورد شده است. در آسیای جنوبی خسارت فرسایش خاک به تولیدات کشاورزی ۵۴ میلیارد دلار گزارش شده است (Lal, 2001). لازم به ذکر است که در همه این گزارش‌ها تنها بخشی از خسارات فرسایش (عمدتاً خسارات برجا) در نظر گرفته شده و با لحاظ کردن همه ابعاد، خسارات فرسایش بسیار بیش‌تر از این‌ها خواهد بود.

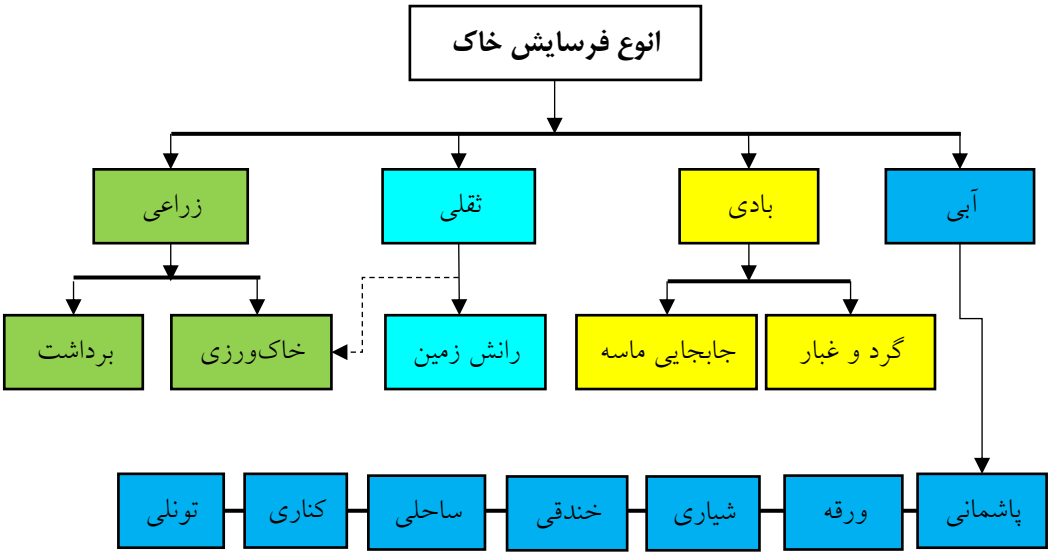
آگاهی از میزان خسارات فرسایش خاک نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع خاک از جمله طراحی و اولویت‌بندی شیوه‌های حفاظت خاک و همچنین طراحی ساختارهای تشویقی مؤثر به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان بر عهده دارد. از سوی دیگر، درک اقتصادی خسارات فرسایش خاک باعث ارتقای آگاهی و آموزش در بین ذینفعان می‌شود. با این حال، ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش خاک به ابزارها و راهنماهای مناسبی نیاز دارد که بتوانند هم ارزش خاک از دست‌رفته و هم اثرات خارج از محل را به‌صورت کمی بیان کنند. با توجه به اینکه، هم تعیین میزان فرسایش خاک و هم کمی‌سازی خسارات آن امری دشوار و پیچیده است، تاکنون چارچوب جامعی برای این منظور ارائه نشده است (Hosseini and Ghorbani, 2014؛ Robinson and Lebron, 2010) و هر محقق باتوجه به دانش، ابزار و داده‌های موجود اقدام به ارزیابی خسارات فرسایش کرده است که در بخش بعدی به آن‌ها پرداخته شده است. هر روش دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود بوده و هیچ یک از آن‌ها به‌طور جامع و همه‌جانبه هزینه‌های فرسایش خاک را بررسی نکرده‌اند. همچنین، تحت شرایط یکسان هر رویکرد ممکن است نتایج بسیار متفاوتی ارائه دهد. زیرا، در هر رویکرد شیوه ارزیابی اقتصادی خسارت متفاوت است. لذا، ایجاد روش‌های استاندارد و علمی برای انواع مختلف فرسایش خاک در مقیاس‌های مختلف و تعیین خسارات فرسایش به‌عنوان یک ضرورت انکارناپذیر در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های کلان از جمله مسائل محیط‌زیست، کشاورزی و منابع طبیعی بسیار حائز اهمیت است. این مطالعه با هدف بررسی روش‌های موجود برای ارزیابی خسارات فرسایش خاک، شناسایی محدودیت‌ها و مزایای هر کدام، و در نهایت ارائه راهکارهای مناسب انجام شد.

انواع فرسایش و خسارات آن‌ها

به‌طورکلی، فرسایش خاک را بسته به منبع انرژی و عامل جابجایی می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: فرسایش آبی، فرسایش بادی، فرسایش ثقلی و فرسایش زراعی (Lal, 2020). فرسایش آبی خود به چند شکل از جمله فرسایش پاشمانی، ورقه‌ای، شیاری، خندقی، کناره‌ای (شامل رودخانه‌ها و دریاها)، توده‌ای و تونلی قابل تقسیم است (Blanco and lal, 2023). فرسایش ثقلی بر اساس سرعت وقوع، عمق حرکت مواد دامنه‌ای و جنس ذرات به انواع مختلفی مانند زمین‌لغزش[1]، خزش[2]، خاک‌روانه[3]، گل-روانه[4] و غیره تقسیم می‌شود (Xu et al., 2020; Beek et al., 2008). قابل ذکر است در وقوع فرسایش توده‌ای هم نیروی ثقل و هم عامل بارندگی مؤثر است. فرسایش زراعی نیز به دو شکل فرسایش خاک‌ورزی و فرسایش برداشت محصول تقسیم می‌شود. در فرسایش خاک‌ورزی علاوه بر نیروی پرتابی ادوات شخم، نیروی ثقل نیز مؤثر است. فرسایش بادی که شدت آن در مناطق خشک و فراخشک بیش‌تر است، شامل برداشت ذرات ریزتر خاک و

1 - Landslide
2 - Creep
3 - Earthflow
4 - Mudflow

ایجاد گردوغبار، حرکت خزشی و جهشی ذرات درشت‌تر خاک و جابجایی توده‌های بزرگ‌تر نهشته‌های بادی نظیر تلماسه‌ها و تپه‌های ماسه‌ای می‌شود. شایان ذکر است که انواع مختلف فرسایش خاک می‌توانند به‌طور هم‌زمان رخ دهند و اثرات قابل توجهی بر محیط‌زیست و فعالیت‌های انسانی بگذارند.



شکل ۱- انواع فرسایش خاک بر اساس نوع منبع انرژی
Figure 1- Types of soil erosion based on the type of energy source

فرسایش خاک جدا از نوع و شکل آن، در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، اکولوژیکی و محیط‌زیستی خساراتی را به جامعه و محیط وارد می‌سازد. با این حال، نوع و میزان خسارت ایجاد شده می‌تواند تابعی از نوع و شکل فرسایش باشد. به‌عنوان‌مثال، فرسایش بادی عمدتاً باعث آلودگی هوا و فرسایش آبی عمدتاً باعث کاهش کیفیت آب‌ها می‌شود. لذا، تشخیص نوع/شکل غالب فرسایش در منطقه در تعیین نوع پیامدها و ارزیابی اقتصادی خسارات آن بسیار حائز اهمیت است. در کل، خسارات فرسایش خاک به دو گروه خسارات برجا (یا درون مزرعه) و خسارات خارج از مزرعه گروه‌بندی می‌شوند (Lal, 2018). کاهش کیفیت خاک و تضعیف کارکردهای آن (مانند تولید محصول و چرخه آب و عناصر غذایی) مهم‌ترین خسارت برجای فرسایش است (Mandal et al., 2023). زیرا فرسایش خاک به‌عنوان یک فرآیند انتخابی، بخش‌های ریز (به‌عنوان مثال، رس و سیلت) و سبک (کربن آلی خاک یا SOC) را حذف و جابجا می‌کند (Lal, 2020). این سه جزء (یعنی رس، سیلت و SOC) تعیین کننده‌های کلیدی کیفیت خاک و ظرفیت آن برای ارائه خدمات زیست‌بومی[1] متعدد هستند. به همین دلیل است که Montgomery, 2007 فرسایش و تخریب منابع خاک را یکی از عوامل اصلی نابودی تمدن‌های بزرگ ذکر کرده است. فرسایش خاک از طریق تخریب ساختمان خاک و حذف خاک سطحی حاصلخیز بر نفوذ، ذخیره و نگهداشت آب در خاک تأثیر منفی می‌گذارد (Wei et al., 2019). فرسایش تشدیدی خاک علاوه بر تأثیر نامطلوب بر امنیت غذایی، محیط‌زیست (شامل خاک، آب‌وهوا) را نیز آلوده می‌کند (Pimentel, 2006). خسارات فرسایش به ابنیه‌ها و تأسیسات و همچنین جاده‌ها و خطوط انتقال نیرو نیز قابل توجه است. این نوع خسارات بسته به موقعیت سازه‌ها و نوع فرسایش هم به‌صورت برجا و هم به‌شکل خارج از مزرعه ایجاد می‌شوند. در جدول ۱ فهرستی از مهم‌ترین و مشهودترین خسارات انواع فرسایش ارائه شده است.

1 - Ecosystem Service

جدول ۱- فهرستی از مهم‌ترین خسارات فرسایش بر اساس نوع آن

Table 1- A list of the most important erosion damages according to its type

نوع فرسایش	خسارات احتمالی	منبع
فرسایش شیاری و بین شیاری	– از بین رفتن خاک سطحی حاصلخیز – هدررفت عناصر غذایی – کاهش تنوع زیستی – کاهش باروری خاک (کاهش تولید محصول) – کاهش کیفیت آب (آلودگی آب) – کاهش نفوذ و ذخیره آب در خاک – رسوب‌گذاری در انهار – رسوب‌گذاری در مخازن (کاهش عمر مفید سدها) – افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای	Osman, 2014 Govers et al., 2004 Colacicco et al., 1989 Lal, 1998 Li et al., 2021 Wei et al., 2019
فرسایش توده‌ای	– تلفات جانی و جراحات – تخریب ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها، مزارع، شبکه انتقال برق و آب و غیره – کوچ اجباری جمعیت – کاهش ارزش زمین – تخریب مناظر و خسارات زیباشناختی – تخریب زیستگاه‌ها – تغییر مسیر آبراهه‌ها و آلودگی منابع آبی	Alimohammadlou et al., 2013 Del Soldato et al., 2019 Kim et al., 2018
فرسایش خندقی	– تخریب زمین‌های مرتعی و زراعی و مهاجرت روستاییان – کاهش ارزش زمین – تغییر چشم‌انداز و الگوهای زهکشی – افزایش خطر سیل – تخریب زیستگاه‌های گیاهی و جانوری – تولید رسوب و آلودگی آب‌ها – پر شدن مخازن سدها و مسدود شدن انهار – تخریب زیرساخت‌ها و سازه‌های انسانی	Valentin et al., 2005; Hassen and Bantider, 2020 Yazie, et al., 2021 Soufi et al., 2022
فرسایش ساحلی	– تخریب سازه‌ها حاشیه دریا – هدررفت خاک و عناصر غذایی – تخریب زمین – کاهش ارزش زمین – زیباشناسی و گردشگری	Catma, 2021
فرسایش کرانه‌ای یا کنار رودخانه‌ای	– تخریب سازه‌های حاشیه رودخانه – هدررفت خاک و عناصر غذایی – تخریب زمین‌ها – کاهش ارزش آن‌ها – تولید رسوب و آلودگی آب‌ها – پر شدن مخازن سدها و مسدود شدن انهار	Das and Samanta, 2023 Roy et al., 2017 Tripathy and Mondal, 2019 Bhuiyan et al., 2017
فرسایش خاک‌ورزی	– هدررفت خاک سطحی – کاهش حاصلخیزی خاک – افزایش خطر فرسایش خندقی	Heckrath et al., 2005 Wang et al., 2016 Lindstrom et al., 2001
فرسایش برداشت	– هدررفت خاک و عناصر غذایی – افزایش مصرف آب شهری ناشی از شستشو – هدررفت انرژی – آلودگی آب‌وهوا – انسداد و گرفتگی شبکه فاضلاب	Kuhwald et al., 2022 Panagos et al., 2019 Ruysschaert et al., 2004
فرسایش بادی	– تخریب خاک سطحی (کاهش کیفیت خاک) – هدررفت عناصر غذایی – آلودگی هوا و مشکلات سلامتی – آسیب به زیرساخت‌ها و تأسیسات صنعتی – از دست دادن تنوع زیستی – تغییرات آب و هوایی – رسوب‌گذاری در انهار، رودخانه‌ها و مخازن	Zhao et al., 2022 Wu et al., 2021 Lal, 1994 Sterk, 2003 Sterk et al., 2001 Bartkowski et al., 2022 Santra et al., 2017 Riksen et al., 2001; 2004 Huszar et al., 1986 Goossens, 2003.

همان‌طور که مشاهده می‌شود هدررفت خاک، عناصر غذایی و تنوع زیستی به‌عنوان مهم‌ترین خسارات برجا و آلودگی منابع آب‌وهوا به‌عنوان مهم‌ترین خسارت خارج از محل در اغلب شکل‌های فرسایش ایجاد می‌گردد و عمومیت دارد. اما برخی خسارات منحصر به نوع خاصی از فرسایش است. به‌عنوان مثال خسارات جانی و تخریب سازه‌ها فقط در خصوص فرسایش توده‌ای و فرسایش بادی (وقوع تصادفات رانندگی ناشی از طوفان‌های شدید گرد و غبار) می‌توانند حادث شوند. کاهش ارزش زمین نیز تقریباً حالت عمومیت داشته و در اغلب فرسایش‌ها قابل طرح است. زیرا به دنبال تخریب و کاهش کیفیت خاک، ارزش آن نیز افت می‌کند.

روش‌های ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش خاک

با توجه به تنوع زیادی که در پیامدهای فرسایش خاک وجود دارد، ارزیابی و کمی‌سازی همه آن‌ها کار بسیار دشواری است. چراکه هر نوع خسارات به یک چارچوب ارزیابی خاص و داده‌های ویژه‌ای نیاز دارد. بعلاوه این‌که برخی از خسارات فرسایش مانند مهاجرت، اشتغال، آسیب به تنوع زیستی و تغییر اقلیم ناملموس بوده و اندازه‌گیری و ارزش‌گذاری آن‌ها تقریباً غیرممکن یا دشوار است (Gorlach et al., 2004; Duffy, 2012). بر اساس بررسی منابع مختلف، غالباً از رویکرد مبتنی بر هزینه[1] برای ارزیابی خسارات فرسایش خاک استفاده شده است. در مباحث اقتصادی و تجارت این رویکرد معمولاً برای تعیین قیمت نهایی کالاها به‌کار می‌رود. طبق این رویکرد، قیمت یک کالا برابر با کل هزینه‌های صرف شده برای تولید یا ساخت آن کالا است. هرچند در خصوص فرسایش خاک به دنبال قیمت‌گذاری آن نیستیم، اما استفاده از این رویکرد ما را به هدف خود که همان ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش است، می‌رساند. روش‌های مختلفی در ذیل این رویکرد وجود دارد که آن‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: روش‌های مستقیم و غیرمستقیم. در روش مستقیم قیمت خود کالا و خدمات آسیب‌دیده تعیین می‌شود، اما در روش غیرمستقیم ارزش یک کالا یا خدمت از طریق کالای جایگزین و یا از طریق هزینه اجتناب برآورد می‌شود. در ادامه با ذکر چندین مثال به تشریح آن‌ها پرداخته شده است.

روش‌های مستقیم

در روش‌های مستقیم، خسارات فرسایش به محیط اطراف به‌طور مستقیم قیمت‌گذاری می‌شود. این روش‌ها به نوبه خود بر اساس شیوه قیمت‌گذاری به دو گروه تقسیم می‌شوند: روش‌های مبتنی بر بازار[2] و روش‌های غیربازاری[3]. روش‌های بازاری را "قیمت‌گذاری[4]" و روش‌های غیربازاری را "ارزش‌گذاری[5]" می‌گویند.

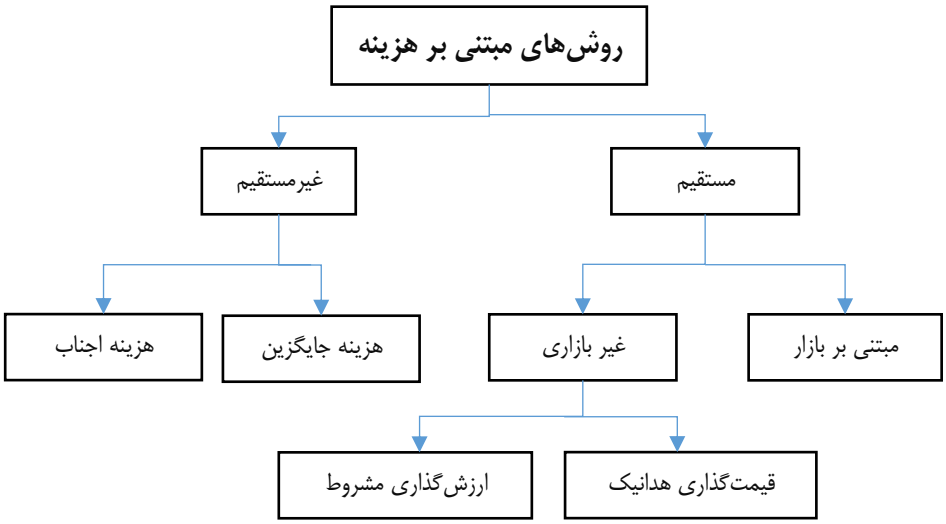
روش‌های مستقیم مبتنی بر بازار

در این گروه از روش‌ها چندین تکنیک وجود دارد، اما معمولاً در مطالعات خسارات فرسایش از تکنیک "هزینه فرصت[6]" استفاده شده است. طبق این روش، خسارت فرسایش خاک معادل ارزش کالا، خدمات و یا فرصت‌هایی است که در اثر فرسایش خاک از بین می‌روند (Enters, 1998). به‌بیان‌دیگر، خسارت فرسایش برابر است با منافع بالقوه‌ای که در اثر فرسایش از بین می‌روند. ارزش کالاها و خدمات به‌طور مستقیم بر اساس قیمت‌های بازار تعیین می‌شود. برای ارزش‌گذاری خدمات خاک نیز رویکردها و روش‌های مختلفی وجود دارد که بستگی به نوع خدمت دارد. Sokouti Oskoee and Besharati, (2022) مطالعه جامعی در این خصوص انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال، در اثر فرسایش، باروری خاک به تدریج کاهش می‌یابد و عملکرد محصول کم می‌شود (مثلاً ۱۰۰ کیلوگرم گندم در هر هکتار). به بیان دیگر، بخشی از تولید محصول که در صورت نبود فرسایش می‌توانست عاید کشاورز شود، در اثر فرسایش از بین می‌رود. قیمت آن

1 - Cost-Based Appraoch
2 - Market-Based
3 - Non-Market-Based
4 - Pricing
5 - Valuation
6 - Apportunity Cost

بخش از تولید که از بین رفته بر اساس قیمت‌های بازار تعیین‌شده و به‌عنوان خسارت فرسایش لحاظ می‌شود. مثال دیگر، خسارتی است که فرسایش خاک به سامانه‌های ذخیره و انتقال آب وارد می‌کند، یا فرصت استفاده از هوای سالم در اثر گردوغبار از مردم سلب می‌شود. چنانچه قیمت این فرصت‌های از دست رفته را نتوان به‌طور مستقیم تعیین کرد، سراغ روش‌های غیربازاری می‌رویم که در بخش بعدی به آن‌ها اشاره خواهد شد.

به‌طورکلی، خدمات خاک را می‌توان در چهار گروه تقسیم‌بندی کرد: خدمات تأمینی مانند تولید غذا و فیبر، خدمات تنظیمی مانند تنظیم چرخه آب و گاز CO_2، خدمات حمایتی ایجاد زیستگاه برای جانداران و خدمات فرهنگی مانند کارکردهای تفریحی و شناختی (Jónsson, and Davíðsdóttir, 2016; Adhikari and Hartemink, 2016; Dominati et al., 2010). علاوه بر خدمات خود خاک که می‌توانند تحت تأثیر فرسایش قرار بگیرند، برخی کالا و خدمات غیر مرتبط با خاک نیز ممکن است آسیب ببینند. به‌عنوان‌مثال، در اثر رسوب‌گذاری در انهار و مخازن، کارایی سامانه‌های ذخیره و انتقال آب کاهش پیدا می‌کند، یا در اثر فرسایش خاک سلامتی انسان‌ها و جانوران ممکن است به خطر بیفتد. لذا، این نوع خسارات نیز باید قیمت‌گذاری شوند.



شکل ۲- دسته‌بندی انواع روش‌های رایج در ارزیابی اقتصادی خسارات فرسایش خاک

Figure 2- Classification of common methods in the economic assessment of soil erosion damage

در رابطه با خدمات تأمینی خاک در اغلب موارد باروری خاک و عملکرد محصول مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، Pimentel et al., (1995) تأثیر فرسایش خاک بر تولیدات کشاورزی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در مناطقی با فرسایش سالانه حدود ۱۷ تن در هکتار در سال، تولیدات کشاورزی حدود هشت درصد کم می‌شود. یعنی به ازای هر تن فرسایش حدود ۰/۵ درصد از تولید محصول کاسته شده است. بر این اساس، با در نظر گرفتن میزان کل فرسایش و تولیدات کشاورزی ایالات‌متحده میزان خسارت فرسایش به بخش کشاورزی سالانه ۲۷ میلیارد دلار برآورد گردید. یعنی به ازای هر تن فرسایش حدود هفت دلار از درآمد کشاورز کاسته می‌شود. در مطالعه‌ای مشابه Bakker et al. (2004; 2007) گزارش دادند که در اراضی کشاورزی اروپا به ازای هر سانتی‌متر فرسایش خاک حدود ۰/۴ تا ۰/۵ درصد، افت عملکرد ایجاد می‌شود. شکل کلی معادله مورد استفاده برای تعیین میزان خسارت ناشی از افت عملکرد محصول به‌صورت معادله ۱ است (Panagos et al., 2018).

$$CPL_i = (S_t - S_{t+1}) \sum CA_{ij}\, CP_{ij}\, \beta_{ij}\, P_i \qquad (۱)$$

که در آن، CPL میزان افت تولیدات کشاورزی در منطقه i، CA مساحت اراضی تحت پوشش گیاه j، CP عملکرد محصول j، β نرخ کاهش عملکرد محصول i به ازای هر

تن فرسایش و P قیمت محصول است. راه دیگر برای برآورد خسارت اقتصادی افت تولید محصولات کشاورزی ناشی از فرسایش استفاده از توابع تولید است (Hosseini and Ghorbani, 2014) که رابطه رگرسیونی بین میزان عملکرد محصول و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را نشان می‌دهند.

برخی مدل‌های شبیه‌ساز فرسایش و رشد گیاه نیز وجود دارند که به‌طور گسترده‌ای برای کمی‌سازی تأثیر فرسایش بر عملکرد محصول استفاده شده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل EPIC[1]، APEX[2] و CGE[3] اشاره کرد که قادرند خسارات اقتصادی بالقوه فرسایش خاک را تحت سناریوهای مختلف (مانند تغییرات کاربری زمین یا تغییرات آب‌وهوا) شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند. مدل‌های خانواده CGE قادرند تعاملات بین بخش‌های مختلف اقتصاد را در نظر بگیرند و اثرات بازخوردی فرسایش خاک بر تولید، مصرف و قیمت‌ها را در سطح کلان بر اساس تولید ناخالص داخلی[4] (GDP) برآورد کنند. محدودیت این مدل‌ها در این است که معمولاً به حجم زیادی از داده‌ها نیاز دارند و برای هر منطقه باید واسنجی شوند. به‌عنوان نمونه، Jang et al., 2021 با استفاده از مدل EPIC هزینه‌های تخریب خاک ناشی از فرسایش را در زراعت ذرت امریکا ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که حدود یک سوم مصرف سالانه کود N در ایالات‌متحده برای جبران از هدررفت حاصلخیزی خاک مزارع ذرت ناشی از فرسایش استفاده می‌شود. به‌بیان‌دیگر، در اثر فرسایش خاک سالانه بیش از نیم میلیارد دلار هزینه‌های اضافی تأمین کود به کشاورزان ایالات‌متحده وارد می‌شود. یا در مطالعه‌ای دیگر، Sartori et al. (2019) با استفاده از مدل بیوفیزیکی RUSLE و یک مدل اقتصادی، اثرات اقتصادی فرسایش آبی خاک در مقیاس جهانی را برآورد کردند. آن‌ها ابتدا میزان فرسایش خاک را با مدل RUSLE تعیین کردند و سپس با استفاده از رابطه بین فرسایش و باروری، مقدار خسارات اقتصادی ناشی از کاهش باروری خاک را برآورد کردند. نتایج نشان داد که فرسایش آبی خاک، سالانه هزینه‌ای معادل هشت میلیارد دلار بر تولید ناخالص جهان تحمیل می‌کند. علاوه بر این، کاهش تولیدات جهانی محصولات کشاورزی به میزان ۳۳/۷ میلیون تن و افزایش قیمت‌های جهانی محصولات کشاورزی ناشی از کاهش تولید بسته به گروه محصول غذایی بین ۰/۴ تا ۳/۵ درصد برآورد شد. Panagos et al. (2017) نیز هزینه خسارات فرسایش خاک در اتحادیه اروپا را به روشی مشابه ارزیابی کردند. مقادیر فرسایش خاک برای هر کشور توسط مدل RUSLE برآورد شد. سپس از خروجی مدل فرسایشی به‌عنوان ورودی مدل اقتصادی استفاده کردند و میزان کاهش تولیدات کشاورزی را شبیه‌سازی کردند. همچنین برای تخمین تأثیر فرسایش بر تولید ناخالص داخلی از یک مدل CGE استفاده کردند. یافته‌ها حاکی از آن بود که ۱۲ میلیون هکتار از مناطق کشاورزی اتحادیه اروپا تحت تأثیر فرسایش شدید هستند و این اراضی سالانه حدود ۰/۴۳ درصد از تولید محصول خود را از دست می‌دهند. هزینه‌های این مقدار کاهش در بهره‌وری تولیدات کشاورزی معادل ۱/۲۵ میلیارد یورو در سال برآورد گردید. همچنین هزینه اثرات فرسایش خاک بر تولید ناخالص داخلی حدود ۱۵۵ میلیون یورو برآورد شد.

در مطالعه‌ای دیگر، Patault et al. (2021) با استفاده از تجزیه‌وتحلیل اطلاعات مالی ارائه‌شده توسط سازمان‌ها، ادارات و مقامات منطقه‌ای یا محلی (نظیر سازمان‌های آب، شرکت‌های بیمه، شرکت‌های آب آشامیدنی، مدیران زیرساخت‌های حمل‌ونقل) مربوط به یک دوره ۲۵ ساله و همچنین بررسی منابع موجود (مقالات علمی، گزارش‌های فنی و ...) هزینه خسارات فرسایش و رواناب را به‌طور مستقیم در دو منطقه ویژه واقع در کمربند لسی اروپای شمال غربی (نورماندی، فرانسه) ارزیابی کردند. هزینه‌های بررسی‌شده شامل خسارات اجتماعی مانند مطالبات بیمه‌ای، خسارات زیست‌محیطی مانند

1 - Erosion-Productivity Impact Calculator
2 - Agricultural Policy Environmental Extender
3 - Computable General Equilibrium Models
4 - Gross Domestic Product

آلودگی آب و خسارات اقتصادی شامل تخریب زیرساخت-های جاده‌ای و ریلی و همچنین هزینه‌های پیشگیری بود. نتایج نشان داد که از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، کل هزینه خسارت از ۶۱۱ تا ۷۲۱ میلیون یورو متغیر بود. Pimentel et al. (1995) مجموع هزینه‌های خارج از محل فرسایش خاک در ایالات‌متحده را حدود ۱۷ میلیارد دلار در هر سال برآورد کردند. با توجه به کل فرسایش خاک در ایالات‌متحده که در این تحقیق چهار میلیارد تن تخمین زده شده بود، به ازای هر تن فرسایش خاک حدود چهار دلار خسارت خارج از محل ایجاد می‌شود. Li et al., 2021 با استفاده از یک مدل پیش‌بینی کننده و داده‌های گذشته، خسارات فرسایش خاک تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در شهر Cockermouth واقع در شمال غربی انگلستان بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان خسارت فرسایش به پل‌ها، جاده‌ها و ساختمان‌ها در مجموع سالانه بین ۱۱۰ تا ۲۳۰ میلیون دلار خواهد بود.

روش‌های مستقیم غیربازاری

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، چنانچه قیمت کالا و خدماتی را نتوان بر اساس بازار تعیین کرد، از روش‌های غیربازاری استفاده می‌شود. معمولاً کالا و خدماتی که در بازار قابل‌خرید و فروش نیستند مانند خدمات زیست‌محیطی (آب‌وهوای سالم یا خدمات تفرجگاهی) از این طریق ارزش‌گذاری می‌شوند. در مطالعات فرسایش خاک غالباً از دو روش قیمت‌گذاری هدانیک [1] و ارزش-گذاری مشروط [2] استفاده شده است که در ادامه تشریح شده‌اند.

روش قیمت‌گذاری هدانیک

در روش هدانیک، هزینه فرسایش خاک از میزان افت ارزش خرید یا اجاره زمین برآورد می‌شود. طبق این روش، قیمت یک زمین از دو مؤلفه تشکیل شده است: یکی خصوصیات فیزیکی و ساختاری زمین، و دیگری شرایط محیطی آن. شرایط محیطی مانند فاصله تا جاده اصلی، نزدیکی به خطوط انتقال برق و گاز، نزدیکی به منابع آبی و خطر سیل و فرسایش است. در این روش، کاهش ارزش زمین از طریق مقایسه کیفیت زمین فرسایش یافته با یک زمین فرسایش نیافته مشابه در همان منطقه از جنبه‌های مختلف مانند حاصلخیزی، زیبایی‌شناختی و هزینه‌های آماده‌سازی زمین تخمین زده می‌شود (Hertzler et al., 1985; Palmquist and Danielson, 1989; Duffy, 2012). محدودیت این روش در این است که رابطه بین کیفیت خاک و ارزش زمین به دلیل تأثیرگذاری بسیاری از عوامل دیگر مانند مکان و تقاضای بازار، بسیار پیچیده است. علاوه بر این، گاهی یافتن یک زمین فرسایش نیافته مشکل است. لذا، این روش گاهی به‌صورت غیرمستقیم و از طریق طرح پرسش‌نامه و مصاحبه با افراد انجام می‌شود.

از جمله مطالعات در این زمینه می‌توان به Costea et al. (2022) اشاره کرد که به بررسی هزینه‌های فرسایش خاک در حومه شهر جیبو[3] در کشور رومانی اقدام کردند. آن‌ها از مدل جهانی هدررفت خاک و یک مدل کیفی که مقادیر فرسایش را به پایگاه داده‌های کاربری اراضی متصل می‌کرد، استفاده نمودند. اطلاعات اراضی شامل کیفیت خاک، ضریب مرتبط با مخاطرات آب‌وهوا، کاربری و ارزش بازاری زمین بود. در نهایت، کاهش ارزش بازاری اراضی با توجه به کلاس آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر فرسایش خاک تعیین شد. بر این اساس، هزینه فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۱۴ هزار هکتار بالغ بر ۴۶۰۰۰ یورو برآورد گردید که عمدتاً ناشی از تأثیر فرسایش خاک در سطح وسیعی از باغات منطقه بود.

در مطالعه‌ای دیگر، Podhrazska et al., 2019 اثرات اقتصادی تخریب زمین‌های کشاورزی ناشی از فرسایش را در بخش جنوبی موراویا[4] در کشور جمهوری چک بررسی کردند. قیمت اراضی تحت تأثیر فرسایش در منطقه مورد مطالعه بین ۸۸ تا ۲۴۰۰ یورو در هکتار متغیر

1 - Hedonic Pricing Method
2 - Contingent Valuation Method
3 - Jibou
4 - Moravia

بود. آن‌ها خاک‌ها را بر اساس پتانسیل خطر فرسایش به هفت گروه تقسیم کردند: در گروه یک پتانسیل کاهش قیمت زمین به دلیل فرسایش بین صفر تا ۲۰ درصد و در گروه هفت بیش از ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اثرات فرسایش خاک روی چرنوزم‌ها ، شدیدتر است. همچنین نتایج نشان داد که فرسایش آبی در قطعه زمینی به مساحت ۱۰۰/۵ هکتار، واقع در ناحیه شهرداری استارویس[1]، از طریق کاهش ارزش زمین، خسارتی معادل ۹۲ هزار یورو در دوره ۱۹۷۸–۲۰۱۳ وارد کرده است. در مطالعه‌ای دیگر Caffera et al. (2019) از طریق تجزیه‌وتحلیل داده‌های ۳۵۶۳ مزرعه کشاورزی که بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ در اروگوئه معامله‌شده‌اند، قیمت ضمنی فرسایش خاک را برآورد کردند. ایشان رابطه‌ای منفی و معنی‌دار آماری بین فرسایش و ارزش زمین پیدا کردند. افزایش یک‌درصدی در تلفات خاک سطحی با کاهش ۰/۲۲ درصدی در قیمت هر هکتار زمین کشاورزی همراه بود که با توجه به متوسط قیمت هر هکتار زمین کشاورزی تقریباً معادل ۷/۷ دلار به دست آمد. Duffy (2012) با استفاده از تجزیه‌وتحلیل اطلاعات پایگاه داده‌های تفسیری خاک آیووا (ISPAID) و همچنین پایگاه داده‌های اجاره‌بهای اراضی، اقدام به ارزیابی اثرات اقتصادی فرسایش خاک نمود. تجزیه و تحلیل نرخ اجاره‌بهای زمین‌های کشاورزی ۲۰ شهرستان با توجه به متوسط عملکرد آن‌ها در تولید ذرت و سویا و همچنین درجه فرسایش نشان داد که فرسایش خاک سالانه خسارتی معادل ۱۰ الی ۱۵ دلار به ازای هر جریب به ارزش اجاره بهای‌زمین وارد می‌کند.

رویکرد ارزش‌گذاری مشروط

ارزش‌گذاری مشروط یا ترجیحی، یک روش اقتصادی بر پایه نظرسنجی است که اغلب برای تخمین ارزش کالاها و خدماتی که در بازارها معامله نمی‌شوند، استفاده می‌شود. نمونه‌ای از کاربرد آن در ارزش‌گذاری مزایای زیست‌محیطی مانند آب، خاک و هوای سالم است. در این رویکرد، هزینه فرسایش خاک از طریق مصاحبه با افراد درباره میزان تمایل آن‌ها به پرداخت وجه[2] برای جلوگیری یا کاهش فرسایش خاک یا میزان تمایل آن‌ها به پذیرش غرامت[3] بابت از دست دادن یک کالا یا خدمت مشخص تعیین می‌شود (Gorlach et al., 2004; Schwegler, 2014). در این نوع نظرسنجی معمولاً سؤالاتی در مورد ترجیحات و آمادگی پاسخ‌دهندگان به تخصیص منابع مالی برای اقدامات کنترل فرسایش پرسیده می‌شود. به‌عنوان‌مثال، یک نظرسنجی ممکن است از ساکنان بپرسد که برای بهبود کنترل فرسایش در منطقه خود چقدر حاضر است مالیات بیش‌تری بپردازد. روش ارزش‌گذاری ترجیحی بر این فرض تکیه دارد که ترجیحات اعلام‌شده از سوی افراد منعکس‌کننده ارزش واقعی هزینه‌های فرسایش است. احتمال سوگیری در پاسخ‌های نظرسنجی و دشواری در اندازه‌گیری دقیق تمایلات افراد به پرداخت، از جمله محدودیت‌های این روش است. همچنین پیچیدگی در طراحی، انتخاب افراد پاسخ‌دهنده و تحلیل نظرسنجی می‌تواند کاربرد این روش را با چالش رو به رو کند. در این خصوص، Bhandari et al. (2012) با استفاده از یک مدل فرسایشی و تجزیه‌وتحلیل ترجیحات افراد از طریق پرسشنامه و بحث‌های گروهی کارشناسان اثرات فرسایش بر بهره‌وری کشاورزی را در یک حوزه آبخیز واقع در نپال بررسی کردند. بررسی حجم تولیدات کشاورزی، سطح زیر کشت و نرخ بهره‌وری زمین‌های کشاورزی در یک دوره پنج‌ساله (از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹) نشان داد که سطح زیر کشت از نظر عددی با میانگین ۲/۹۶ هکتار در سال کاهش یافته است. به همین ترتیب، میزان تولیدات کشاورزی با نرخ ۳۱/۸ تن در سال و بهره‌وری با نرخ ۲۳۸ کیلوگرم در هکتار در سال کاهش یافته است. از نظر کشاورزان، فرسایش خاک سطحی و تشکیل خندق در زمین‌های زراعی عوامل اصلی کاهش تولید و بهره‌وری کشاورزی بودند. Almansa et al. (2012) از این رویکرد برای ارزیابی اقتصادی اقدامات حفاظت خاک در لوبرین اسپانیا با

1 - Starovice
2 - Willingness to Pay
3 - Willingness to Accept

مساحت ۸۸ کیلومترمربع استفاده کردند. میزان فرسایش خاک در این منطقه در کلاس زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد. بر اساس تجزیه‌وتحلیل نظرسنجی انجام شده، درصد بالایی از افراد تمایل به پرداخت پول جهت اجرای برنامه‌های حفاظت خاک داشتند و افراد مقیم در منطقه به‌طور متوسط حاضر به پرداخت مبلغی معادل ۱۰۴ یورو در سال بودند. اخیراً، Mumeni Landi and Karimi Organi, (2023) از روش ارزش‌گذاری مشروط برای تعیین ارزش حفاظتی منطقه جنگلی شیمبار واقع در شرق استان خوزستان استفاده کردند.

روش‌های غیرمستقیم

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، چنانچه امکان تعیین قیمت یا ارزش کالا و خدمات آسیب‌دیده به‌صورت مستقیم وجود نداشته باشد، از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. تکنیک هزینه جایگزین و هزینه اجتناب دو مورد از رایج‌ترین تکنیک‌های غیرمستقیم برای برآورد خسارات فرسایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Pröbstl-Haider, 2015)، که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

روش هزینه جایگزینی

این روش که اغلب برای تعیین خسارات برجا به کار رفته است، شامل احیا و اصلاح خاک سطحی فرسایش یافته از طریق افزودن خاک جدید یا عناصر غذایی است (Enters, 1998) در این تکنیک، عواملی مانند هزینه منبع‌یابی و تهیه خاک جدید، انتقال آن به منطقه آسیب‌دیده و پخش آن برای بازگرداندن بهره‌وری خاک در نظر گرفته می‌شود (Gorlach at al., 2004). هزینه‌های جایگزینی، بسته به ویژگی‌های خاک و منطقه مورد مطالعه می‌تواند متفاوت باشد که یکی از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. علاوه بر این، سایر اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی فرسایش خاک را در نظر نمی‌گیرد. چراکه، اغلب پژوهشگران هنگام استفاده از این رویکرد، فقط هزینه جایگزینی عناصر غذایی تلف‌شده خاک را در نظر گرفته‌اند و از سایر محتویات خاک مانند ترکیبات آلی و زیستی چشم‌پوشی کرده‌اند. لذا، تحت این شرایط هزینه برآوردی بسیار کمتر از ارزش واقعی خاک از بین رفته خواهد بود. زیرا، خاک علاوه بر کارکرد ارائه عناصر غذایی، کارکردهای و دارایی‌های با ارزش دیگری نیز دارد. شکل کلی معادله مورد استفاده در این رویکرد در معادله ۲ نشان داده شده است (Möller and Ranke, 2006):

$$RC_i = (S_t - S_{t+1}) \sum N_{ij}\, P_j + C_{il} + C_{ir} \qquad (۲)$$

که در آن، RCi هزینه جایگزینی مواد غذایی در واحد کاربری iام بر حسب دلار در هکتار؛ (St – St-1) مقدار خاک فرسایش یافته از زمان t تا t+1 بر حسب تن در هکتار؛ Nij غلظت عنصر غذایی j در هر واحد کاربری، P_j قیمت عنصر j، C_{il} هزینه نیروی انسانی برای توزیع عنصر j و C_r هزینه حمل‌ونقل و استفاده از ماشین‌آلات است.

به دلیل سادگی روش و در دسترس بودن داده‌ها، مطالعات زیادی از این رویکرد استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، Emadodin and Bork (2012) میزان خسارت فرسایش خاک را بر اساس میزان هدررفت عناصر غذایی از اراضی کشاورزی ایران (۱۶ میلیون هکتار) حدود ۲/۷ میلیارد دلار تخمین زدند. این رقم با در نظر گرفتن فرسایشی معادل ۵۰۰ میلیون تن محاسبه‌شده، یعنی به ازای هر تن فرسایش حدود ۵/۴ دلار هزینه هدررفت عناصر غذایی خواهد بود. باید توجه کرد که در این تحقیق از بسیاری از خسارات فرسایش خاک مانند تخریب فیزیکی خاک، کاهش ذخیره آب و سایر خسارات خارج از محل چشم‌پوشی شده است. Rastgar et al., 2016 با استفاده از مدل RUSLE و رویکرد هزینه جایگزینی، هزینه اقتصادی هدررفت عناصر غذایی خاک از مراتع شمال ایران را ۲/۶ دلار به ازای هر تن فرسایش تخمین زدند. در مطالعه‌ای دیگر، Ziyaei Jazi and Bidaki (2019) هزینه هدررفت عناصر غذایی به ازای هر تن فرسایش در اراضی دیم استان چهارمحال و بختیاری را ۲۵۰ هزار تومان و در مراتع ۱۸۰ هزار تومان برآورد کردند.

طبق برآورد Rickson et al. (2019) در اسکاتلند، از نظر هدررفت عناصر غذایی به ازای هر تن

فرسایش خاک حدود نه یورو خسارت به خاک وارد می‌شود. همچنین، Graves at al. (2015) هزینه هدررفت عناصر غذایی در انگلستان و ولز را به ازای هر تن خاک حدود ۱۳ یورو برآورد کردند. این درحالی‌است که متوسط مقدار فرسایش در این کشورها کمتر از یک تن در هکتار در سال گزارش شده است. Agheli and Sadeghi, (2005) با استفاده از تکنیک هزینه جایگزینی میزان خسارات اقتصادی فرسایش خاک در ایران حدود ۲۲۵۹۰ میلیارد ریال برآورد کردند. این میزان خسارت در سال ۱۳۷۹ تقریباً معادل با ۳۱ درصد ارزش‌افزوده بخش کشاورزی، شکار و جنگل‌داری بود.در این مطالعه، از بین رفتن عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌عنوان مهم‌ترین خسارت برجا و تولید رسوب و کاهش ظرفیت سدها به‌عنوان اصلی‌ترین خسارت خارج از محل در نظر گرفته شد. از این مقدار خسارت، حدود ۲۰۷۷۹ میلیارد ریال مربوط به خسارت برجا و مابقی مربوط به خسارت خارج از محل بود. روش هزینه اجتناب در رویکرد هزینه اجتناب، هزینه اجرای اقدامات پیشگیری از فرسایش خاک مانند کاشت گیاهان پوششی، ساخت تراس و نصب حوضچه‌های رسوبی به‌عنوان خسارت فرسایش در نظر گرفته می‌شود (Dimal, 2019). از این رویکرد اغلب برای ارزیابی خسارات خارج از محل استفاده شده است. از جمله محدودیت‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: الف) هزینه اجرای اقدامات پیشگیری از فرسایش خاک بسته به نوع و مقیاس اقدامات و همچنین محدودیت‌های عملی اجرای چنین اقداماتی در مناطق یا کاربری‌های خاص می‌تواند بسیار متفاوت باشد و ب) اثربخشی اقدامات نیز باید در نظر گرفته شود، زیرا در برخی موارد، اقدامات ممکن است به‌طور کامل از فرسایش خاک جلوگیری نکند. عدم نیاز به داده‌های مربوط به خسارات و همچنین قیمت‌گذاری آسان، از جمله مزیت‌های این روش هستند. به همین دلیل برای مناطق فاقد داده، کاربرد دارد. در این خصوص Patault et al., 2021 در دو بخش یورو[1] و سین–مارتیم[2] واقع در کمربند شمال غرب اروپا هزینه‌هایی کنترل فرسایش خاک و رواناب را به ترتیب ۳۰۰ و ۸۵ میلیون یورو برآورد کردند. هزینه‌های کنترل فرسایش شامل هزینه‌های اقدامات حفاظتی و هزینه‌های نگهداری از آن‌ها بود. Rastgar et al., 2016 مجموع هزینه‌های اجتناب از خسارت در حوزه آبخیز سد لار در شمال ایران را ۳۶۵ هزار دلار برآورد کردند. در این روش، مقدار هزینه فرسایش از معادله ۳ به‌دست می‌آید.

$$SEC = AC = \frac{MS+BM+PC}{N} \qquad (۳)$$

که در آن، SCE هزینه سالانه فرسایش خاک، AC هزینه اجتناب، MS هزینه ساخت سازه‌های مکانیکی، BM هزینه اقدامات بیولوژیکی و PC هزینه نگهداری و ترمیم اقدامات و N عمر مفید پروژه است.

چارچوب و چالش‌های ارزیابی خسارات فرسایش خاک

با توجه به طبیعت بسیار پیچیده فرایند فرسایش و عوامل تأثیرگذار بر آن و همچنین تنوع بسیار زیاد خسارات آن به‌عنوان تابعی از شرایط منطقه و نوع فرسایش، ارائه یک چارچوب مشخص با تمام جزییات جهت ارزیابی خسارات انواع فرسایش تحت شرایط محیطی مختلف امکان‌پذیر نیست. بااین‌حال، ارائه یک چارچوب کلی به‌عنوان نقشه راه می‌تواند ارزشمند باشد. بر اساس مطالعات انجام‌شده، ارزیابی خسارات فرسایش خاک از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند(شکل ۳): ۱) تعیین (اندازه‌گیری یا برآورد) مقدار فرسایش، ۲) شناسایی و اولویت‌بندی خسارات فرسایش، و ۳) کمی‌سازی و قیمت‌گذاری خسارات فرسایش. علی‌رغم سادگی این چهارچوب، اما هر کدام از مراحل فوق با چالش‌های اساسی همراه هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

تعیین فرسایش خاک: علی‌رغم پیشرفت‌های بسیار زیاد در مطالعات فرسایش خاک اما تلاش‌ها برای اندازه‌گیری تلفات خاک مخصوصاً در عرصه‌های وسیع تاکنون ناکام مانده است. علت اصلی آن گستردگی دامنه

1 - Eure

2 - Seine-Maritime

فعالیت فرایند فرسایش است که از قله کوه‌ها شروع‌شده و به دشت‌ها و دره‌ها و نهایتاً رودخانه‌ها ختم می‌شود. دامنه فعالیت فرسایش بادی می‌تواند بسیار گسترده‌تر باشد. لذا، اندازه‌گیری آن در آزمایشگاه و یا سطوح طبیعی کوچک نمی‌تواند نماینده کل منطقه باشد. استفاده از مدل‌های شبیه-ساز نیز مقدار فرسایش را برآورد می‌کنند و نتایج آن‌ها نسبت به واقعیت همواره با خطا و عدم قطعیت همراه است.

لذا، اولین چالش پیش‌رو در مطالعات ارزیابی خسارات فرسایش، اندازه‌گیری خود آن است. از سوی دیگر، در یک حوزه آبخیز ممکن است انواع شکل‌های فرسایش به‌شکل درهم‌تنیده‌ای فعال باشند، که اندازه‌گیری یا برآورد هر کدام نیاز به تجهیزات و تکنیک‌های خاص دارد.

شکل ۳- چارچوب کلی ارزیابی جامع خسارات فرسایش خاک

Figure 3- flowchart of comprehensive assessment of soil erosion damages

شناسایی و اولویت‌بندی خسارات فرسایش: همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شد، فرسایش خاک دارای خسارات بسیار متنوع و متعددی است که اندازه‌گیری و کمی‌سازی همه آن‌ها هم از بعد فنی و هم از بعد اقتصادی امکان‌پذیر نیست. برخی از خسارات فرسایش خاک مانند کاهش تنوع زیستی یا افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط‌زیست عملاً کار دشواری است و نیاز به تجهیزات و داده‌های خاصی دارد که همه‌جا در دسترس نیستند. از سوی دیگر، خسارات فرسایش در همه مناطق و زیرحوزه‌ها یکسان نیست و هر نوع فرسایش، خسارات خاص خود را دارد. لذا، پیشنهاد می‌شود در مطالعات خسارات فرسایش خاک، قبل از هر اقدامی نوع/انواع غالب فرسایش در منطقه و همچنین خسارات اصلی موجود در منطقه بر اساس نظرات کارشناسی و یا مشاهدات میدانی شناسایی و اولویت‌بندی شوند. نکته مهم دیگر در رابطه با خسارات فرسایش، توجه به همپوشانی بین آن‌هاست که اگر دقت نشود بیش‌برآوردی ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال، هدررفت عناصر غذایی با کاهش توان تولید خاک در ارتباط است. به بیان دیگر، هدررفت عناصر غذایی خاک علت کاهش توان تولید خاک است. لذا، در نظر گرفتن این دو به‌عنوان خسارات جداگانه منجر به بیش‌برآوردی می‌شود. یا در خصوص خسارات خارج از محل، آلودگی محیط‌زیست و بیماری‌ها با هم در ارتباط هستند و تفکیک آن‌ها به‌عنوان دو خسارت مجزا و سپس تجمیع هزینه آن‌ها ممکن است گمراه‌کننده باشد.

قیمت‌گذاری خسارات فرسایش: به نظر می‌رسد که قیمت‌گذاری یکی از مهم‌ترین چالش‌های مطالعات ارزیابی خسارات فرسایش است. زیرا، قیمت‌گذاری خسارات فرسایش، مشابه آن چیزی که در مورد اندازه‌گیری خود فرسایش وجود دارد، روش‌شناسی مشخصی بیان نشده و رویکردهای متنوعی وجود دارد که الزاماً نتایج یکسانی ندارند. به‌عنوان نمونه، برای تعیین اثرات فرسایش بر توان تولید خاک، برخی از پژوهشگران قیمت عناصر غذایی هدررفته و برخی قیمت محصول از دست رفته را در نظر گرفته‌اند. هرچند از نظر منطقی هر دو صحیح هستند، اما نتایج آن‌ها کاملاً متفاوت بوده و قابل مقایسه نیستند. از سوی دیگر، برخی از خسارات فرسایش مانند از بین رفتن تنوع زیستی و یا آسیب‌های بهداشتی و سلامتی به‌راحتی قابل قیمت‌گذاری نیستند. این نوع خسارات نه تنها از نظر اندازه‌گیری بلکه از نظر نحوه قیمت‌گذاری محدودیت‌هایی دارند. یا در مورد تلفات کانی‌های رسی (کلوئیدها) و کاهش نفوذ و ذخیره آب به داخل خاک، تاکنون قیمت‌گذاری انجام نشده است. به‌طورکلی، برای آن دسته از خساراتی که کالاها یا خدمات مرتبط با آن‌ها در بازار قابل خریدوفروش هستند (مانند افت محصول یا هدررفت عناصر غذایی، ارزش زمین و تخریب جاده‌ها و ...) از روش‌های مستقیم مبتنی بر بازار (Koetse et al., 2015) ، و برای آن دسته از خساراتی که کالا یا خدمات مرتبط با آن‌ها غیرقابل خرید و فروش است (مانند آلودگی محیط‌زیست، خطر سیل، تنوع زیستی، جنبه زیباشناختی مناظر و غیره) روش‌های مستقیم غیربازاری کاربرد دارند (Ezebilo, 2016; Carson and Bergstrom, 2003). چنانچه به هر دلیلی از جمله عدم دسترسی به داده‌های مربوط به خسارات نتوان از روش‌های مستقیم استفاده کرد، روش‌های غیرمستقیم مانند هزینه اجتناب توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ارزیابی اقتصادی اثرات فرسایش خاک برای جامعه بسیار مهم است. آگاهی از هزینه خسارات فرسایش خاک از دو جنبه حائز اهمیت است: الف) برنامه‌ریزی و طراحی سیاست‌های تشویقی حفاظت خاک و ب) هشدار و تبیین قوانین بازدارندگی تخریب خاک. این پژوهش با هدف بررسی روش‌ها و رویکردهای موجود برای ارزیابی خسارات فرسایش خاک و همچنین شناسایی محدودیت‌ها و مزایای آن‌ها جهت دست‌یابی به یک چارچوب کلی و کاربردی انجام شد. به‌طور کلی، خسارات فرسایش را می‌توان به دو گروه خسارات درجا و خسارات خارج از محل تقسیم کرد. تخریب و کاهش کیفیت خاک اصلی‌ترین خسارت درجا و آلودگی محیط‌زیست معمول‌ترین خسارت

خارج از محل به‌شمار می‌رود. نتایج برخی مطالعات نشان داد که در برخی مناطق خسارات خارج از محل نسبت به خسارات درجا اهمیت بیشتری دارند. خسارات فرسایش خاک بسیار متنوع هستند و تا حد زیادی به نوع فرسایش و شرایط منطقه بستگی دارند.

بررسی منابع نشان داد ارزیابی خسارات فرسایش خاک به دو روش کلی انجام می‌گیرد: مستقیم و غیرمستقیم. در روش مستقیم بسته به نوع خسارت از دو شیوه قیمت-گذاری مبتنی بر بازار و غیربازاری (هدانیک و مشروط) استفاده می‌شود. درحالی‌که، در روش غیرمستقیم معمولاً دو رویکرد هزینه جایگزینی و هزینه اجتناب به‌کار گرفته می-شود. هر کدام از روش‌های مذکور محدودیت‌های خاص خود را داشته و الزاماً نتایج آن‌ها با هم سازگاری ندارد. زیرا، پایه و اساس آن‌ها کاملاً متفاوت است. هرچند که نتایج روش‌های مستقیم به واقعیت نزدیک‌ترند، اما به بانک داده‌ای گسترده‌ای نیاز دارند. در عوض، روش‌های غیرمستقیم با هزینه و زمان کمتر نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند. در کل، با توجه به مسئله کمبود داده و هزینه‌های هنگفت نمونه‌برداری در کشور، از بین روش‌های موجود، روش هزینه اجتناب به دلایل زیر توصیه می‌شود.

کلیه هزینه‌های درجا و خارج از محل را به‌شکل یکپارچه و واحد در نظر می‌گیرد. نیازی به پایگاه داده‌ای وسیع و یا نمونه‌برداری ندارد. برای شکل‌های مختلف فرسایش خاک قابل استفاده است. قیمت‌گذاری آن بر اساس بازار بوده و به‌راحتی قابل محاسبه است. قابلیت استفاده برای تمام مناطق و مقیاس‌ها را دارد.

با توجه به این‌که در هر حوزه آبخیز شدت و نوع فرایند فرسایش و همچنین خسارات آن منحصربه‌فرد است، ارائه یک چارچوب و روش‌شناسی واحد که برای همه مناطق قابلیت کاربرد داشته باشد، امکان‌پذیر نیست. با این-حال، چارچوب کلی که بتوان برای مطالعات ارزیابی خسارات فرسایش خاک پیشنهاد داد از سه بخش تشکیل شده: ۱) تعیین (اندازه‌گیری یا برآورد) مقدار فرسایش خاک، ۲) شناسایی و اولویت‌بندی خسارات موجود در منطقه و ۳) قیمت‌گذاری خسارات. هر کدام از این بخش‌ها با چالش‌های جدی مواجه هستند. چالش اول، عدم وجود یک روش یا مدل استاندارد برای تعیین فرسایش خاک در تمام عرصه‌های مختلف است. چالش دوم این‌که خسارات فرسایش در هر منطقه بسته به نوع فرسایش و ویژگی‌های بیوفیزیکی- اجتماعی و اقتصادی منطقه متفاوت است، و چالش سوم نیز عدم وجود یک شیوه قیمت‌گذاری مشخص برای هر نوع خسارت است. از سوی دیگر، قیمت‌گذاری برخی از خسارات فرسایش خاک مانند آلودگی هوا یا کاهش تنوع زیستی به‌راحتی قابل انجام نیست. با این‌حال، به نظر می‌رسد طبق چارچوب کلی فوق بتوان برای هر یک از شکل‌های مختلف فرسایش یک روش‌شناسی و چارچوب خاص ارائه داد. همچنین، نویسندگان مقاله معتقدند که ارزش‌گذاری (قیمت‌گذاری) خاک‌ها بر اساس شاخص‌های کیفیت خاک یا کلاس اراضی می‌توانند به‌عنوان یک رویکرد مفید و کاربردی برای ارزیابی خسارات فرسایش خاک به‌ویژه خسارات برجا، مورد استفاده قرار بگیرد. لذا، پیشنهاد می‌شود اقدامات لازم برای انجام این مهم صورت پذیرد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

References

1. Adhikari, B. and Nadella, K., 2011. Ecological economics of soil erosion: a review of the current state of knowledge. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1219*(1), pp.134-152. **doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05910.x**
2. Adhikari, K. and Hartemink, A.E., 2016. Linking soils to ecosystem services. A global review. *Geoderma*, *262*, pp.101-111. **https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009**

3. Agheli, K.S.L. and Sadeghi, H., 2005. Estimation of economic effects of soil erosion in Iran. Journal of Sustainable Growth and Development (the economic research), 5(15), 87-100. (in Persian)
4. Alfsen, K.H., Bye, T., GLOMSROeD, S.O.L.V.E.I.G. and Wiig, H., 1997. Soil degradation and economic development in Ghana. *Environment and Development Economics*, *2*(2), pp.119-143.
5. Alimohammadlou, Y., Najafi, A. and Yalcin, A., 2013. Landslide process and impacts: A proposed classification method. Catena, 104, pp.219-232. **https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.013**
6. Almansa, C., Calatrava, J. and Martínez-Paz, J.M., 2012. Extending the framework of the economic evaluation of erosion control actions in Mediterranean basins. *Land Use Policy*, *29*(2), pp.294-308. **https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.06.013**
7. Amaral Sobrinho, N.M.B.D. and Mazur, N., 2005. Soil preparation and nutrient losses by erosion in the culture cucumber. *Scientia Agricola*, *62*, pp.572-577. **DOI: 10.1590/S0103-90162005000600010**
8. Arabkhedri, M., 2021. Water erosion and sediment production status in Iran: Statistical and comparative analyses. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 6(2), pp.139-156. (in Persian) 10.22047/SRJASNR.2021.140574
9. Asadi, H., 2022. A Critical Report on Several Decades' Activities in the Universities, Research Institutes and Executive Organizations in the Field of Soil Erosion and Conservation in Iran, Iranian Journal of Soil and Water Research, 53(2), pp. 411-433. (in Persian) **doi: 10.22059/ijswr.2022.337663.669190**
10. Asadi, H., Besharati, H. and Gorji, M., 2022. Challenges and Limitations of Soil and Land Resources in Iran, Land Management Journal, 10(1), pp. 111-134. (in Persian) **doi: 10.22092/lmj.2022.358760.309**
11. Asfaw, S., Orecchia, C., Pallante, G., and Palma, A., 2018. Soil and nutrients loss in Malawi: an economic assessment. www.fao.org/publications.
12. Asfaw, S., Pallante G. and Palma A., 2020. Distributional impacts of soil erosion on agricultural productivity and welfare in Malawi, Ecological Economics, Volume 177, 106764, ISSN 0921-8009.
13. Bakker, M. M., Govers, G., and Rounsevell, M. D., 2004. The crop productivity–erosion relationship: an analysis based on experimental work. Catena, 57(1), 55-76. **https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.07.002**
14. Bakker, M. M., Govers, G., Jones, R. A., and Rounsevell, M. D., 2007. The effect of soil erosion on Europe's crop yields. Ecosystems, 10, 1209-1219. **https://doi.org/10.1007/s10021-007-9090-3**
15. Bandara, J.S., Chisholm, A., Ekanayake, A., Jayasuriya, S., 2001. Environmental cost of soil erosion in Sri Lanka: tax/subsidy policy options. Environmental Modelling & Software. 16(6): p. 497-508.
16. Barbier, E.B. and Bishop, J.T., 1995. Economic values and incentives affecting soil and water conservation in developing countries. Journal of Soil and Water Conservation (March-April): 133-137.
17. Bartkowski, B., Schepanski, K., Bredenbeck, S., and Müller, B., 2022. Wind erosion in European agricultural landscapes: More than physics. People Nat., *5*, 34–44.
18. Beek, R.V., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S.B. and Dorren, L., 2008. Hillslope processes: Mass wasting, slope stability and erosion. *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions*, pp.17-64.
19. Bhandari, D., Joshi, R., Regmi, R. R., and Awasthi, N., 2021. Assessment of soil erosion and its impact on agricultural productivity by using the RMMF model and local perception: A case study of Rangun watershed of Mid-Hills, Nepal. Applied and Environmental Soil Science, 2021, 1-10.
20. Bhuiyan, M.A.H., Islam, S.M.DU., and Azam, G., 2017. Exploring impacts and livelihood vulnerability of riverbank erosion hazard among rural household along the river Padma of Bangladesh. Environ Syst Res 6, 25. **https://doi.org/10.1186/s40068-017-0102-9**

21. Blanco, H. and Lal, R., 2008. *Principles of soil conservation and management* (Vol. 167169). New York: Springer.
22. Blum, W. E., 2005. Functions of soil for society and the environment. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 4, 75-79.
23. Boardman, J. and Poesen, J., 2006. Soil Erosion in Europe: Major Processes, Causes and Consequences. Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons, pp. 477–487 ISBN-13 978 0-470-85910-0.
24. Boardman, J., 2006. Soil erosion science: reflections on the limitations of current approaches. Catena 68: 73-86.
25. Bojo, J., and Cassells, D., 1995. Land Degradation and Rehabilitation in Ethiopia: A Reassessment. AFTES Working Paper No. 17. World Bank, Washington DC.
26. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., and Panagos, P., 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. Science of the total environment, 780, 146494.
27. Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V. and Bagarello, V., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, *8*(1), pp.1-13.
28. Catma, S., 2021. The Price of Coastal Erosion and Flood Risk: A Hedonic Pricing Approach. Oceans. 2(1):149-161. **https://doi.org/10.3390/oceans2010009**
29. Colacicco, D., Osborn, T. and Alt, K., 1989. Economic damage from soil erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 44(1), pp.35-39.
30. Colombo, S., and Calatrava, J., 2002. The off-site effects of soil erosion: a contingent valuation approach to consider them. Sustainable Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Regions, Quaderna Editorial (II), 242-244.
31. Costea, A., Bilasco, S., Irimus, I. A., Rosca, S., Vescan, I., Fodorean, I. and Sestras, P., 2022. Evaluation of the Risk Induced by Soil Erosion on Land Use. Case Study: Guruslău Depression. Sustainability, 14(2), 652.
32. Crosson, P., 1997. Will erosion threaten agricultural productivity? Environment 39: 4-31.
33. Daily, G.C., Matson, P.A. and Vitousek, P.M., 1997. Ecosystem services supplied by soil. In: Daily, G.C. (Ed.), Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press, Washington, DC, pp. 113–132.
34. Das, R., and Samanta, G., 2023. Impact of floods and river-bank erosion on the riverine people in Manikchak Block of Malda District, West Bengal. Environment, development and sustainability, 25(11), 13595-13617.
35. Del Soldato, M., Di Martire, D., Bianchini, S., Tomás, R., De Vita, P., Ramondini, M., Casagli, N. and Calcaterra, D., 2019. Assessment of landslide-induced damage to structures: the Agnone landslide case study (southern Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *78*, pp.2387-2408.
36. Dimal, M. O. L., 2015. Integrating Participation in Estimating Soil's Economic Value. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 2018, 1– 9.
37. Dominati, E., Patterson, M. and Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics*, *69*(9), pp.1858-1868.
38. Dominati, Estelle J., 2013. 'Natural Capital and Ecosystem Services of Soils', Ecosystem Services in New Zealand—Conditions and Trends. Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand, pp. 132–142.
39. Dou, X., Ma, X., Zhao, C., Li, J., Yan, Y., & Zhu, J., 2022. Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. Catena, 212, 106056.
40. Duffy, M., (2012). Value of Soil Erosion to the Land Owner. Staff General Research Papers Archive 34959, Iowa State University, Department of Economics.
41. Eaton D., 1996. The economics of soil erosion: A model of farm decision – Making. International Institute for environment and Development, Environmental Economics Programme. Discussion papers, 24134.

42. Ekhtesasi, M.R. and Jahanbakhshi, F., 2016. Models and tools for estimating and measuring wind erosion and dust storms. *Yazd University*. (in Persian)
43. Emadodin, I., and Bork, H. R., 2012. Degradation of soils as a result of long-term human-induced transformation of the environment in Iran: an overview. Journal of land use science, 7(2), 203-219.
44. Enters, T., 1998. Methods for the economic assessment of the on- and off-site impacts of soil erosion. International Board for Soil Research and Management. Issues in Sustainable Land Management no. 2. Bangkok: IBSRAM.
45. Ezebilo, E. E., 2016. Economic value of a non-market ecosystem service: an application of the travel cost method to nature recreation in Sweden. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 12(4), 314–327. **https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1202322**
46. Faber, J.H., and van Wensem, J., 2012. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. Sci. Total Environ. 415, 3–8.
47. García, A.; Ibáñez, J.J. and Bello, A., 2003. Soil functions, soil quality or soil health. Scientific, metaphorical or utilitarian concepts in soil sciences. In: Lobo, M.C. & Ibáñez, J.J. (Eds.). Preserving soil quality and soil biodiversity. The role of surrogate's indicators. Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria. Centro de CC. Medioambientales. Madrid.
48. Goossens, D., 2003. On-site and off-site effects of wind erosion. In: Wind Erosion on Agricultural Land in Europe (Ed. A. Warren). European Commission, DirectorateGeneral for Research, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 29-38
49. Gorlach, B., Landgrebe-Trinkunaite, R., Interweis, E., Bouzit, M., Darmendrail, D. and Rinaudo, J., 2004, Assessing the Economic Impacts of Soil Degradation, Final Report to European Commission. DG Environment. ENV.B.1/ETU/2003/0024, Ecologic, Berlin, Germany.
50. Govers, G., Poesen, J. and Goossens, D., 2004. Soil erosion-processes, damages and countermeasures. In *managing soil quality: Challenges in modern agriculture* (pp. 199-217). Wallingford UK: CABI Publishing.
51. Graves, A.R. Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., Harris, J.A., Farewell, T. and Truckle, I., 2015. The total costs of soil degradation in England and Wales. Ecological Economics, 119: 399-413.
52. Guerra, C. A., Rosa, I. M., Valentini, E., Wolf, F., Filipponi, F., Karger, D. N. and Eisenhauer, N., 2020. Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. Landscape ecology, 35, 823-842.
53. Hassen, G., and Bantider, A., 2020. Assessment of drivers and dynamics of gully erosion in case of Tabota Koromo and Koromo Danshe watersheds, South Central Ethiopia. Geoenvironmental Disasters, 7(1), 5.
54. Haygarth, P.M. and Ritz, K., 2009. The future of soils and land use in the UK: soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land use policy*, *26*, pp.S187-S197.
55. Heckrath, G., Djurhuus, J., Quine, T. A., Van, O. K., Govers, G., and Zhang, Y., 2005. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *Journal of Environmental Quality*, 34(1), 312–324.
56. Hertzler, G.; Ibañez-Meier, C.A.; Jolly, R.W., 1985. User costs of soil erosion and their effect on agricultural land prices: cost variables and capitalized Hamiltonians. American Journal of Agricultural Economics 67: 948-953.
57. Hosseini, S.S., and Ghorbani, M., 2014. Economics of soil erosion. Publications of Ferdowsi University of Mashhad. The fifth chapter. Page 77. Shabak 6-090-386-964. (in Persian)
58. Huszar, P.C. and Piper, S.L., 1986. Estimating the off-site costs of wind erosion in New Mexico. *Journal of Soil and Water Conservation*, *41*(6), pp.414-416.
59. Jang, W. S., Neff, J. C., Im, Y., Doro, L., and Herrick, J. E., 2021. The hidden costs of land degradation in US maize agriculture. Earth's Future, 9(2), e2020EF001641.

60. Jayasuriya, R.T., 2003. Measurement of the scarcity of soil in agriculture. Resources Policy 29: 119-129.
61. Jónsson, J. Ö. G., and Davíðsdóttir, B., 2016. Classification and valuation of soil ecosystem services. Agricultural Systems, 145, 24-38.
62. Kefi, M.; Yoshino, K.; City, T., 2010. Evaluation of the Economic Effects of Soil Erosion Risk on Agricultural Productivity Using Remote Sensing: Case of Watershed in Tunisia. Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci. 38, 930.
63. Kim, H.G., Lee, D.K., and Park, C., 2018. Assessing the Cost of Damage and Effect of Adaptation to Landslides Considering Climate Change. *Sustainability 10,* 1628. **https://doi.org/10.3390/su10051628**
64. Koetse, M.J., Brouwer, R. and van Beukering, P.J.H., 2015. Economic Valuation Methods for Ecosystem Services. In Ecosystem Services; Bouma, J.A., van Beukering, P.J.H., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 108–131. ISBN 978-1-107-47761-2.
65. Kuhlman, T., Reinhard, S. and Gaaff, A., 2010. Estimating the costs and benefits of soil conservation in Europe. Land Use Policy 27: 22-32.
66. Kuhwald, M., Busche, F., Saggau, P., and Duttmann, R., 2022. Is soil loss due to crop harvesting the most disregarded soil erosion process? A review of harvest erosion. Soil and Tillage Research, 215, 105213.
67. Lal R., 1998. Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality, Critical Reviews in Plant Sciences, 17:4, 319-464,
68. Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. Land degradation & Development, 12, 519-539.
69. Lal, R., 2017. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In *Soil erosion research methods* (pp. 1-10). Routledge.
70. Lal, R., 2018. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO 2. Soil and Tillage Research. **doi:10.1016/j.still.2018.02.001**
71. Lal, R., 2020. "Soil Erosion and Gaseous Emissions" Applied Sciences 10, no. 8: 2784. **https://doi.org/10.3390/app10082784**
72. Li, X., Cooper, J. R., and Plater, A. J., 2021. Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate. Climate Risk Management, 32, 100287.
73. Lindstrom, M.J., Lobb, D.A. and Schumacher, T.E., 2001. Tillage erosion: an overview. *Annals of Arid Zone*, *40*(3).
74. Mandal, D., Patra, S., Sharma, N. K., Alam, N. M., Jana, C., and Lal, R., 2023. Impacts of Soil Erosion on Soil Quality and Agricultural Sustainability in the North-Western Himalayan Region of India. Sustainability, 15(6), 5430.
75. Mohammadi, S., Balouei, F., Haji, K., Khaledi Darvishan, A. and Karydas, C.G., 2021. Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. International Journal of Digital Earth, 14(8), pp.1019-1039.
76. Möller, A. and Ranke, U., 2006. Estimation of the on-farm-costs of soil erosion in Sleman, Indonesia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *89*.
77. Montgomery, D.R., 2007. Dirt: The Erosion of Civilizations; University of California Press: Berkeley, CA, USA; ISBN 9780520248700
78. Mumeni Landi, A. and Karimi Organi F., 2023. Estimation of conservation value of Shimbar forest area using CVM and AHP methods. Journal of environmental science and technology. 25, (6), page 15-24. (in Persian)
79. Nikkami, D. and Shadfar, S., 2021. Soil erosion mapping in sediment gauged watersheds of Iran. Watershed Engineering and Management, 13(2), pp.479-496. (in Persian)
80. Nkonya, E., Mirzabaev, A., and Von Braun, J., 2016. Economics of land degradation and improvement–a global assessment for sustainable development (p. 686). Springer Nature.
81. Oldeman, L.R., 1994. The global extent of soil degradation. In: Soil Resilience and Sustainable Land Use (eds D.J. Greenland & I. Szabolcs), pp. 99–118. CAB International, Wallingford.
82. Osman, K.T., 2014. Soil Erosion by Water. In: Soil Degradation, Conservation and Remediation. Springer, Dordrecht. **https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9_3**

83. Palmquist, R.B. Danielson, L.E., 1989. A hedonic study of the effects of erosion control and drainage on farmland values. American Journal of Agricultural Economics 71: 53-62.
84. Panagos, P., Borrelli, P., and Poesen, J., 2019. Soil loss due to crop harvesting in the European Union: A first estimation of an underrated geomorphic process. Science of the Total Environment, 664, 487-498.
85. Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., and Bosello, F., 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. Land degradation & development, 29(3), 471-484.
86. Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soulignac, A., Richet, J.B., Fournier, M., Ouvry, J.F., Cerdan, O. and Laignel, B., 2021. Analysis of off-site economic costs induced by runoff and soil erosion: Example of two areas in the northwestern European loess belt for the last two decades (Normandy, France). *Land Use Policy*, *108*, p.105541.
87. Pimentel, D., 2006. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. Environment, Development and Sustainability. 8(1): p. 119-137.
88. Pimentel, D., Burgess, M., Pimentel, D. and Burgess, M., 2013. Soil erosion threatens food production. Agriculture 3 (3): 443–463. **doi:10.3390/agriculture3030443**
89. Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, *267*(5201), pp.1117-1123.
90. Podhrazska, J., Szturc, J., Karasek, P., Kucera, J., & Konecna, J., 2019. Economic impacts of farmland degradation in the Czech Republic--Case Study. Agricultural Economics/Zemědělská Ekonomika, 65(11).
91. Poesen, J., 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. Earth surface processes and landforms, 43(1), 64-84.
92. Porter, J., Costanza, R., Sandhu, H., Sigsgaard, L., Wratten, S., 2009. The value of producing food, energy, and ecosystem services within an agro-ecosystem. Ambio 38, 186–193.
93. Pradhan, B., Alazhari Moneir A. A., and Jena R., 2018. Sand dune risk assessment in Sabha region, Libya using Landsat 8, MODIS, and Google Earth Engine images, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9:1, 1280-1305, **DOI: 10.1080/19475705.2018.1518880**
94. Pretty, J.N., Brett, C., Gee, D., Hine, R.E., Mason, C.F., Morison, J.I., Raven, H., Rayment, M.D. and van der Bijl, G., 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture. *Agricultural systems*, *65*(2), pp.113-136.
95. Pröbstl-Haider, U., 2015. Cultural ecosystem services and their effects on human health and well-being–a cross-disciplinary methodological review. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, *10*, pp.1-13.
96. Rastgar, Sh., Barani, H., Darijani, A., Berdi Sheikh, V., Ghorbani, J., Ghorbani, M., 2016. Estimating direct economic value of soil conservation function of rangelands vegetation (case study: summer rangelands of nour-rudwatershed basin). Journal of Watershed Management Research, 7(13), 254-262. (in Persian)
97. Rickson, R.J., Baggaley, N., Deeks, L.K., Graves, A., Hannam, J., Keay, C and Lilly, A., 2019. Developing a method to estimate the costs of soil erosion in high risk Scottish catchments. Report to the Scottish Government. Available online from **https://www.gov.scot/SBN/978-1-83960-754-7**
98. Riksen M., 2004. Off-site effects of wind erosion on agricultural land in Northwestern Europe. In: Goossens D, Riksen M, eds. Wind erosion and dust dynamics: observation, simulation, modelling. Wageningen: ESW publications, 7–13.
99. Riksen, MJPM., De Graaff, J., 2001. On-site and off-site effects of wind erosion on European light soils. Land Degradation & Development 12(1): 1–11. **https://doi.org/10.1002/ ldr.423**
100. Robinson, D. A., and Lebron, I., 2010. On the natural capital and ecosystem services of soils. Ecological economics, 70, 137-138.

101. Roy, D.K., Goswami, S., Ahmed, T., Saha, M.K., Emon, M.H. and Rahim, M.A., 2017. Socio-economic impacts of river bank erosion on Durgapasha Union in Bakerganj Upazila, Bangladesh. *Barisal University Journal Part*, *1*(4), p.1.
102. Ruysschaert, G., Poesen, J., Verstraeten, G., and Govers, G., 2004. Soil loss due to crop harvesting: significance and determining factors. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *28*(4), 467-501.
103. Sanders, D.W., Huszar, P.C., Sombatpanit, S. and Enters, T. eds., 1999. *Incentives in soil conservation: from theory to practice* (pp. xvii+-384).
104. Sandhu, H.S.,Wratten, S.D., Cullen, R., 2010. The role of supporting ecosystem services in conventional and organic arable farmland. Ecol. Complex. 7, 302–310.
105. Santra, P., Moharana, P. C., Kumar, M., Soni, M. L., Pandey, C. B., Chaudhari, S. K., and Sikka, A. K., 2017. Crop production and economic loss due to wind erosion in hot arid ecosystem of India. Aeolian Res. 28, 71–82.
106. Sartori, M., Philippidis, G., Ferrari, E., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P., 2019. A linkage between the biophysical and the economic: assessing the global market impacts of soil erosion. Land Use Policy 86, 299–312.
107. Schwegler, P., 2014. Economic valuation of environmental costs of soil erosion and the loss of biodiversity and ecosystem services caused by food wastage. Sci. Pap. Award.
108. Silva, T. P., Bressiani D., Ebling É. D., Reichert J. M., 2021. Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production, International Soil and Water Conservation Research, Volume 12, Issue 1, Pages 121-136, ISSN 2095-6339,
109. Sokouti Oskoee, R. and Besharati, H., 2022. A Review of Soil Economic Valuation. *Land Management Journal*, *10*(1), pp.1-16. (in Persian)
110. Soufi, M., Bayat, R., Partovi, A. (2022). 'Methods of gully control and reclamation in different provinces of Iran', *Watershed Engineering and Management*, 14(1), pp. 1-16. (in Persian) **doi:10.22092/ijwmse.2021.343122.1800**
111. Sparovek, G., and De Maria, I. C., 2003. Multiperspective analysis of erosion tolerance. Scientia Agricola, 60, 409-416.
112. Steinhoff-Knopp, B., Kuhn, T.K. and Burkhard, B., 2021. The impact of soil erosion on soil-related ecosystem services: development and testing a scenario-based assessment approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(Suppl 1), p.274.
113. Sterk, G., 2003. Causes, consequences and control of wind erosion in Sahelian Africa: A review. Land Degrad. Dev., 14, 95–108.
114. Sterk, G., Riksen, M.J.P.M. and Goossens, D., 2001. Dryland degradation by wind erosion and its control. *Annals of arid Zone*, *40*(3), pp.351-368.
115. Swinton, S.M., Lupi, F., Robertson, G.P. and Hamilton, S.K., 2007. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. Ecological economics, 64(2), pp.245-252.
116. Telles, T.S., Dechen, S.C.F., Souza, L.G.A.D. and Guimarães, M.D.F., 2013. Valuation and assessment of soil erosion costs. *Scientia Agricola*, *70*, pp.209-216.
117. Telles, T.S., Guimarães, M.D.F. and Dechen, S.C.F., 2011. The costs of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciencia do solo*, *35*, pp.287-298.
118. Tian, M., Gao, J., Zhang, L., Zhang, H., Feng, C. and Jia, X., 2021. Effects of dust emissions from wind erosion of soil on ambient air quality. *Atmospheric Pollution Research*, *12*(7), p.101108.
119. Tripathy, B., and Mondal, T., 2019. Impact of Riverbank erosion on Human life. Thematics Journal of Geography. 8. 53-56. **10.26643/tjg.v8i9.8101**
120. Uri, N.D., 2000. Agriculture and environment: the problem of soil erosion. Journal of Sustainable Agriculture 16: 71-94.
121. Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, *63*(2-3), pp.132-153. **doi: 10.1016/J.CATENA.2005.06.001**
122. Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, *63*(2-3), pp.132-153.

123. Van Kooten, G.C., Weisensel, W.P. and Chinthammit, D., 1990. Valuing trade-offs between net returns and stewardship practices: The case of soil conservation in Saskatchewan. *American Journal of Agricultural Economics*, *72*(1), pp.104-113.
124. Wang, Y., Zhang, J.H., Zhang, Z.H. and Jia, L.Z., 2016. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape. *Science of the Total Environment*, *551*, pp.522-532. .
125. Wei, Y., Wu, X., Cai, C., Wang, J., Xia, J., Wang, J., Guo, Z. and Yuan, Z., 2019. Impact of erosion-induced land degradation on rainfall infiltration in different types of soils under field simulation. *Land Degradation & Development*, *30*(14), pp.1751-1764.
126. Wolka, K., Mulder, J., and Biazin, B., 2018. Effects of soil and water conservation techniques on crop yield, runoff and soil loss in Sub-Saharan Africa: A review. Agricultural water management, 207, 67-79.
127. Wu, X., Fan, J., Sun, L., Zhang, H., Xu, Y., Yao, Y. and Chi, W., 2021. Wind erosion and its ecological effects on soil in the northern piedmont of the Yinshan Mountains. Ecological Indicators, 128, 107825.
128. Xu, X., Zhu, T., Zhang, H., Gao, L., Xu, X., Zhu, T., Zhang, H. and Gao, L., 2020. Gravity erosions on the loess gully bank: Avalanche, landslide, or mudslide. *Experimental Erosion: Theory and Practice of Soil Conservation Experiments*, pp.141-149.
129. Yan, L., Xu, W., Wang, H., Wang, R., Meng, Q., Yu, J. and Xie, W.C., 2019. Drainage controls on the Donglingxing landslide (China) induced by rainfall and fluctuation in reservoir water levels. *Landslides*, *16*, pp.1583-1593.
130. Yang, T., Siddique, K. H., & Liu, K., 2020. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. Global Ecology and Conservation, 23, e01118.
131. Yazie, T., Mekonnen, M. and Derebe, A., 2021. Gully erosion and its impacts on soil loss and crop yield in three decades, northwest Ethiopia. Model. Earth Syst. Environ. 7, 2491–2500.
132. Young M., 1999. Costing Dust: How much does wind erosion cost the people of South Australia?, Natural Resource Management Economics 99_001, Policy and Economic Research Unit, CSIRO Land and Water, Adelaide, Australia.
133. Zhang, L., Huang, Y., Rong, L., Duan, X., Zhang, R., Li, Y. and Guan, J., 2021. Effect of soil erosion depth on crop yield based on topsoil removal method: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, *41*, pp.1-13.
134. Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K. and Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological economics*, *64*(2), pp.253-260.
135. Zhao, H., Zhang, F., Yu, Z. and Li, J., 2022. Spatiotemporal variation in soil degradation and economic damage caused by wind erosion in Northwest China. *Journal of Environmental Management*, *314*, p.115121.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115121
136. Ziyaei Jazi, D. and Bidaki, R.Z., 2019. Determining the economic damage caused by soil erosion in different land uses (Case study: Beheshtabad watershed, Chaharmahal and Bakhtiari province). *Iranian Journal of Natural Resources (Rangeland and Watershed Management)*, *72*(1), pp.151-165. (in Persian)