وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دستورالعمل فنی

تعیین منافع درون و برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت آب و خاک (مطالعه موردی: سد کارده مشهد)

نویسندگان:

حمزه نور، یحیی پرویزی، علی دسترنج

شماره ثبت: ۷۰۰۹۶

۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات،آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

دستورالعمل فنی:

تعیین منافع درون و برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت آب و خاک

(مطالعه موردی: سد کارده مشهد)

نویسندگان:

حمزه نور، یحیی پرویزی، علی دسترنج

شماره ثبت: ۷۰۰۹۶

۱۴۰۵

وزارت جهادکشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

عنوان: تعیین منافع اقتصادی اقدامات حفاظت آب و خاک (مطالعه موردی: سد کارده مشهد)

نویسندگان: حمزه نور، یحیی پرویزی، علی دسترنج

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

طراح جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۵

این اثر در مورخه **۱۴۰۵/۰۷/۰۷** با شماره **۷۰۰۹۶** در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر ماخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

چکیده ۱

۱- مقدمه و بیان مسأله ۲

۲- تهیه مدل مفهومی اثرات فرسایش و حفاظت خاک ۴

۲-۱- اثرات درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک ۴

۲-۱-۱- کاهش ضخامت لایه سطحی خاک ۵

۲-۱-۲- ممانعت فیزیکی رشد ریشه ۶

۲-۱-۳- کاهش آب قابل‌دسترس گیاهان ۶

۲-۱-۴- هدررفت ماده آلی و عناصر غذایی ۷

۲-۱-۵- رابطه فرسایش آبی و تولیدات گیاهی ۹

۲-۲- اثرات برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک ۱۰

۲-۲-۱- آلاینده‌های معمول منتج از فرسایش آبی ۱۰

۲-۲-۱-۱- رسوبات معلق ۱۰

۲-۲-۱-۲- عناصر غذایی پرمصرف توسط گیاه ۱۱

۲-۲-۱-۳- ماده آلی خاک ۱۵

۲-۲-۱-۴- آفت‌کش‌ها ۱۵

۲-۲-۲- اثرات ورود رسوبات به منابع آب ۱۵

۲-۲-۳- فرسایش خاک و تغذیه‌گرایی محیط‌های آبی ۱۸

۲-۳- اثرات درون و برون‌منطقه‌ای حفاظت خاک ۱۹

۲-۴- گام به گام ارزیابی اقتصادی پروژه حفاظت خاک و آبخیزداری ۲۲

۲-۴-۱- جمع‌آوری اطلاعات در زمینه اقدامات حفاظت خاک (منافع حفاظت خاک) ۲۲

۲-۴-۲- منفعت اجرای اقدامات حفاظت خاک ۲۲

۲-۴-۳- ارزیابی اقتصادی پروژه ۲۷

۳- رویکردهای ارزیابی اقتصادی فرسایش و حفاظت خاک ۲۷

۳-۱- نکات مهم در ارزیابی اقتصادی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری ۳۲

۴- آزمون دستورالعمل در حوزه آبخیز سد کارده ۳۴

۴-۱- انتخاب منطقه مورد مطالعه ۳۴
۴-۲- محاسبه انواع خسارت‌های اقتصادی فرسایش خاک در مقیاس آبخیز ۳۵
۴-۲-۱- خسارت‌های درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک ۳۵
۴-۲-۲- خسارت جایگزینی عناصر غذایی ۳۶
۴-۲-۳- اثر فرسایش خاک بر کاهش تولید مراتع و اراضی دیم ۳۷
۴-۳- خسارت‌های برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک ۳۸
۴-۳-۱- رسوب‌گذاری در سد کارده ۳۸
۴-۳-۲- اثر فرسایش بر انتشار CO_2 به اتمسفر ۴۱
۴-۴- تعیین منافع درون و برون‌منطقه‌ای حفاظت خاک ۴۳
۴-۴-۱- تعیین اثرات درون‌منطقه‌ای حفاظت خاک ۴۳
۴-۴-۱-۱- افزایش تولید علوفه در اثر اجرای اقدامات بیولوژیک ۴۳
۴-۴-۱-۲- اثر اقدامات بیولوژیک بر فرسایش خاک و حفظ عناصر غذایی خاک ۴۴
۴-۴-۱-۳- اثر اقدامات بیولوژیک در ترسیب کربن ۴۵
۴-۴-۱-۴- اثر اقدامات بیولوژیک بر ذخیره رواناب در سطح دامنه ۴۶
۴-۴-۲- منافع برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت خاک ۴۸
۴-۴-۲-۱- اثر اقدامات آبخیزداری بر کاهش رسوب‌دهی ۴۸
۴-۴-۲-۲- اثر سازه‌های حفاظت خاک بر ذخیره رواناب ۵۱
۴-۴-۳- جمع‌بندی منافع ۵۲
منابع ۵۵
Abstract ۶۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۲-۱- ارتباط استفاده از کود و تقلیل اثرات فرسایش در کاهش تولید (Florchinger و همکاران، ۲۰۰۰) ۸
شکل ۲-۲- انواع رابطه فرسایش خاک و تولید محصول (Blanco و Lal، ۲۰۰۸) ۹
شکل ۲-۳- میزان مصرف نیتروژن در کشورهای در حال توسعه، توسعه‌یافته و در سطح جهان ۱۲
شکل ۲-۴- میزان مصرف فسفر در کشورهای در حال توسعه، توسعه‌یافته و در سطح جهان ۱۴
شکل ۲-۵ مدل مفهومی اثرات فرسایش و حفاظت خاک در مقیاس آبخیز ۲۱
شکل ۴-۱- حجم سد کارده (قابل ذخیره) در دو سناریوی با و بدون رسوب‌گذاری ۳۹
شکل ۴-۲- تغییرات کربن آلی خاک در طول فرسایش ۴۲
شکل ۴-۳- کاهش حجم قابل مدیریت سد کارده در دو سناریوی با و بدون اجرای اقدامات ۴۹
شکل ۴-۴- تغییرات مقدار آب قابل ذخیره در سازه‌های آبخیزداری با توجه به رسوب‌گذاری در آن‌ها ۵۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۲-۱- اثر تیمارهای مختلف کود و لایه سطحی خاک بر تولید گندم (Massee، ۱۹۹۰)..... ۵
جدول ۲-۲- اثر عمق سخت‌لایه در میزان تولید محصول گندم (Gollany و همکاران، ۱۹۹۲)..... ۶
جدول ۲-۳- متوسط رسوب‌گذاری سالانه در مخازن برخی از کشورهای جهان..... ۱۶
جدول ۲-۴- اثرات زیست‌محیطی ناشی از ورود رسوبات به سد..... ۱۷
جدول ۴-۱- اجزای خسارت هدررفت عناصرغذایی براساس شرح خدمات آبخیزداری سال ۱۴۰۳..... ۳۵
جدول ۴-۲- هدررفت عناصرغذایی پرمصرف خاک طی فرسایش در حوضه مورد مطالعه..... ۳۶
جدول ۴-۳- خسارت کل هدررفت عناصر غذایی در منطقه مورد مطالعه..... ۳۶
جدول ۴-۴- هزینه ساخت و نگهداری سد کارده بر مبنای قیمت سال ۱۴۰۳ ..... ۴۰
جدول ۴-۵- خسارت انتشار CO_2 در اثر فرسایش خاک در آبخیز گوش و بهره ۴۲
جدول ۴-۶- درآمد حاصل از افزایش تولید علوفه ناشی از اجرای اقدامات بیولوژیک در آبخیز گوش و بهره
..... ۴۴
جدول ۴-۷- اثرگذاری اقدامات بیولوژیک در حوضه گوش و بهره بر میزان فرسایش خاک ٤٥
جدول ۴-۸- منافع حاصل از کاهش هدررفت عناصرغذایی پرمصرف توسط اقدامات بیولوژیک..... ۴۵
جدول ۴-۹- درآمد ترسیب کربن از طریق اقدامات بیولوژیک در حوزه آبخیز بازه حوض..... ۴۶
جدول ۴-۱۰- پارمترهای CN، S و I قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری..... ۴۷
جدول ۴-۱۱- میزان رسوب ورودی به سد کارده در سناریوهای مختلف کنترل فرسایش و رسوب..... ۴۹
جدول ۴-۱۲- کاهش دبی اوج در دوره بازگشت‌های مختلف در اثر اجرای اقدامات حفاظت از خاک ۵۰
جدول ۴-۱۳- مجموع منافع حفاظت از خاک در حوزه آبخیز گوش و بهره..... ۵۳

چکیده

این دستورالعمل با هدف ارائه چارچوبی برای تعیین منافع درون و برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت آب و خاک تهیه شده است. فرسایش خاک به‌عنوان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی، اثرات مخربی هم در محل وقوع (درون‌منطقه‌ای) و هم در مناطق دورتر (برون‌منطقه‌ای) برجای می‌گذارد. بااین‌حال، به‌دلیل عدم وجود معیارهای مشخص و ارزش‌گذاری اقتصادی شفاف، این اثرات اغلب در تصمیم‌گیری‌های کلان نادیده گرفته می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا عوامل کلیدی مؤثر بر خسارت‌های فرسایش خاک در هر دو بعد درون و برون‌منطقه‌ای شناسایی شدند. سپس، چارچوبی مبتنی بر این عوامل تدوین شد تا بتوان اثرات کمی و کیفی این خسارت‌های را به‌طور دقیق‌تری مشخص کرد. در مرحله بعد، با استفاده از این چارچوب، منافع اقتصادی حاصل از اجرای پروژه‌های حفاظت خاک در درون و برون حوضه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی برای یک پروژه اجرایی نشان‌دهنده نسبت فایده به هزینه (B/C) معادل ۳۷/۴ است. این عدد حاکی از آن است که به ازای هر واحد پولی هزینه صرف شده در پروژه‌های حفاظت خاک، انتظار می‌رود درآمد ناخالصی معادل ۳۷/۴ واحد پولی حاصل شود، که مؤید صرفه اقتصادی قابل توجه این پروژه‌ها است. در نهایت، مشخص شد که در حوضه مورد مطالعه، پروژه‌های حفاظت از خاک اجراشده، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش خسارت‌های درون و برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک داشته‌اند. سهم منافع درون‌منطقه‌ای از این تأثیر حدود ۶۴ درصد و سهم منافع برون‌منطقه‌ای حدود ۳۶ درصد برآورد شد. این تفکیک نشان‌دهنده اهمیت دوچندان اثرات محلی در کنار منافع گسترده‌تر این پروژه‌ها است.

کلمات کلیدی: ارزش اقتصادی خاک، پایش و ارزیابی، تحلیل هزینه-فایده.

۱- مقدمه و بیان مسأله

در بسیاری از سیاست‌گذاری‌ها، خاک و حفاظت از آن جایگاه شایسته‌ای ندارند، زیرا کارکردهای حفاظتی خاک معمولاً قابل قیمت‌گذاری اقتصادی نیستند و در بازارها دادوستد نمی‌شوند. در کشورهای توسعه‌یافته، تلاش‌هایی برای برآورد خسارت‌های ناشی از فرسایش خاک صورت گرفته است؛ به‌عنوان نمونه، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم فرسایش خاک در آمریکا ۴۴ میلیارد دلار (Pimentel و همکاران، ۱۹۹۵) و اتحادیه اروپا ۳۸ میلیارد یورو برآورد شده است (Montanarella و همکاران، ۲۰۰۷). در ایران، پژوهش‌های اقتصادی در این زمینه محدود بوده و بیشتر به اثرات فرسایش درون مزرعه پرداخته‌اند، بااین‌حال برخی مطالعات خسارت‌های برون‌منطقه‌ای را نیز قابل‌توجه دانسته و آن را معادل ۳۱ درصد ارزش افزوده بخش کشاورزی و منابع طبیعی گزارش کرده‌اند.

به‌طور کلی خسارت‌های فرسایش خاک به دو گروه درجا و خارج از محل تقسیم می‌شوند. خسارت‌های درجا شامل کم‌شدن ضخامت خاک، کاهش حاصلخیزی، تخریب ساختار خاک و افزایش هزینه‌های تولید مانند مصرف کود و آب است. در مقابل، خسارت‌های خارج از محل به انتقال رسوبات، آلودگی آب‌ها و ته‌نشینی مواد در سدها مربوط می‌شود؛ پدیده‌ای که ظرفیت ذخیره سدها را کاهش داده و تأمین آب را با مشکل مواجه می‌سازد.

در این زمینه عرب‌خدری و نور (۱۴۰۰) بیان داشته‌اند که فرسایش آبی مهم‌ترین نوع فرسایش در ایران است و حدود ۱۲۰ میلیون هکتار از اراضی کشور را درگیر کرده است. تاکنون تنها ۳۰ درصد از اراضی کشور تحت اقدامات آبخیزداری و حفاظت خاک قرار گرفته و برای تکمیل این عملیات، با توجه به هزینه‌های سال ۱۴۰۱، به حدود ۳۰۰ هزار میلیارد تومان بودجه نیاز است (ایسنا، ۱۴۰۱). با این شرایط، ارزیابی اقتصادی طرح‌های حفاظت خاک اهمیت زیادی برای تصمیم‌گیری و تخصیص منابع دارد. لذا ارزیابی اقتصادی و برآورد هزینه‌های تخریب سرزمین و منافع اقدامات حفاظت خاک در ایران ضروری است تا نتایج حاصل از آن در برنامه‌ریزی‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد. لذا برای پی‌بردن به نتایج این فعالیت‌ها و اصلاح روند فعالیت‌های

آتی در حوزه‌های آبخیز و شناخت تأثیر آن‌ها، نیاز به ارزیابی اقتصادی این اقدامات ضروری به نظر می‌رسد (گرشاسبی و قربانپور، ۱۳۹۴).

بااین‌حال انجام پژوهش در این حوزه با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله تفاوت زیاد در برآورد میزان فرسایش و رسوب، و استفاده از شاخص‌های جانشین مثل کاهش محصول یا هزینه لایروبی به‌جای اندازه‌گیری مستقیم خسارت خاک. برای مدیریت مؤثر منابع خاک، باید چارچوبی علمی برای تفکیک اثرات درجا و برون‌منطقه‌ای و همچنین روش‌های ارزیابی اقتصادی مانند هزینه فرصت، هزینه جایگزین و هزینه اجتناب از خطر تدوین شود. استفاده از چنین چارچوبی می‌تواند به برنامه‌ریزی دقیق‌تر، اصلاح روند اجرای طرح‌ها و بهره‌گیری بهتر از نتایج اقدامات حفاظتی کمک کند.

۲- تهیه مدل مفهومی اثرات فرسایش و حفاظت خاک

فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز بر زندگی انسان دارای خسارت‌های مختلفی است. کمی‌سازی خسارت‌ها و بیان آن با واحد پولی می‌تواند توجه افراد غیرمتخصص را به بحث حفاظت خاک معطوف کند. از سوی دیگر توجیه‌کردن ضرورت اجرای اقدامات با توجه به مقایسه خسارت‌های فرسایش، هزینه‌های اجرای اقدامات و منافع حاصله (منافع عمومی جامعه و حتی شخصی) قابل تحلیل است. در ابتدا لازم است اثرات فرسایش خاک را لیست کرده تا بتوان از بین آن‌ها اقداماتی که قابل کمی‌سازی و تبدیل به واحد پولی هستند را مشخص کرد.

۲-۱- اثرات درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک

فرسایش خاک موجب کنش ذرات خاک، به‌عنوان مهم‌ترین بستر تولید گیاهی می‌شود. علاوه بر بخش فیزیکی خاک، عناصر غذایی و ماده آلی نیز به‌همراه خاک شسته شده و از دسترس خارج می‌شوند. از سوی دیگر در خاک تحت فرسایش به‌دلیل تخریب خاکدانه‌ها و انتقال مواد آلی خاک به‌همراه کاهش عمق خاک، میزان آب نفوذ یافته و ظرفیت نگهداری آب در خاک کاهش می‌یابد (شهریور و همکاران، ۱۳۹۶). این موضوع خود باعث افزایش ضریب رواناب و افزایش نسبت تحویل رسوب به پایین‌دست و سایر آثار برون‌منطقه‌ای می‌شود. بنابراین باید انتظار داشت که در اولین گام تولیدات گیاهی در محدوده فرسایش‌یافته کمتر از منطقه فاقد فرسایش باشد. همچنین در منطقه فرسایش‌یافته افزایش ذرات درشت و سنگ‌ریزه (انتقال ذرات ریزدانه)، ایجاد شیارها و خندق‌ها و افزایش هزینه آماده‌سازی زمین و ... را موجب می‌شود که هرگونه اقدام احیایی (اقدامات بیولوژیک) و یا کشت (اراضی رزاعی دیم کشاورزی و یا توسعه گیاهان دارویی) در این اراضی با هزینه بیشتری صورت می‌گیرد. مهم‌ترین اثر درون‌منطقه‌ای فرسایش را می‌توان در کاهش تولیدات گیاهی مشاهده کرد. علت اساسی کاهش تولیدات زراعی به‌وسیله فرسایش را نیز می‌توان در اثر ازبین‌رفتن لایه سطحی، ممانعت فیزیکی در رشد ریشه، کاهش ذخایر آب قابل‌دسترس و کاهش در ذخایر غذایی بیان کرد (Bakker و همکاران، ۲۰۰۴). به‌عبارتی اثرات درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک با ایجاد اختلال در فرآیندهای حیاتی خاک از تولید محصول می‌کاهد. این اثرات به شرح زیر توضیح داده شده است:

۲-۱-۱- کاهش ضخامت لایه سطحی خاک

اگر میزان فرسایش خاک از تولید مجدد لایه سطحی بیشتر باشد به‌تدریج از ضخامت آن کاسته می‌شود. بنابراین کاهش در میزان فرسایش خاک برای نگهداری تولیدات زراعی و افزایش آن‌ها ضروری است. با ثابت‌بودن دیگر فاکتورها، رشد و تولیدات زراعی با کاهش در ضخامت لایه فوقانی کاهش می‌یابد (Lal و همکاران، ۲۰۰۰). لایه فوقانی خاک دارای خصوصیات فیزیکی مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های آن است، این قسمت دارای بیشترین مقدار آب قابل‌دسترس و مواد غذایی ذخیره‌شده است و تمرکز ریشه دوانی گیاهان در این ناحیه وجود دارد. بنابراین جابه‌جایی جزئی یا کلی لایه فوقانی تأثیر معکوسی بر رشد و توسعه ریشه گیاهان دارد. کاهش در عمق ریشه زنی هم‌چنین باعث افزایش حساسیت گیاهان به نابهنجاری در آب، دما و رژیم غذایی می‌شود. در این رابطه Massee (۱۹۹۰) در دو خاک سیلتی لوم که دارای عمق زیادی بودند اثر تیمارهای تغییر ضخامت لایه سطحی و هم‌چنین افزایش کود نیتروژن به خاک را بر تولید غلات مورد ارزیابی قرار داده که نتایج آن در جدول ۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱- اثر تیمارهای مختلف کود و لایه سطحی خاک بر تولید گندم (Massee، ۱۹۹۰)

حذف یا اضافه کردن لایه	مصرف کود نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)		
سطحی (سانتی‌متر)	۰	۳۴	۶۸
-۳۰	۰/۷۳	۱/۲۶	۱/۵۸
-۱۵	۰/۸۷	۱/۳۹	۱/۹۶
۰	۱/۶۱	۲/۰۱	۲/۴۴
+۱۵	۲/۷۲	۲/۷۸	۲/۹۵

منبع: Massee (۱۹۹۰)

همان‌گونه که در جدول ۲-۱ ملاحظه می‌شود با کاهش عمق خاک از تولید محصول کاسته می‌شود بااین‌حال اضافه‌کردن کود نیتروژن به خاک تنها باعث جبران مقداری از کاهش تولید، شده است. به‌گونه‌ای که تولید محصول با اضافه‌کردن ۶۸ کیلوگرم کود در تیمار کاهش ۳۰ سانتی‌متری عمق خاک، از مقدار تولید تیمار شاهد (بدون تغییر عمق و اضافه کردن کود) کمتر است. هم‌چنین این مقدار تولید در مقایسه با تیمار افزایش ۱۵ سانتی‌متری لایه سطحی بسیار کمتر خواهد بود (Massee، ۱۹۹۰).

۲-۱-۲- ممانعت فیزیکی رشد ریشه

فرسایش تشدید شونده موجب افزایش سله‌سطحی[1]، پوسته‌ای‌شدن[2] و فشردگی خاک[3] می‌شود. خاک‌هایی که دارای سخت لایه هستند و در شرایط معمول مانعی برای ریشه‌زنی گیاهان در خود دارند با شروع فرسایش خاک تولید محصول در آن‌ها با شدت بیشتری کاهش می‌یابد (Blanco و Lal، ۲۰۰۸). در جدول ۲-۲ نتایج پژوهش Gollany و همکاران (۱۹۹۲) در زمینه اثر عمق سخت لایه در تولید گندم ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هرچه سخت لایه به لایه سطحی نزدیک‌تر باشد تولید محصول گندم کمتر شده است.

جدول ۲-۲- اثر عمق سخت‌لایه در میزان تولید محصول گندم (Gollany و همکاران، ۱۹۹۲)

سال	عمق قرارگیری سخت لایه (سانتی‌متر)		
	بیشتر از ۴۵	بین ۳۰ تا ۴۵	در سطح خاک (صفر)
اول	۸/۶	۸/۱	۶/۹
دوم	۸/۳	۷/۹	۷/۸
سوم	۸/۸	۷/۳	۷/۸
چهارم	۸/۳	۸/۳	۷/۶
پنجم	۲/۷	۳/۵	۲/۳
میانگین	۷/۳	۷/۰	۶/۵

منبع Gollany و همکاران (۱۹۹۲)

۲-۱-۳- کاهش آب قابل‌دسترس گیاهان

کاهش در مقدار آب قابل دسترس گیاه به‌دلیل فرسایش خاک از جمله عوامل اثرگذار در تقلیل تولید محصولات گیاهی است. با کاهش مقدار آب قابل‌دسترس در ناحیه ریشه گیاهان از مقدار تولید محصول کاسته می‌شود. فرسایش با کاهش ضخامت لایه سطحی خاک و هم‌چنین هدر رفت ماده آلی از میزان قابلیت نگه‌داری آب در خاک می‌کاهد. هم‌چنین باید توجه داشت که برخورد قطرات باران باعث تخریب خاکدانه‌ها به ذرات ریزتر شده و با انتقال مواد ریزدانه به فضاهای خالی خاک کورشدگی یا کاهش تخلخل رخ می‌دهد که خود در

[1] Surface Sealing
[2] Crusting
[3] Compaction

کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب و تشدید فرسایش خاک نقش مهمی دارد. علاوه‌براین نتایج تحقیق بروغنی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داده است که سرعت نفوذ آب گل‌آلود در خاک بسیار کمتر از آب بدون رسوب است.

در کنار این موارد، لایه‌های زیرین به‌دلیل داشتن رس بیشتر (خاصیت چسبندگی و جذب‌شدگی بالای آب در رس) مقدار آب قابل‌دسترس‌شان برای گیاهان کاهش می‌یابد. در اثر کاهش ضخامت لایه فوقانی احتمالاً گیاهانی که دارای ریشه سطحی هستند بیشتر از گیاهان با ریشه عمیق دچار مشکل می‌شوند (Blanco و Lal، ۲۰۰۸).

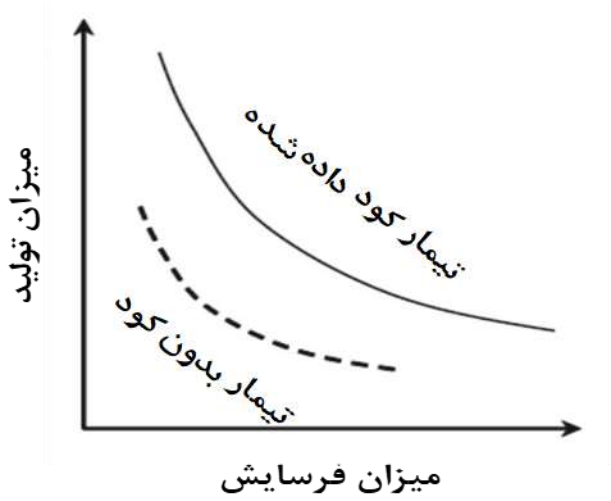
شاید حاصلخیزی خاک فرسایش‌یافته مجدداً قابل بازگشت باشد اما از آنجایی که مقدار آب قابل دسترس گیاه وابسته به عمق مؤثر ریشه‌دوانی است، پس از فرسایش خاک امکان بازگشت مقدار آب قابل دسترس گیاه به حالت قبل به‌سختی وجود دارد. در این رابطه Schertz و همکاران (۱۹۸۹) میزان تولید غلات در سه خاک با شدت‌های مختلف فرسایش خاک را بررسی کردند و نتیجه گرفتند تفاوت در میزان آب قابل دسترس برای گیاهان در شدت‌های مختلف فرسایش خاک دلیل تفاوت در تولید محصولات گیاهی شده است. Andraski و Lowery (۱۹۹۲) در بررسی‌های خود ملاحظه کردند که در یک مترمربع از سطح خاک میزان آب قابل دسترس گیاه در خاک‌های تحت فرسایش کم، متوسط و شدید به‌ترتیب ۱۸۱، ۱۶۹ و ۱۵۹ میلی‌متر بوده است. بنابراین توجه به بیلان و تعادل آب در محاسبه اثرات فرسایش خاک بر میزان تولید محصولات غذایی لازم است.

۲-۱-۴- هدررفت ماده آلی و عناصر غذایی

قسمت عمده ماده آلی و عناصر غذایی در سطح خاک قرار دارند. ماده آلی قسمت عمده عناصر غذایی را همراه خود نگه داشته است. این مواد به‌دلیل وزن مخصوص کم به‌راحتی توسط فرسایش خاک تحت‌تأثیر قرار گرفته و منتقل می‌شود. از آنجایی که عناصر ماکرو و میکرو به ذرات ماده آلی چسبیده‌اند مقدار تولید محصول با میزان ماده آلی ارتباط مستقیم دارد. علاوه‌براین ماده آلی اسیدیته، تبادل کاتیونی و دیگر فرآیندهای موجود در خاک را تحت‌تأثیر خود دارد و از این طریق بر تولید محصول اثرگذار است. در نهایت ماده آلی باعث افزایش

فعالیت باکتری‌ها و موجودات ریز شده که در نتیجه بر چرخه و در اختیار قرارگرفتن مواد غذایی در خاک مؤثر است. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد ماده آلی در نفوذ، ذخیره و باز چرخه آب در خاک نیز اثر دارد (Blanco و Lal، ۲۰۰۸).

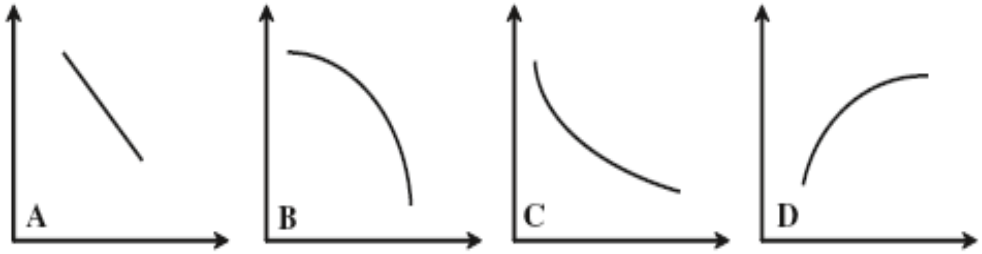
بنابراین با فرسایش و انتقال ماده آلی میزان تولید محصول کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داده است که با افزایش کود به خاک تولید محصول بیشتر می‌شود و از اثرات فرسایش خاک کاسته می‌شود. البته باید توجه داشت که اضافه‌کردن کود باعث تنظیم مجدد فعالیت‌های موجود در خاک نمی‌شود، ولی تولید محصول بیشتر از گذشته می‌شود. Florchinger و همکاران (۲۰۰۰) اثر فرسایش خاک و استفاده از کود در تولید محصول را به‌صورت شکل ۲-۱ نشان داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش شدت فرسایش خاک از میزان تولید محصول در هر دو تیمار بدون و با کود کاسته می‌شود و استفاده از کود تنها بخشی از خسارت را جبران می‌کند. به‌عبارتی از آنجایی که فرسایش علاوه بر کاهش مواد غذایی خاک، دارای اثرات دیگری از جمله کاهش ضخامت لایه سطحی، ممانعت فیزیکی در رشد ریشه و هم‌چنین کاهش نفوذ و ذخیره آب در خاک می‌شود بنابراین اضافه‌کردن کود تنها بخشی از اثرات فرسایش خاک بر تولید محصول را جبران می‌کند. لازم به‌توضیح است که اراضی فرسایش‌نیافته پاسخ بهتری به اضافه‌کردن کود نشان می‌دهند که دلیل آن وجود ساختار بهتر خاک در آن‌ها به‌همراه وجود آب در دسترس گیاهان است.



شکل ۲-۱- ارتباط استفاده از کود و تقلیل اثرات فرسایش در کاهش تولید (Florchinger و همکاران، ۲۰۰۰)

۲-۱-۵- رابطه فرسایش آبی و تولیدات گیاهی

همان‌طور که ذکر شد با افزایش فرسایش خاک مقدار تولید محصول کاهش پیدا می‌کند. اما همواره این کاهش به‌صورت خطی با افزایش فرسایش صورت نمی‌گیرد (Blanco و Lal، ۲۰۰۸). در شکل ۲-۲ انواع روابط بین فرسایش خاک و تولید محصولات زراعی توسط Blanco و Lal (۲۰۰۸) ارائه شده است.



شکل ۲-۲- انواع رابطه فرسایش خاک و تولید محصول (Blanco و Lal، ۲۰۰۸)

شکل اول (A) دلالت بر رابطه خطی فرسایش خاک و تولید محصول دارد. در این حالت شیب خط یکسان است به‌عبارتی با فرسایش مقدار معینی خاک مقدار محصول نیز به یک مقدار مشخص در طول دوره فرسایش کاهش می‌یابد. شکل دوم (B) نیز دلالت بر کاهش محصول با افزایش فرسایش خاک دارد با این تفاوت که در چند سانتی‌متر اول هدررفت خاک تولید محصول تغییر زیادی نداشته است ولی بعد از آن تولید محصول به‌شدت کاهش یافت. شکل سوم دلالت بر این دارد که خاک سطحی با ضخامت کم، دارای اثر بالایی بر تولید محصول بوده است به‌گونه‌ای که با فرسایش این قسمت از خاک مقدار تولید به‌شدت کاهش یافته است، ولی بعد از آن و با حضور لایه‌های زیرین در سطح، فرسایش خاک اثر چندانی در تغییر محصول نداشته است.

شناخت رابطه مقدار فرسایش خاک و تولید محصول برای مدیریت بهتر اراضی و برنامه‌ریزی‌های حفاظت آب و خاک مهم است. برای مثال روابط اول و دوم نشان‌دهنده آن است که تولید محصول با افزایش فرسایش کاهش می‌یابد بنابراین اقدامات حفاظت خاک با تأثیر اندک در کاهش فرسایش دارای اثرات بیشتری بر تولید محصول هستند. درحالی که شکل سوم (C) نشان می‌دهد که اقدامات پرهزینه حفاظت آب و خاک در این منطقه دارای ریسک بالایی است و انجام آن‌ها چندان منطقی نیست زیرا با کاهش فرسایش مقدار تولید محصول تغییر ناچیزی خواهد کرد. به‌طور کلی نقصان در آب قابل‌دسترس و تخریب خصوصیات ساختمانی

خاک موجب ایجاد رابطه دوم بین فرسایش خاک و تولید محصول می‌شود. درحالی که نقصان در تأمین مواد غذایی باعث رابطه اول و سوم می‌شود (Bakker، ۲۰۰۴). در بعضی از خاک‌ها کاهش ضخامت خاک سطحی ممکن است باعث رسیدن ریشه گیاهان به آب‌های زیرزمینی شود در این‌صورت مقداری از کاهش تولید به‌دلیل فرسایش خاک جبران می‌شود. هم‌چنین در بعضی مناطق خاک‌های حاصلخیز توسط رسوبات دفن شده‌اند. در این حالت با افزایش فرسایش خاک و ازبین‌رفتن تدریجی رسوبات سطحی بر میزان تولید محصول افزوده می‌شود.

۲-۲- اثرات برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک

ذرات فرسایش‌یافته به‌صورت معلق و باربستر در مسیر آبراهه‌ها حرکت کرده و بخشی از آن‌ها می‌توانند به خروجی حوضه برسند. این ذرات حاصل از فرسایش خاک هم از نظر جزءفیزیکی و هم از نظر جز شیمیایی (مواد متصل به ذرات) موجب خسارت‌هایی در محیط‌های آبی می‌شوند. در این زمینه از یک‌سو می‌توان به کاهش حجم ذخیره و کاهش نفوذپذیری در سازه‌های ذخیره‌ای، کانال‌های انتقال و پروژه‌های تغذیه اشاره کرد. از سوی دیگر تغذیه‌گرایی منابع آب (توسط فسفر و نیتروژن) و آلودگی توسط آفت کش‌ها و سایر آلاینده‌ها متصل به ذرات در نقاط مختلف جهان گزارش شده است.

۲-۲-۱- آلاینده‌های معمول منتج از فرسایش آبی

به‌طور کلی آلاینده‌های مورد بررسی در این بخش شامل رسوبات، مواد غذایی پر مصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)، مواد آلی و آفت‌کش‌ها است.

۲-۲-۱-۱- رسوبات معلق

اهمیت رسوبات رودخانه‌ای از دو منظر مورد توجه است. از یک‌سو کمیت رسوبات رودخانه‌ای مورد توجه است، در این حالت رسوبات از نظر فیزیکی اثرگذار هستند و باعث افزایش گل‌آلودگی آب، کاهش ظرفیت مخازن و کانال‌های آبی می‌شود. از سوی دیگر کیفیت، نوع و مقدار مواد شیمیایی همراه ذرات، دارای اهمیت

هستند. در این‌صورت ذرات ریز دانه دارای اهمیت بیشتری بوده و آلودگی منابع آب از اثرات آن‌ها است (Blanco و Lal، ۲۰۰۸). وجود سطح ویژه بالاتر در این ذرات باعث جذب مواد غذایی، سموم و آفت‌کش‌های زیادی به آن‌ها می‌شود در این حالت مقدار این مواد در رسوبات بیشتر از خاک منشأ است. بنابراین، رسوبات معلق به‌ویژه ذرات رس عامل اصلی انتقال مواد غذایی، مواد سمی، آفت‌کش‌ها و عناصر شیمیایی در محیط‌های آبی هستند. در سال‌های اخیر آگاهی از اهمیت زیست‌محیطی انتقال بارهای رسوبی معلق به‌وسیله آب‌های جاری و رودخانه‌ها و هم‌چنین شناخت دینامیک رسوبات معلق، رشد زیادی کرده که این شامل اهمیت رسوبات معلق در انتقال مواد غذایی و آلاینده‌ها است (Noor و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۲-۱-۲- عناصر غذایی پرمصرف توسط گیاه

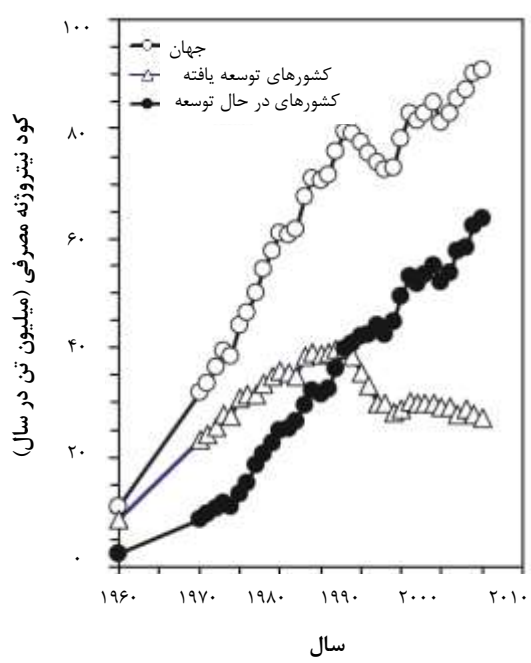
از پیامدهای فرسایش خاک کاهش حاصل‌خیزی و قدرت باروری خاک برجا مانده و انتقال عناصر غذایی پرمصرف و مواد آلی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم به آب‌های سطحی است (خزایی و همکاران، ۱۳۹۱). این عناصر بیشترین غلظت را در چند سانتی متری لایه فوقانی خاک دارند و در اثر فرسایش جدا شده و همراه با رواناب به پایین دست منتقل می‌شوند. به‌طور کلی با برداشت خاک سطحی، با توجه به درصد بالای عناصر غذایی در این لایه، میزان کل این عناصر در اثر فرسایش کاهش خواهد یافت. بنابراین از بین رفتن عناصر غذایی از خاک، حداقل به اندازه تلفات خاک دارای اهمیت است (Ide و همکاران، ۲۰۰۸). یک تن از لایه فوقانی حاصل‌خیز به‌طور میانگین ۱ تا ۶ کیلوگرم نیتروژن، ۱ تا ۳ کیلوگرم فسفر و ۲ تا ۳۰ کیلوگرم پتاسیم دارد. درحالی که خاک در اراضی فرسوده شده به‌طور میانگین فقط ۰/۱ تا ۰/۱۵ کیلوگرم در هر تن نیتروژن دارد (Blanco و Lal، ۲۰۰۸).

نیتروژن و فسفر باعث مغذی شدن دریاچه‌ها و سایر منابع آب می‌شوند. مغذی‌شدن به‌عنوان افزایش سطح مواد غذایی در محیط‌های آبی بوده که موجب افزایش رشد جلبک‌ها و دیگر گیاهان در آب، کاهش اکسیژن محلول، افزایش تیرگی و پایین آمدن کیفیت آب می‌شود. البته ممکن است مقدار فسفر یا نیتروژن در آب کمتر از دیگری باشد.

۱) نیتروژن

نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی برای رشد و حیات موجودات زنده است. ولی استفاده بیش از حد از آن در اراضی کشاورزی باعث آلودگی منابع آب و حتی کاهش لایه ازون می‌شود. به‌همین‌دلیل تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور چرخه نیتروژن در اکوسیستم‌های مختلف صورت گرفته است (Hatch و همکاران، ۱۹۹۸). چرخه بیوشیمیایی نیتروژن بسیار پیچیده بوده و بعضی از فرآیندها در شرایط هوازی و گروه دیگر در شرایط بی‌هوازی رخ می‌دهند. نیتروژن آلی به ذرات خاک و مواد آلی متصل است و شکل معدنی آن بیشتر به‌صورت محلول منتقل می‌شود (Haygarth و Jarvis، ۲۰۰۲).

استفاده از کود نیتروژنه همبستگی بالایی با تولید محصولات کشاورزی دارد. به‌همین‌دلیل میزان مصرف آن از سه میلیون تن در سال ۱۹۶۰ به ۹۰ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ رسیده است (USDA-ERS، ۲۰۰۵). با افزایش استفاده از این ماده بر مقدار غلظتش در منابع آب افزوده شده است. تنها بخشی از نیتروژن موجود در کود توسط گیاه مصرف می‌شود و مقدار مازاد آن به‌وسیله رواناب از طریق فرسایش خاک یا آب‌شویی حمل می‌شود.



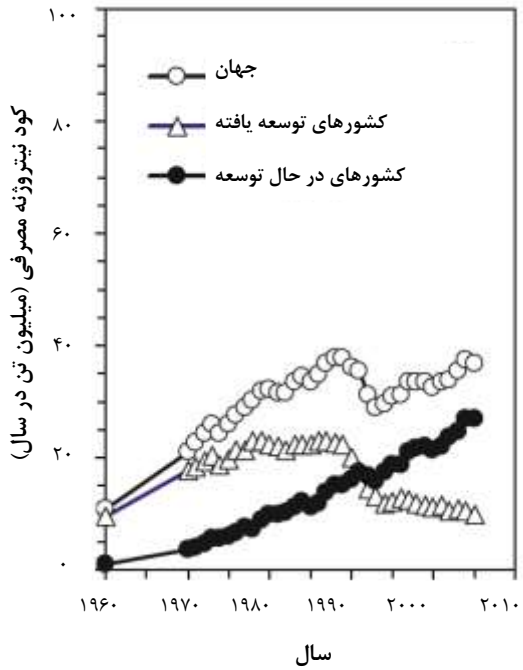
شکل ۲-۳- میزان مصرف نیتروژن در کشورهای در حال توسعه، توسعه‌یافته و در سطح جهان

پژوهشگران انتقال نیتروژن را بیشتر از طریق آبشویی و به‌صورت محلول گزارش کرده‌اند. بااین‌حال Kissel و همکاران (۲۰۰۸) اثر اقدامات کنترل رسوب در کاهش هدررفت نیتروژن در اراضی کشاورزی و شیب‌دار را به‌دلیل اهمیت بیشتر رواناب و فرسایش خاک در حمل این ماده مهم بیان کرده است.

۲) فسفر

فسفر نیز یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان است بااین‌حال استفاده بیش از حد توسط کود به‌ویژه کودهای حیوانی موجب مغذی‌شدن خاک و منابع آب از این عنصرمی‌شود، فسفر برخلاف نیتروژن بیشتر به ذرات خاک متصل است و بنابراین به‌همراه ذرات خاک منتقل می‌شود. به‌طوری‌که تا ۷۵ درصد آن به‌صورت متصل به این ذرات حمل می‌شود و مقدار محلول آن کم‌تر است (خزائی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Noor و همکاران، ۲۰۱۰). فسفر ذره‌ای، آن قسمت از کل فسفر خاک است که به ذرات رسوب چسبیده و توسط فرسایش خاک جدا و در رواناب حمل می‌شود (Ide و همکاران، ۲۰۰۸).

انتقال فسفر به رودخانه‌ها، مخازن آب، دریاچه‌ها و سایر منابع آب در کیفیت آن‌ها تاثیر سویی دارد و محیط را برای رشد موجودات مضر به‌خصوص جلبک‌ها فراهم می‌کند. به‌گونه‌ای‌که غلظت ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر آن باعث مغذی‌شدن منابع آب می‌شود (Blanco و Lal، ۲۰۰۸). به‌همین‌دلیل در طول دهه‌های اخیر توجه زیادی به فرسایش خاک به‌عنوان منبعی برای انتشار فسفر در آب‌ها مبذول شده است (نور و همکاران، ۱۳۹۰ الف؛ نور و فضلی، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۴- میزان مصرف فسفر در کشورهای در حال توسعه، توسعه‌یافته و در سطح جهان

کاهش مقدار فسفر خاک در نتیجه فرسایش یا مصرف توسط گیاه ممکن است باهم شبیه باشند، بااین‌حال تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر کیفیت فسفر خارج شده در این دو فرایند وجود دارد. زیرا گیاه فسفر قابل‌جذب را مصرف می‌کند. در صورتی‌که فسفر قابل جذب تنها بخشی از فسفر انتقال یافته توسط فرسایش خاک است. خاک قادر است فسفر جذب شده توسط گیاه را دوباره از طریق ذخایر خود جایگزین کند در صورتی‌که کم‌شدن فسفر در نتیجه فرسایش فقط با افزایش کودهای فسفری امکان‌پذیر است (Hatch و همکاران، ۱۹۹۹).

۳) پتاسیم

پتاسیم نیز یکی دیگر از عناصر غذایی پر مصرف خاک است که وجود آن در خاک حاکی از حاصل‌خیزی است. به‌طوری‌که قبلاً نیز گفته شد در فرسایش آبی در درجه اول ذرات ریز خاک سطحی از دست می‌رود. تحلیل‌رفتن پتاسیم قابل جذب توسط فرسایش خاک، حائز اهمیت زیادی بوده است به‌طوری‌که کاهش در منابع پتاسیم قابل‌جذب خاک در اثر عمل فرسایش و حمل انتقال مواد معدنی خاک می‌تواند به‌صورت یک مسأله حاد جلوه کند (Hatch و همکاران، ۱۹۹۹).

۲-۲-۱-۳- ماده آلی خاک

ماده آلی از مهم‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده خاک بوده و بسیاری از کارکردهای خاک به‌عنوان یک سامانه زنده به این جزء بستگی دارد (Sparling و همکاران، ۲۰۰۶). از سوی دیگر علی‌رغم اهمیت قابل توجه مواد آلی، هدررفت آن به‌سادگی قابل جبران نیست (Blanco و Lal، ۲۰۰۸).

بخش عمده‌ای از ماده آلی، در خاک سطحی قرار گرفته است که به‌دلیل وزن کم و تراکم این مواد در لایه فوقانی خاک، دارای حساسیت بالایی به فرسایش است (Lal، ۲۰۰۵). در نتیجه، فرسایش به‌شدت مقدار آن را تحت‌تأثیر قرار داده و موجب ازبین‌رفتن آن می‌شود. به‌همین‌دلیل یکی از مهم‌ترین فرآیندهای کاهش ماده آلی در خاک فرسایش است (Sparling و همکاران، ۲۰۰۶).

۲-۲-۱-۴- آفت‌کش‌ها

قبل از سال ۱۹۴۰ آفت‌کش‌ها (علف، حشره و قارچ‌کش) از منابع آلی مانند نیکوتین و از منابع غیرآلی از جمله سولفور و ارسنیک ساخته می‌شدند. اما پس از جنگ جهانی دوم استفاده از علف‌کش‌های فنوکسی[1] و حشره‌کش کلره[2] به‌صورت گسترده صورت پذیرفت. در اواسط دهه ۱۹۶۰ استفاده از مواد شیمیایی دارای مواد سمی بسیار زیاد شد. در دهه‌های اخیر استفاده گروهی از آفت‌کش‌ها ممنوع شده و موادی با نیمه عمر پایین‌تر مدنظر قرار گرفته است. میزان استفاده از آفت‌کش‌ها در دهه ۱۹۶۰، ۱۹۸۰ و ۲۰۰۰ به‌ترتیب برابر ۱۸۲، ۳۸۶ و ۴۱۱ میلیون کیلوگرم بوده است (Gevao و Jones، ۲۰۰۲).

۲-۲-۲- اثرات ورود رسوبات به منابع آب

مجموع ذخیره مخازن سدها در سطح جهان در حدود ۷۰۰۰ میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود که از این مقدار، سالانه به‌طور میانگین یک درصد به‌علت رسوب‌گذاری از دست می‌رود و حتی متوسط این نرخ در بعضی

[1] Phenoxy
[2] Organochlorine

از کشورها به بیش از یک درصد هم می‌رسد (جدول ۲-۳). به‌گونه‌ای که در کشور چین به‌صورت سالانه حدود ۲/۳ درصد از حجم مخازن توسط رسوبات انباشته می‌شود (Jacobsen، ۲۰۰۹).

جدول ۲-۳- متوسط رسوب‌گذاری سالانه در مخازن برخی از کشورهای جهان

کشور	متوسط نرخ رسوب‌گذاری
چین	۲/۳
ترکیه	۱/۵
هندوستان	۰/۷۲
ایران	۰/۶۵
مراکش	۰/۴۵
آمریکا	۰/۲۲
ژاپن	۰/۱۵

در این زمینه عمر مفید[1] دوره‌ای است که در آن مدت مخزن سد مطابق اهداف اولیه و اصلاح‌شده مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بهره‌برداری مخزن پس از دوره عمر مفید مخزن اقتصادی نیست، ولی به‌دلایل مختلفی چون اجتماعی، سیاسی، زیست‌محیطی و یا مسایل دیگر از آن بهره‌برداری می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۹۱).

کاهش عمر مفید سد بیشتر مربوط به از دست رفتن حجم مفید مخزن و به‌دلیل نهشته شدن رسوب است و مسائل سازه‌ای کمتر در آن نقش دارند (Strand و Pemberton، ۱۹۸۲). بنابراین درصدی از حجم تمام مخازن سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های طبیعی، در اثر ورود رسوب پر می‌شود. اگر از قبل پیش‌بینی و روش‌های کنترل مناسب مد نظر نباشد، به‌تدریج از حجم اولیه مخزن کاسته شده و ممکن است مخزن دچار مشکل شود. یکی از این روش‌ها درنظرگرفتن ظرفیتی یدکی به نام حجم مرده است که برای تجمع رسوبات در طول عمر اقتصادی پروژه و در قالب حجمی مضاف بر حجم مفید مخزن طراحی می‌شود. اگر این ظرفیت بیش از پتانسیل تولید رسوب آبخیز طراحی شود، مخارج اولیه پروژه را افزایش می‌دهد و اگر کمتر از حجم موردنیاز در نظر گرفته شود، باعث پر شدن مخزن در زمان کوتاه‌تری نسبت به عمر مفید سد خواهد شد و ادامه ورود رسوبات باعث تقلیل ظرفیت حجم مفید سد می‌شود (طلوعی، ۱۳۸۴).

[1] Reservoir Life

در این راستا رسوب‌گذاری در مخزن سد به‌وسیله تعریف نیمه عمر مخزن قابل بیان است. نیمه‌عمر مخزن مدت زمان لازم برای پرشدن ۵۰ درصد حجم سد از رسوب را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که نیمه‌عمر برابر نصف زمان لازم برای پرشدن مخزن از رسوب نیست، زیرا راندمان تله‌اندازی ثابت نیست و باگذشت زمان کاهش می‌یابد. ازاین‌رو مفهوم نیمه‌عمر نشانگر واقعی‌تری از عمر مخزن سد است. طول عمر مفید سد نیز برابر مدت زمان لازم برای پرشدن ۸۰ درصد حجم مخزن از رسوب خواهد بود (شفاعی بجستان، ۱۳۹۱). در این‌صورت با داشتن داده‌های رسوب، جریان ورودی و خصوصیات رسوب می‌توان مدت زمان فوق را پیش‌بینی کرد. با توجه به اینکه این مدت زمان تابعی از رسوب وارد شده، وزن واحد حجم رسوب نهشته‌شده و هم‌چنین راندمان تله‌اندازی است، بنابراین پیش بینی دقیق عمر مفید سد پس از جمع‌آوری داده‌های صحرایی موردنیاز امکان‌پذیر است. در جدول ۲-۴ مجموعه‌ای از اثرات رسوب‌گذاری در بالادست، درون و پایین‌دست سد را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴- اثرات زیست‌محیطی ناشی از ورود رسوبات به سد

نوع اثر	نحوه اثر
بالا دست مخزن	
بالاآمدن کف و ایجاد دلتا	نهشته‌شدن مواد رسوبی در بالادست مخزن، باعث بالاآمدن بستر رودخانه و در نتیجه افزایش تراز آب در زمان سیلاب می‌شود و یا به‌عبارتی مناطق بیشتری در معرض سیل قرار می‌گیرند. افزایش تبخیر و تعرق نیز از آثار بالاآمدن بستر رودخانه است. البته نهشته‌شدن رسوب در بالادست رودخانه، باعث کاهش تلفات حجم مخزن می‌شود. زیرا رسوب قبل از رسیدن به مخزن ترسیب می‌شود. رشد درختان در منطقه دلتا منطقه مناسبی برای جانوران وحشی ایجاد می‌کند.
درون مخزن	
تقلیل حجم مخزن	از توانایی سد برای کنترل سیل و تولید برق کاسته می‌شود.
انتقال آلاینده‌ها	ترسیب رسوبات و آلاینده‌های همراه آن‌ها باعث کاهش کیفیت آب مخزن می‌شود. هم‌چنین رسوبات آلی با مصرف اکسیژن باعث کاهش کیفیت آب خواهند شد.
افزایش گل‌آلودگی	باعث کاهش عمق نفوذ نور به آب شده و بر حیات آبزیان اثرگذار است. از سوی دیگر شرایط نامناسبی برای استفاده تفریحات آبی ایجاد می‌کند.
افزایش آلودگی هوا	درصورت پایین‌رفتن سطح آب مخزن، رسوبات ریزدانه در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند.
کاهش عمق مسیرهای آبی	ترسیب مواد در مخزن ممکن است مسیرهای قایق‌ها و وسایل آبی را مسدود کند.

نوع اثر	نحوه اثر
پایین‌دست مخزن	
کف‌کنی، فرسایش کنار رودخانه‌ای و تغییر شکل رودخانه‌های مئاندری	کف‌کنی رودخانه باعث تشدید تخریب سواحل شده، پایین‌آمدن کف رودخانه اصلی موجب شروع فرسایش کف رودخانه‌های فرعی و شروع فرسایش پس‌رونده می‌شود. بستر رودخانه به‌تدریج خیلی درشت‌دانه شده و برای تخم‌ریزی آبزیان مکان مناسبی نخواهد بود. در بیشتر بازه‌های رودخانه علی‌رغم کاهش دبی سیلابی، تشدید فرسایش کناره‌ها و افزایش قوس مئاندرها به‌دلیل کف کنی و کاهش شدید سطح آب به‌ویژه در فصول خشک است.
کاهش دبی سیلابی	کاهش دبی غالب رودخانه باعث کاهش ابعاد رودخانه و رشد پوشش گیاهی می‌شود. این عوامل باعث کاهش ظرفیت انتقال شده و یا به‌عبارتی اثر مخزن در کنترل سیلاب کاهش می‌یابد.
رسوب‌زدایی	زمان و مقدار رسوب‌زدایی از سد باعث تاثیرات منفی محیط زیستی، اجتماعی و فعالیت‌های اقتصادی می‌شود.

۲-۲-۳- فرسایش خاک و تغذیه‌گرایی محیط‌های آبی

تغذیه‌گرایی محیط‌های آبی[1] به افزایش مقدار مواد غذایی مورد نیاز رشد گیاهان در محیط‌های آبی اشاره دارد که باعث رشد بیش از حد گروهی از موجودات می‌شود. در نتیجه این فرآیند اکسیژن آب کاهش می‌یابد و جانوران هوازی با مشکل مواجه می‌شوند. این پدیده به دو صورت طبیعی و انسانی روی می‌دهد، در حالت اول سرعت ورود مواد کم بوده و زیست‌بوم قابلیت بازگشت دارد. درحالی که در اثر فعالیت‌های انسانی مقدار زیادی نیتروژن و فسفر وارد این محیط‌ها می‌شوند و برهم‌خوردن مقاومت زیست‌بوم را در پی خواهند داشت. غلظت بالای عناصر غذایی در آب باعث رشد سریع جلبک‌ها شده و در نتیجه موجب مرگ سایر گیاهان و جانداران می‌شود. از سوی دیگر از قابلیت آب برای کاربردهای صنعتی، شرب، کشاورزی و تفرج می‌کاهد (Blanco و Lal، ۲۰۰۸).

فرسایش خاک و بالارفتن سطح عناصر غذایی یا پدیده تغذیه‌گرایی در محیط‌های آبی دو مشکل مهم جهانی هستند که زندگی انسان را دچار مشکل کرده‌اند. تحقیقات نشان داده که این دو پدیده با هم در ارتباط هستند. از یک‌سو فسفر عامل تعیین کننده در تغذیه‌گرایی منابع آب است و از سوی دیگر مقدار فسفر در رودخانه از

[1] Eutrophication

طریق رسوبات حاصل از فرسایش خاک به‌ویژه از اراضی کشاورزی تعیین می‌شود (Ekholm و Lehtoranta، ۲۰۱۲). در این رابطه رسوبات حاصل از فرسایش خاک در انتقال و چرخه جذب فسفر در محیط‌های آبی نقش مهمی دارند.

۲-۳- اثرات درون و برون‌منطقه‌ای حفاظت خاک

با توجه به خسارت فرسایش خاک بر زندگی انسان، اقدامات حفاظت خاک از دیرباز مورد توجه قرار داشته است. به‌طور کلی دو نوع اقدام برای حفاظت خاک وجود دارد. این اقدامات در دامنه (بیولوژیک و یا بیومیکانیکی) یا آبراهه (اغلب میکانیکی) صورت می‌گیرد. در این میان اقدامات در سطح دامنه با هدف کنترل یا کاهش فرسایش در محل وقوع صورت می‌گیرد. تقلیل اثرات درون‌منطقه‌ای و گاهاً اثرات برون‌منطقه‌ای از اقدامات حفاظت خاک در دامنه‌ها مورد انتظار است. از سوی دیگر اقدامات اجراشده در آبراهه‌ها عموما بر انتقال رسوب و توان حمل جریان اثرگذار بوده و قادرند بر خسارت‌های برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک اثرگذار باشند. البته اجرای اقدامات در آبراهه‌ها قادرند از فرسایش درون کانال نیز جلوگیری کنند.

در مجموع اقدامات حفاظت خاک با چهار اثر اصلی شامل کاهش کنش ذرات، افزایش نفوذ رواناب به خاک، حفظ عناصر غذایی و ماده آلی خاک و کاهش انتقال رسوب، منجر به کاهش خسارت‌های فرسایش خاک می‌شوند.

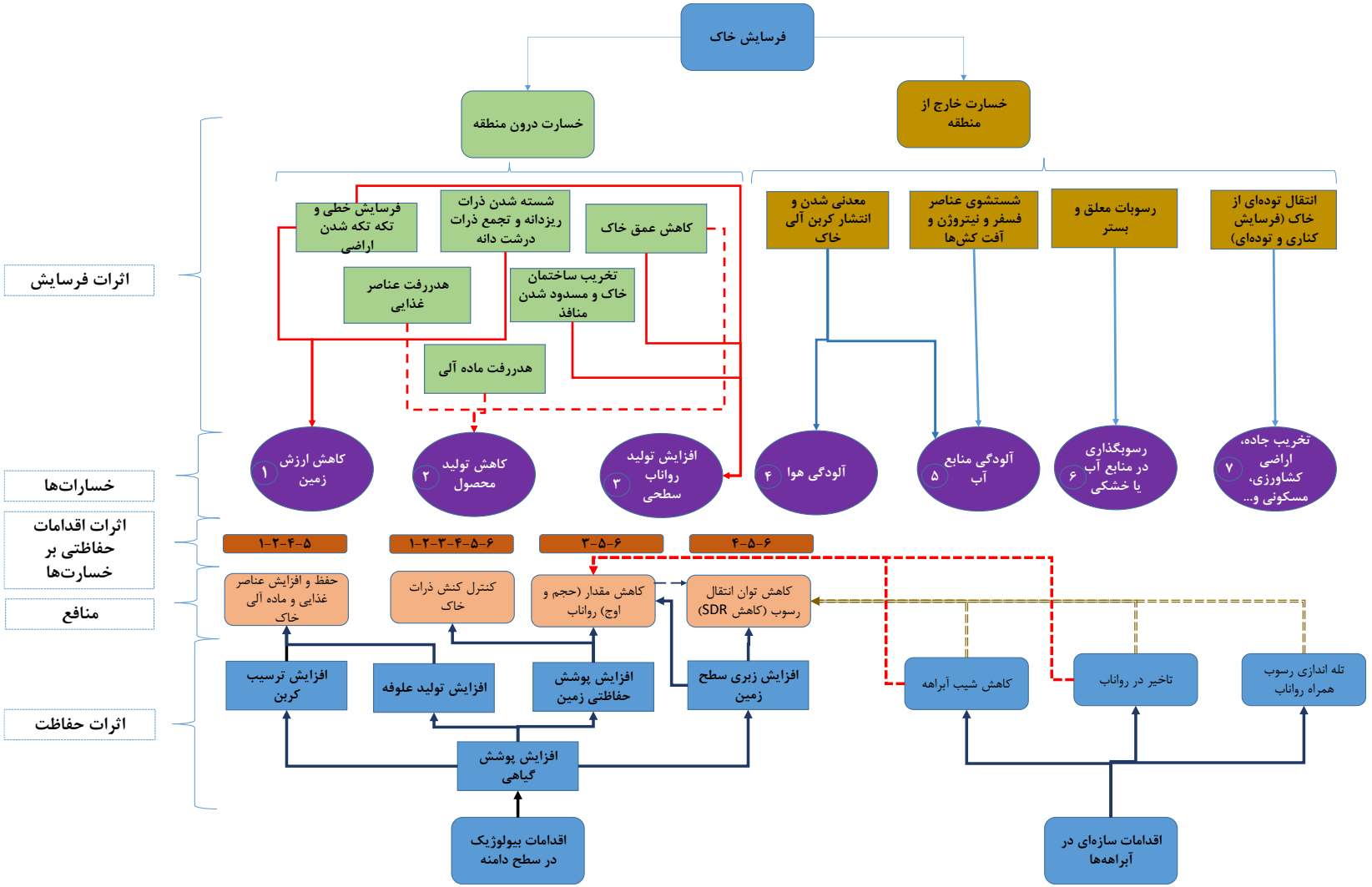
شکل ۲-۵ اجزای خسارت فرسایش خاک و هم‌چنین نحوه اثرگذاری اقدامات حفاظتی بر خسارت‌های درون و برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اجرای اقدامات بیولوژیک (یا بیومیکانیکی) در سطح دامنه‌ها باعث افزایش پوشش گیاهی خواهد شد. با توجه به نوع و نحوه اجرای اقدامات، نحوه مدیریت و بهره‌برداری، مسائل اجتماعی و همچنین شرایط اقلیمی، انتظار می‌روند پوشش گیاهی پس از کاشت و استقرار در محل، باعث افزایش پوشش حفاظت سطح خاک، افزایش ضریب زبری، افزایش علوفه و افزایش ترسیب کربن خاک می‌شود. تحقیقات متعدد (فضلی و نور، ۱۳۹۶) نشان داده‌اند که افزایش حفاظت سطح خاک موجب کاهش قدرت فرسایندگی قطرات باران و کمتر شدن کنش ذرات خاک می‌شود. از سوی

دیگر با کاهش سرعت و قطر قطرات باران و هم‌چنین عدم تخریب خاکدانه‌ها، بر میزان نفوذ باران به خاک افزوده شده و انتظار کاهش حجم و دبی اوج را انتظار داشت.

افزایش پوشش گیاهی موجب بالارفتن ضریب زبری سطح خاک خواهد شد (Martinez و همکاران، ۲۰۰۶). مطابق جدول‌های ارائه‌شده توسط مانینگ (مهدوی، ۱۳۹۵) افزایش ضریب زبری منجر به کاهش سرعت جریان سطحی می‌شود. با کاهش سرعت رواناب، انتظار نفوذ بیشتر در خاک و کاهش توان حمل جریان مورد انتظار است. از سوی دیگر پوشش گیاهی مانند فیلتر عمل کرده و موجب تله‌اندازی رسوب می‌شود.

افزایش تولید علوفه نیز منجر به ترسیب کربن و حفظ مواد غذایی خاک می شود. از سوی دیگر منجر به افزایش درآمد تولید علوفه خشک می‌شود. تحقیقات پیشین (پرویزی، ۱۴۰۲) نشان داده‌اند که اقدامات بیولوژیک منجر به افزایش ترسیب کربن می شود این در حالی است که ترسیب کربن علاوه بر کنترل فرسایش کرن ذخیره شده در خاک است.

اقدامات سازه‌ای نیز در مجموع موجب کاهش شیب آبراهه، تله اندازی رسوب و ذخیره و تأخیر رواناب می‌شوند. این فرآیندها خود را در کاهش انتقال رسوب (نسبت تحویل رسوب) و کاهش رواناب (حجم و اوج رواناب) نشان می‌دهند و در نهایت منجر به کاهش خسارت‌های برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک می‌شوند.



شکل ۲-۵ مدل مفهومی اثرات فرسایش و حفاظت خاک در مقیاس آبخیز

۲-۴- گام به گام ارزیابی اقتصادی پروژه حفاظت خاک و آبخیزداری

۲-۴-۱- جمع‌آوری اطلاعات در زمینه اقدامات حفاظت خاک (منافع حفاظت خاک)

مطابق اطلاعات ارائه‌شده در مدل مفهومی (شکل ۲-۵) هر یک از اقدامات حفاظت خاک دارای اثرگذاری مشخصی بر کاهش فرسایش خاک (منافع درون‌منطقه‌ای) یا رسوب‌دهی (منافع برون‌منطقه‌ای) هستند. البته ممکن است اقدامات هم‌زمان دارای منافع درون و برون‌منطقه‌ای نیز باشند. براساس اهداف و محل اجرا، اقدامات حفاظت خاک در دو دسته کلی بیولوژیک (غالبا در سطح دامنه) و سازه‌ای (غالبا در آبراهه) تقسیم‌بندی شدند.

در زمینه اقدامات بیولوژیک نوع اقدام باید تعیین شود، زیرا اقدامات مختلف در برخی از منافع باهم تفاوت دارند. از سوی دیگر سطح اجرای اقدامات در ابتدای پروژه و کیفیت فعلی آنها باید توجه شود. در نهایت کسب اطلاعات در زمینه سال اجرا و هزینه‌های اجرا در هر سال، در ارزیابی‌های اقتصادی مهم است.

۲-۴-۲- منفعت اجرای اقدامات حفاظت خاک

۱- افزایش تولید علوفه منطقه

الف) درصورت اجرای اقدامات بیولوژیک در منطقه، باید مقدار افزایش تولید علوفه بنحوی برآورد شود. بهترین راهکار برای این منظور مقایسه مقدار تولید علوفه در محل اجرای اقدامات بیولوژیک و منطقه مشابهی که اقدامات بیولوژیک در آن اجرا نشده است، در این حالت، می‌توان اختلاف مقدار تولید علوفه در دو منطقه را به اقدامات بیولوژیک نسبت داد.

ب) پس از کسر مقدار تولید علوفه از منطقه شاهد در سه ضریب اصلاحی شامل ضریب تبدیل علوفه تر به خشک (حدود ۳۳ درصد)، ضریب تبدیل علوفه قابل‌برداشت (۵۰ درصد) و ضریب تبدیل قیمت علوفه به جو (۴۰ درصد)، ضرب شود (نور و همکاران، ۱۴۰۱).

ج) در نهایت با توجه به قیمت جو در هر سال و افزایش مقدار علوفه (قابل تبدیل به جو) می‌توان منافع اقتصادی این بخش را محاسبه کرد.

۲- منفعت اقدامات بیولوژیک بر کنترل فرسایش خاک و حفظ عناصر غذایی خاک

الف) یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کمی‌سازی اقدامات بیولوژیک بر فرسایش خاک، استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش خاک و تغییر پارامتر مربوط به پوشش گیاهی متناسب با افزایش پوشش گیاهی است (سایر عوامل ثابت می‌مانند). بنابراین در گام اول باید درصد افزایش پوشش گیاهی در اثر اقدامات بیولوژیک مشخص شود. برای این منظور می‌توان از مقایسه با منطقه شاهد استفاده کرد.

ب) در این زمینه عامل C معادله جهانی فرسایش خاک دارای جزییات مناسبی برای این منظور است. مقدار افزایش پوشش گیاهی بر شاخص C مدل USLE اثرگذار است و براساس آن مقدار فرسایش خاک در اثر اجرای اقدامات بیولوژیک و افزایش پوشش گیاهی، کاهش می‌یابد.

ج) مقدار عناصر غذایی نیز با توجه به کنترل فرسایش خاک و محاسبات ارائه‌شده برای هزینه جایگزین عناصرغذایی، محاسبه می‌شود. همچنین با داشتن قیمت بازار آزاد هر کود و هزینه کودپاشی، می‌توان منافع این بخش را محاسبه کرد.

مقدار کود مورد نیاز= (درصد عنصر در کود/۱۰۰)* (غلظت عناصر پرمصرف در خاک * مقدار فرسایش خاک)

۳- درآمد حاصل از ترسیب کربن اقدامات بیولوژیک

براساس نتایج تحقیق پرویزی (۱۴۰۲) در پروژه‌های احیای مراتع انتظار ترسیب سالانه دست‌کم یک تن کربن در هر هکتار گزارش شده است. براین‌اساس درآمد حاصل از ترسیب هر تن کربن، حدود ۱۰۰ دلار است.

۴- اثر اقدامات بیولوژیک بر ذخیره رواناب در سطح دامنه

الف) برای کمی‌سازی اثرات اقدامات بیولوژیک بر رواناب، از تغییرات شاخص «شماره منحنی» استفاده می‌شود. در روش سازمان حفاظت خاک (SCS)، تغییرات CN مستقیماً بر پارامترهای «پتانسیل ذخیره بیشینه‌ای»

(S) و «تلفات اولیه» (I_a) اثرگذار است. با تعیین مقادیر CN قبل و بعد از اجرای طرح، می‌توان حجم رواناب حاصل از بارش‌های معین را برآورد کرد.

ب) به‌دلیل ماهیت پویای پوشش گیاهی و عدم قطعیت‌های اقلیمی (از جمله نوسانات رشد، استقرار و بقای گیاهان و وقوع دوره‌های خشکسالی یا ترسالی)، نمی‌توان تمام رواناب کنترل‌شده را به‌عنوان آب ذخیره‌شده در نظر گرفت. با توجه به اینکه بخش عمده بارش‌ها در بسیاری از مناطق کشور در فصل زمستان و اوایل فصل بهار رخ می‌دهد- زمانی که خاک عمدتاً در وضعیت نزدیک به اشباع قرار داشته و نرخ تبخیر در کمینه ممکن است (نور و همکاران، ۱۴۰۱)- پیشنهاد می‌شود در محاسبات، تا ۵۰ درصد از رواناب کنترل‌شده به‌عنوان «حجم آب ذخیره‌شده و قابل بهره‌برداری» لحاظ شود.

ج) در گام نهایی، برای ارزیابی اقتصادی این اقدامات، باید ارزش ریالی آب ذخیره‌شده محاسبه شود. در این راستا، تعیین قیمت پایه برای هر مترمکعب آب با درنظرگرفتن ارزش اقتصادی منطقه، هزینه فرصت و نرخ‌های مصوب، نقشی تعیین‌کننده در برآورد درآمد نهایی خواهد داشت.

۵- اثر اقدامات آبخیزداری بر کاهش رسوب‌دهی

اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری از سه سازوکار اصلی موجب کاهش رسوب‌دهی حوضه می‌شوند:

الف) کاهش فرسایش در منبع (تولید رسوب): اجرای اقدامات بیولوژیک و مدیریتی بر روی دامنه‌ها، با افزایش پوشش گیاهی و بهبود پایداری ساختاری خاک، انرژی برخورد قطرات باران را مستهلک کرده و سرعت رواناب سطحی را کاهش می‌دهد. این امر موجب کاهش فرسایش خاک در سطح حوضه شده و میزان ذرات جداشده و قابل‌انتقال را تقلیل می‌دهد. در ارزیابی‌های اقتصادی و هیدرولوژیک، در شرایطی که نسبت تحویل رسوب (SDR) ثابت فرض شود، می‌توان کاهش خالص رسوب‌دهی حوضه را صرفاً تابعی از تفاوت نرخ فرسایش خاک قبل و بعد از اجرای پروژه حفاظت خاک در نظر گرفت.

ب) تله‌اندازی رسوب (ترسیب در مسیر انتقال): سازه‌های آبخیزداری (اعم از بندهای گابیونی، سنگی- ملاتی و خاکی) با ایجاد موانع فیزیکی در مسیر آبراهه‌ها، موجب کاهش سرعت جریان می‌شوند که این وضعیت، شرایط لازم برای تله‌اندازی رسوبات معلق و بارکف را فراهم می‌آورد. براساس مبانی مهندسی رودخانه، این

سازه‌ها بخشی از بار رسوبی جریان را در مخزن خود تثبیت کرده و از انتقال آن به پایین‌دست جلوگیری می‌کنند. به‌منظور برآورد دقیق، متوسط سالانه کاهش رسوب‌دهی ناشی از این سازه‌ها از طریق محاسبه حجم رسوب انباشته‌شده در مخزن سازه تقسیم بر عمر مفید طرح (رسوب‌گیری کل) تعیین می‌شود.

ج) اصلاح نسبت تحویل رسوب (SDR): علاوه بر دو سازوکار پیشین، مداخلات آبخیزداری از طریق تغییر در پاسخ هیدرولوژیکی حوضه بر «نسبت تحویل رسوب» تأثیرگذارند. اجرای پلکانی سازه‌ها و افزایش پوشش گیاهی، با افزایش زبری سطح و طول مسیر جریان، منجر به کاهش دبی اوج و حجم رواناب می‌شود (نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۳). براساس تئوری ویلیامز (Williams، ۱۹۷۷، به نقل از بیات و مرادی، ۱۳۹۳)، SDR تابعی از ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه و متغیرهای هیدرولوژیکی است. مطابق با این رویکرد، کاهش دبی اوج و حجم رواناب ناشی از عملیات آبخیزداری، مستقیماً قدرت حمل رسوب جریان[1] را تضعیف کرده و موجب کاهش نرخ SDR می‌شود. در این حالت، برخلاف فرض ساده‌انگارانه قبلی، اثر هم‌افزای «کاهش تولید رسوب» و «کاهش نسبت تحویل رسوب»، منجر به کاهشِ با شدتی مضاعف در بار رسوبی خروجی از حوضه خواهد شد.

$$D=11.8(Q\times q_p)^{0.56}\div R\times A$$

۶- اثر سازه‌های حفاظت خاک بر ذخیره رواناب

ارزیابی اثربخشی سازه‌های آبخیزداری (از قبیل بندهای سنگی-ملاتی و گابیونی) در مدیریت رواناب، مستلزم برآورد دقیق ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و پویایی تغییرات آن در طول زمان است. این ارزیابی براساس مراحل و مولفه‌های کلیدی زیر صورت می‌گیرد:

الف) تعیین ظرفیت اسمی و پویایی حجمی سازه‌ها

حجم مفید مخزن سازه باید در مرحله طراحی (فاز مطالعاتی) به‌دقت براساس مورفولوژی آبراهه و دبی طراحی تعیین شود. بااین‌حال، ظرفیت واقعی ذخیره‌سازی رواناب یک متغیر ایستا نیست. در طول زمان،

[1] . Sediment Transport Capacity

فرآیند رسوب‌گذاری منجر به کاهش تدریجی «حجم مفید» و افزایش «حجم رسوب انباشته» می‌شود. بنابراین، پایش ادواری حجم رسوبات برای تعیین نرخ کاهش ظرفیت سازه ضروری است.

ب) تفکیک ظرفیت ذخیره‌سازی: بخش فیزیکی و بخش متخلخل

برای ارزیابی دقیق اثر سازه بر ذخیره رواناب، ظرفیت مخزن را باید به دو بخش تقسیم کرد:

حجم آزاد: بخشی از مخزن که توانایی ذخیره‌سازی ۱۰۰ درصدی رواناب ورودی را داراست.

فضای متخلخل رسوبات: بخشی از مخزن که توسط رسوبات پر شده است. برخلاف تصور عمومی، این فضا کاملاً غیرقابل استفاده نیست. براساس مطالعات هیدرولوژیک (مانند Verstraeten و همکاران، ۲۰۰۳)، رسوبات ته‌نشین‌شده در مخازن دارای تخلخل (Porosity) قابل توجهی هستند که می‌تواند در نگهداری موقت جریان زیرسطحی و کنترل دبی اوج نقش داشته باشد. ضریب تخلخل (n) بسته به بافت رسوبات (شن، ماسه، سیلت) متفاوت بوده و باید در محاسبات دقیق لحاظ شود. این رویکرد نشان می‌دهد که حتی پس از پرشدن مخزن، سازه همچنان در مدیریت سیلاب و کاهش دبی اوج مشارکت دارد.

د) ارزش‌گذاری اقتصادی و هزینه فرصت آب

یکی از اهداف مهم حفاظت خاک، کاهش ورود رسوبات به مخارن است. برای این منظور لازم است مراحل زیر طی شود:

الف) در ابتدا حجم سد، هزینه ساخت و سال ساخت سد مخزنی باید تعیین شود.

ب) در ادامه با توجه به نرخ تنزیل هزینه ساخت سد مخزنی به قیمت‌های روز محاسبه می‌شود. هم‌چنین با توجه به حجم آب قابل ذخیره‌سازی در طول دوره و هزینه ساخت در شرایط کنونی، می‌توان قیمت هر مترمکعب آب ذخیره‌شده در سد را محاسبه کرد.

ج) مقدار فرسایش خاک در منطقه تعیین و با توجه به نرخ SDR مقدار رسوب ورودی به مخزن سد در هر سال تعیین می‌شود.

د) با توجه به وزن مخصوص رسوبات منطقه، می‌توان وزن رسوبات را به حجم تبدیل کرد و در نتیجه کاهش حجم قابل ذخیره‌سازی سد در هر سال تعیین می‌شود.

ه) در نهایت براساس کاهش حجم سد در هر سال و هزینه هر متر مکعب آب (براساس هزینه ساخت سد) میزان خسارت در هر سال تعیین می‌شود.

هزینه فرصت آب ذخیره‌شده در سازه‌ها باید با هزینه‌های جایگزین مقایسه شود. در واقع، هر مترمکعب آب ذخیره‌شده در فضای مخزن (اعم از فضای آزاد یا فضای متخلخل رسوبات)، یک سرمایه اقتصادی است که از خسارت‌های ناشی از سیلاب و کم‌آبی جلوگیری می‌کند.

۲-۴-۳- ارزیابی اقتصادی پروژه

روش تنزیلی به محقق اجازه می‌دهد تا اجرای پروژهایی را که دارای اشکال مختلف جریان‌های زمانی (شیوه‌های زمانی دستیابی به هزینه‌ها و درآمدها در طول عمر پروژه با هم دیگر متفاوت‌اند) و طول بهره‌دهی متفاوت‌اند را مورد بررسی قرار دهد. برای ارازیابی مالی پروژه‌های آبخیزداری و حفاظت خاک از روش‌های ارزیابی پروژه شامل نرخ بازده داخلی سرمایه‌گذاری[۱]، ارزش کنونی خالص سرمایه‌گذاری[۲] و نسبت منفعت به هزینه[۳] استفاده می‌شود.

۳- رویکردهای ارزیابی اقتصادی فرسایش و حفاظت خاک

در ارزیابی اقتصادی طرح‌های حفاظت از خاک و مدیریت آبخیز، جلوگیری از خسارت نوعی سود محسوب می‌شود و هم ازدست‌رفتن فرصت‌های سود به‌عنوان هزینه در نظر گرفته می‌شود. برای سنجش ارزش این طرح‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد، اما همه پیامدهای اقتصادی آن‌ها به‌راحتی قابل محاسبه یا ارزش‌گذاری پولی نیستند. برای مثال، احداث یک مخزن آب ممکن است باعث از بین رفتن یا گسترش برخی زیستگاه‌ها شود که سنجش مالی آن دشوار است.

مبنای ارزیابی اقتصادی این طرح‌ها بر این فرض استوار است که اجرای آن‌ها تغییراتی در حوزه آبخیز ایجاد می‌کند. این تغییرات پیامدهای فیزیکی مختلفی به همراه دارند و بخشی از این پیامدها که قابل ارزش‌گذاری

---

[1] Internal Rate of Return, IRR
[2] Net Present Worth, NPW
[3] Benefit-Cost Ratio

مالی باشند، به‌عنوان خروجی‌های اقتصادی طرح شناخته می‌شوند. اندازه‌گیری پیامدهای فیزیکی با روش‌های علمی انجام می‌شود و اثرات کمی و کیفی بر منابع آب و خاک نیز در نهایت به پیامدهای مالی و تغییر در بهره‌وری منابع منجر می‌شوند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۲).

به‌دلیل گستردگی و تنوع پیامدهای ناشی از فرسایش خاک، سنجش و کمی کردن تمام آن‌ها امری پیچیده و دشوار به شمار می‌رود. زیرا هر گروه از زیان‌ها نیازمند یک مدل ارزش‌گذاری و اطلاعات خاص خود است. علاوه‌براین، برخی از این زیان‌ها (مانند مسائل مهاجرت، وضعیت اشتغال، آسیب‌های وارد بر تنوع زیستی و تغییرات آب و هوایی) جنبه‌های غیرملموس و پنهانی دارند و ارزیابی یا ارزش‌گذاری بر آن‌ها عملاً غیرقابل انجام یا چالش‌برانگیز است. در ادامه براساس راهنمای ارزیابی اقتصادی پروژه‌های آبخیزداری (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۲)، کتاب اقتصاد فرسایش خاک (۱۳۸۴) و نشریه فنی روش‌شناسی تعیین خسارت‌های اقتصادی فرسایش سطحی-شیاری خاک: بررسی موردی دیمزارهای شونه اسدلی خراسان شمالی (پرویزی و همکاران، ۱۴۰۴) به خلاصه‌ای از روش‌های رویکرد هزینه جایگزینی، روش هزینه جانشین، روش هزینه فرصت، روش بودجه‌بندی، رویکرد هزینه خسارت اجتناب شده، رویکرد افت بهره‌وری خاک، رویکرد ارزش زمین، رویکرد ارزش‌گذاری ترجیحی و روش هزینه سفر اشاره می‌شود.

رویکرد هزینه جایگزینی، هزینه جایگزینی خاک آسیب‌دیده از فرسایش با خاک تازه را برآورد می‌کند و عواملی نظیر هزینه‌های یافتن و تأمین خاک نو، حمل آن به محل فرسایش‌دیده و پخش آن برای احیای حاصلخیزی خاک را مد نظر قرار می‌دهد (قربانی و حسینی، ۱۳۸۶). روش مذکور یکی از پرکاربردترین روش‌های برآورد خسارت‌های مالی فرسایش خاک است و معمولا برای کمی‌سازی اثرات درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک بر هدررفت عناصر غذایی استفاده می‌شود. بااین‌حال برخی تحقیقات، از این روش برای محاسبه هزینه‌های برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک، شامل برآورد هزینه لایروبی رسوب انباشته‌شده در مخازن (به‌عنوان جایگزینی برای ظرفیت ازدست‌رفته) در مقایسه با هزینه ساخت مخازن جدید، در اندونزی (Möller و Ranke، ۲۰۰۶) و آمریکا (Texas Water Development Board، ۲۰۲۳)، استفاده کرده‌اند.

روش هزینه جانشین[1] هزینه استفاده از جایگزین‌ها برای جبران یا کاهش اثرات خسارت را تخمین می‌زند، بدون اینکه بازسازی کامل انجام شود. در این روش تمرکز بر هزینه‌های عملیاتی یا فناوری‌های جایگزین است که خدمت ازدست‌رفته را "جایگزین" می‌کنند، درحالی که در روش هزینه جایگزین بازسازی آن مدنظر است. هم‌چنین، هزینه فرصت[2] یکی از مفاهیم کلیدی در اقتصاد است که به ارزش بهترین گزینه جایگزین (یا بهترین استفاده ممکن دیگر) اشاره دارد که با انتخاب یک گزینه خاص، از آن صرف‌نظر می‌شود. به عبارت دیگر، وقتی منابع محدود (مانند زمان، پول، نیروی کار یا زمین) به یک فعالیت اختصاص داده شود، هزینه فرصت برابر است با فایده یا سودی که از دست داده می‌شود اگر آن منابع (به جای آن فعالیت) به بهترین گزینه جایگزین اختصاص داده می‌شد. باید توجه داشت که هزینه اقدامات حفاظتی زیاد است و علاوه‌برآن سطح اراضی را هم کمتر خواهد کرد. بنابراین، در سال‌های اول ممکن است اراضی بدون اجرای اقدامات حفاظتی دارای تولید بیشتر و سود بیشتری باشند بااین‌حال با گذشت زمان و افزایش فرسایش خاک در مزرعه از سود این اراضی کاسته شده و در یک نقطه تقاطع به‌هم خواهند رسید. در این حالت سود حاصل از روش‌های تولیدی با حفاظت، بیشتر از بدون حفاظت می‌شود و در چنین شرایطی انگیزه‌های لازم برای سرمایه‌گذاری در حفاظت خاک فراهم می‌شود.

در صورتی که آثار اجرای پروژه‌های آبخیزداری موجب افزایش دسترسی کشاورزان پایین‌دست به آب بیشتری شده باشد، می‌توان از روش بودجه‌بندی برای ارزیابی آثار مالی پروژه استفاده کرد. در فرآیند برآورد ارزش یا فایده‌های آب کشاورزی می‌باید ارزش خالص تولیدات کشاورزی در شرایط آینده با و بدون اجرای پروژه در محدوده مورد نظر برآورد شود. تفاوت شرایط آینده با و بدون اجرای پروژه به‌عنوان آثار مالی پروژه در محاسبات ارزیابی اقتصادی در نظر گرفته شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۹۲)

رویکرد هزینه خسارت اجتناب شده[3]، یک رویکرد ارزش‌گذاری مبتنی بر هزینه در اقتصاد محیطی است که ارزش خدمات اکوسیستم را براساس هزینه‌های خسارت‌های جلوگیری‌شده یا اقدامات پیشگیرانه (مانند

1 Substitute Cost Method
2 Opportunity Cost Method
3. Damage Cost Evoided

هزینه‌های دفاعی یا جایگزینی) تخمین می‌زند. این روش فرض می‌کند که هزینه‌هایی که افراد یا جامعه برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از فقدان خدمات اکوسیستم (مانند حفاظت از سیل توسط تالاب‌ها یا جلوگیری از آلودگی آب) صرف می‌کنند، کمینه ارزش آن خدمات را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته ضروری است که رویکرد هزینه خسارت اجتناب‌شده بر پایه مفهوم "هزینه‌های دفاعی[۱]" استوار است و ارزش خدمات اکوسیستمی (مانند حفظ خاک در آبخیزها) را از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های مستقیم جلوگیری‌شده از خسارت‌ها تخمین می‌زند. در مقابل، رویکرد هزینه فرصت براساس نظریه بده‌بستان[۲]های اقتصادی عمل می‌کند و ارزش گزینه‌های جایگزین از دست‌رفته[۳] را محاسبه می‌کند. در زمینه فرسایش خاک، این رویکرد به فواید ازدست‌رفته ناشی از عدم انتخاب اقدامات حفاظتی اشاره دارد.

یکی دیگر از روش‌ها رویکرد افت بهره‌وری خاک[۴] است. در این روش، خسارت حاصل از فرسایش خاک از طریق مقدار تولید ازدست‌رفته با قیمت‌های بازار مقایسه و برآورد می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر هدف، برآورد ارزش اقتصادی بازدهی محصول ازدست‌رفته در اثر فرسایش خاک در محل باشد، نسبت به برآورد اندازه‌گیری بازدهی فیزیکی محصولات با و بدون فرسایش خاک مقایسه می‌شود و سپس تغییر در میزان محصول به‌دست می‌آید. به عبارتی دیگر، کاهش درآمد کشاورزان درنتیجه کاهش عملکرد محصول را در نظر می‌گیرد. هم‌چنین می‌تواند هزینه‌های غیرمستقیم مرتبط با کاهش تولید مواد غذایی، مانند افزایش قیمت مواد غذایی یا نیاز به واردات را در نظر بگیرد.

هزینه بهره‌برداری ناشی از هر منبع طبیعی، ارزش حال بهره‌برداری آتی است که با استفاده فعلی منبع حاصل می‌شود. در واقع بهره‌برداری نهایی از خاک در زمان حال، دارای هزینه فرصتی است که اثرات آن را بر سود آینده در بر می‌گیرد (حسینی و قرباتی، ۱۳۸۴). این مفهوم هزینه بهره‌بردار یا هزینه تخریب نامیده می‌شود. بدین‌معنی که هزینه بهره‌برداری در بطن هزینه فرصت قرار دارد و بیانگر آن است که بهره‌برداری‌های فعلی از خاک، از طریق تغییر میزان ذخایر منابع موجود در خاک بر سود آینده تأثیر می‌گذارد. به بیان دیگر،

---

[1] Defensive Expenditures
[2] Tradeoff
[3] Forgone Alternatives
[4]. Productivity loss approach

در صورت استفاده از هر واحد خاک در زمان حال، درآمدهای آینده کاهش خواهد یافت و ارزش حال این درآمدها، همان هزینه بهره‌برداری ناشی از فرسایش است. باید توجه داشت که هزینه بهره‌برداری، وابستگی شدیدی به نرخ تنزیل مورد استفاده دارد. نرخ‌های پایین تنزیل، باعث افزایش هزینه بهره‌بردار می‌شود درحالی که نرخ‌های بالای تنزیل، منجر به بهره‌برداری شدید می‌شود.

رویکرد ارزش زمین نیز یکی از روش‌های ارزش‌گذاری اقتصادی در ارزیابی خسارت‌های فرسایش خاک است که بر پایه کاهش ارزش سرمایه‌ای[1] زمین به‌عنوان یک دارایی تمرکز دارد. این رویکرد فرض می‌کند که فرسایش خاک، با ازدست‌رفتن لایه‌های سطحی و حاصلخیزی، ارزش کل زمین را کاهش می‌دهد، زیرا بهره‌وری کشاورزی، کیفیت اکوسیستم و پتانسیل اقتصادی آن (مانند درآمد آینده از محصولات) کم می‌شود. در این روش، خسارت فرسایش نه براساس هزینه‌های جایگزینی یا جلوگیری، بلکه براساس تفاوت ارزش بازار یا سرمایه‌ای زمین قبل و بعد از فرسایش محاسبه می‌شود. این رویکرد بخشی از تکنیک‌های مبتنی بر دارایی در اقتصاد کشاورزی و محیطی است و اغلب برای زمین‌های کشاورزی یا مرتعی در مناطق حساس به فرسایش استفاده می‌شود (Pimentel و Burgess، ۲۰۱۳).

رویکرد هزینه خسارت‌های، عمدتا برای محاسبه خسارت‌های ملموس و ناملموس فرسایش در خارج از محل استفاده شده است (Pretty و همکاران، ۲۰۰۰). در این زمینه خسارت‌هایی مانند کاهش کیفیت آب، تخریب زیستگاه حیات وحش، اخلال در خدمات اکوسیستم (مانند کنترل سیل، ترسیب کربن) در نظر گرفته می‌شود (Bandara و همکاران، ۲۰۰۱). هم‌چنین در بخش خسارت‌های زیرساختی، هزینه تعمیر یا جایگزینی زیرساخت‌های آسیب دیده در اثر فرسایش خاک مانند هزینه‌های مربوط به لایروبی مخازن سدها و رودخانه ها و هم‌چنین تعمیر جاده‌ها، پل‌ها و ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود. علاوه‌براین، ممکن است هزینه‌های مدیریت یا تغییر مسیر جریان آب برای جلوگیری از فرسایش بیشتر و آسیب‌های زیرساختی لحاظ شود. در بخش بهداشت و سلامتی، هزینه مسائل بهداشتی ناشی از فرسایش خاک مانند مشکلات تنفسی یا بیماری های ناشی از مصرف آب‌های آلوده برآورد می‌شود (Pretty و همکاران، ۲۰۰۰).

[1] Capital Value

رویکرد ارزش‌گذاری ترجیحی[1]، به‌عنوان یکی از روش‌های کلیدی در اقتصاد محیطی، برای تخمین ارزش‌های غیربازاری خدمات اکوسیستمی مانند حفاظت از خاک در برابر فرسایش به کار می‌رود. این رویکرد بر پایه استخراج ترجیحات فرضی افراد از طریق تکنیک‌هایی نظیر روش ارزش‌گذاری مشروط یا آزمایش‌های انتخاب با استفاده از نظرسنجی‌های ساختاریافته استوار است و ارزش را براساس تمایل به پرداخت یا تمایل به پذیرش برای حفظ یا از دست دادن این خدمات محاسبه می‌کند .

در زمینه فرسایش خاک، این روش خسارت‌های اقتصادی و غیراقتصادی (مانند کاهش حاصلخیزی، ازدست‌رفتن تنوع زیستی، آلودگی آب و تأثیر بر کیفیت زندگی جوامع وابسته) را از دیدگاه جامعه ارزش‌گذاری می‌کند، نه صرفاً بر پایه داده‌های بازارمحور و بنابراین جنبه‌های اجتماعی و فرهنگی را برجسته می‌سازد. برخلاف رویکردهای هزینه‌محور، این روش مستقیماً بر رفاه انسانی تمرکز دارد (Freeman و همکاران، ۲۰۱۴).

در نهایت روش هزینه سفر[2] مطرح است. این روش از روش‌های کلاسیک ارزش‌گذاری ترجیحات آشکار در اقتصاد محیطی است که برای تخمین ارزش اقتصادی استفاده‌ای از منابع طبیعی و خدمات اکوسیستمی، مانند مناطق تفریحی یا حفاظت‌شده، به کار می‌رود. روش هزینه سفر برای ارزش‌گذاری خسارت‌های غیربازاری ناشی از فرسایش خاک (مانند تخریب سواحل، جنگل‌ها یا آبخیزها که دسترسی به فعالیت‌های تفریحی را کاهش می‌دهد) مفید است؛ مثلاً، فرسایش می‌تواند ارزش تفریحی یک پارک ملی را از طریق کاهش جذابیت منظره یا کیفیت اکوسیستم (مانند از دست رفتن سواحل شنی) تحت تأثیر قرار دهد، و این خسارت‌های از طریق کاهش تعداد بازدیدکنندگان و هزینه‌های سفر تخمین زده می‌شود.

۳-۱- نکات مهم در ارزیابی اقتصادی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری

از آنجایی‌که از یکسو هزینه‌ها و منافع مختلفی برای فرسایش خاک و اقدامات حفاظتی وجود دارد و از سوی دیگر هزینه‌ها و منافع در زمان‌های مختلفی صورت گرفته‌اند، بنابراین لازم است از روش‌های اقتصاد

1. Contingent valuation method
2 Travel Cost Method

مهندسی برای ارزیابی اقتصادی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده کرد. در این زمینه باید موارد زیر مدنظر قرار گیرد:

هزینه‌های پروژه: به‌طور اصولی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، شامل سرمایه‌گذاری اولیه برای اجرای پروژه و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مربوطه است. در این‌جا، هرگونه ورودی برای اجرای پروژه به‌عنوان نهاده پروژه حفاظت خاک و آبخیزداری است.

فایده‌های پروژه: منظور از فایده‌های پروژه، همان اثرات و پیامدهای مالی در شرایط آینده با و بدون اجرای پروژه است. مقایسه منافع در شرایط پیش و پس از اجرای پروژه، تغییراتی را که در ستانده و بدون اجرای پروژه پیش می‌آید، نایده می‌گیرد. یعنی ممکن است، یک عامل دیگری سبب تغییرات در ستانده‌های پروژه شود و این نتیجه به حساب پروژه گذاشته شود. چنانچه پروژه حفاظت خاک و آبخیزداری هم اجرا نمی‌شد آن تغییر در میزان ستانده به وجود می‌آمد. درحالی که مقایسه آینده با و بدون پروژه، تنها اثراتی را که در نتیجه اجرای پروژه در حوزه آبخیز پیش می‌آید، پایش و در محاسبات در نظر می‌گیرد.

همسان‌سازی نوع: نخستین مرحله در تحلیل اقتصادی باید تعیین واحدی برای بیان ارزش مشترک باشد. به‌عبارت دیگر باید فایده‌ها و هزینه‌ها بر حسب یک واحد پولی بیان شوند، تا قابلیت مقایسه داشته باشند.

همسان‌سازی زمانی: برای این‌که تصمیم‌های سرمایه‌گذاری واقع‌بینانه باشد، هر ارزش پولی باید با مبلغ و زمان مشخص شود. چون مبالغ پولی در زمان‌های مختلف به‌طور مستقیم با هم قابل مقایسه و یا با یکدیگر قابل ترکیب نیستند، بنابراین لازم است پیش از بررسی، ارقام مورد نظر را از نظر زمانی همسان ساخت. برای همسان‌سازی زمانی، تکنیک‌های تنزیلی به‌کار برده می‌شود.

دوره تحلیل یا تطبیق: دوره تحلیل پروژه‌ها[1] اغلب برابر عمر فیزیکی نهاده‌های مورد استفاده است.

[1] Project Horizon

۴- آزمون دستورالعمل در حوزه آبخیز سد کارده

۴-۱- انتخاب منطقه مورد مطالعه

سد کارده در ۴۵ کیلومتری شمال شهر مشهد بر روی رودخانه کارده احداث شده است. عملیات اجرایی این سد اواخر دهه ۶۰ به اتمام رسید و در دهه ۷۰ آبگیری شد. حوزه آبخیز بالادست سد کارده حدود۵۴۷۱۰ هکتار مساحت دارد. ارتفاع سد از پی ۶۷ متر و از کف ۵۰ متر است، طول تاج آن ۱۴۴ متر و عرض آن در تاج سد ۳/۲ متر است. در زمان ساخت، حجم مخزن این سد تا رقوم نرمال حدود ۲۸/۱ میلیون متر مکعب، حجم مفید آن ۲۶/۸۲ میلیون مترمکعب، حجم مرده سد یک میلیون مترمکعب، سطح دریاچه در رقوم نرمال ۱۹۰/۷۶ هکتار و آب قابل تنظیم سالانه ۲۲ میلیون مترمکعب بوده است. به‌دلیل رسوب‌گذاری حجم مخزن سد به تدریج کاهش یافته است. براساس نقشه‌های هیدروگرافی حجم مخزن تا رقوم سرریز در سال ۱۳۸۷ به حدود ۲۶/۰۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته است (یزدان‌پرست و همکاران، ۱۳۹۵). هدف از احداث این سد تأمین قسمتی از نیازهای آبی شهر مشهد و تأمین آب کشاورزی محدود اراضی پایاب سد بوده‌است، ولی با توجه به مشکل تأمین آب شرب جمعیت شهر مشهد و زائران این شهر، امروزه تقریباً تمامی آب ذخیره‌شده در این سد به شرب اختصاص داده می‌شود.

از عملیات اجرایی آبخیزداری در این محدوده مطالعاتی در سطح کلان تحت عنوان پروژه کنترل سیل و فرسایش و رسوب سد کارده نام برده شده است. لیکن به‌دلیل نزدیکی حوزه آبخیز گوش و بهره به سد کارده کنترل فرسایش و رسوب و حفظ ارزش حیاتی این سد مورد توجه بیشتری بوده است. حوزه آبخیز گوش و بهره با مساحت ۴۹۶۳/۶۵ هکتار، یکی از زیرحوضه‌های مهم این آبخیز است.میزان فرسایش در حوزه آبخیز گوش و بهره تقریباً معادل ۱۰/۲ تن در هکتار در سال تعیین شده است (شرکت نقش آب طوس ، ۱۳۸۸).

عملیات آبخیزداری در این محدوده مطالعاتی از سال ۱۳۷۵ شروع شده و تا سال ۱۳۸۱ ادامه داشته و نحوه اجرای عملیات بصورت امانی بوده است. اهداف اصلی پروژه حفاظت از خاک و آبخیزداری در حوضه گوش و بهره، علاوه بر کنترل فرسایش و رسوب، کاهش سیل‌خیزی، تأمین و استحصال آب، تأمین علوفه، کنترل زمین لغزش‌های احتمالی در آهک‌های مارنی، شیل و آهک‌های قرمزرنگ است. در این آبخیز اقدامات

بیولوژیک در سطح ۳۷۲۳ هکتار اجرا شده است. هم‌چنین در این حوزه آبخیز ۴۸۱۵۰ مترمکعب عملیات سازه‌ای اجرا شده است.

۴-۲- محاسبه انواع خسارت‌های اقتصادی فرسایش خاک در مقیاس آبخیز

۴-۲-۱- خسارت‌های درون‌منطقه‌ای فرسایش خاک

طبق بررسی‌های خاکشناسی از میان ۲۱ عنصر موردنیاز گیاهان برای رشد و بقا، تنها عنصرهای ازت، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیوم و گوشو پرمصرف‌ترین عناصر هستند و از بین این شش عنصر، ازت، فسفر و پتاسیم و البته کلسیم بیشترین میزان مصرف را توسط گیاه دارند و عمدتاً کودهای شیمیایی حاوی ازت، فسفات و پتاسیم بیشترین استفاده را توسط کشاورزان دارند (نور و همکاران، ۱۳۹۲) و با توجه به اینکه اندازه‌گیری این سه عنصر در بین عناصر پرمصرف ساده‌تر است و نیز سایر دلایل اقتصادی، بنابراین از میان عناصر غذایی مختلف موجود درخاک، اغلب سه عنصر پتاسیم (K)، فسفر (P) و نیتروژن (N) بیش از سایرین مورد توجه قرار گرفته و در محاسبات ارزش‌گذاری استفاده می‌شوند.

ارزش کود ازدست‌رفته تنها بخشی از خسارت است، زیرا کود خریداری شده باید به عرصه منتقل شده و در سطح خاک نیز توزیع شود. بنابراین هزینه جایگزین عناصر غذایی شامل ارزش بازاری کود ازدست‌رفته، هزینه حمل و توزیع آن در سطح خاک است (Predo و همکاران، ۱۹۹۷). براساس شرح خدمات آبخیزداری سال ۱۴۰۳ و بندهای منتخب آن (جدول ۴-۱) اجزای خسارت هدررفت عناصرغذایی قابل محاسبه است.

جدول ۴-۱- اجزای خسارت هدررفت عناصرغذایی براساس شرح خدمات آبخیزداری سال ۱۴۰۳

کد	اقدام
۱۵۱۲۰۱	حمل بذر و کود از محل تخلیه تا محل مصرف (به ازای یک کیلوگرم هر ۵۰ متر)
۱۹۰۴۳۰	کود ازته (اوره)
۱۹۰۴۳۱	کود فسفاته و سوپرفسفاته (سوپرفسفات تریپل)
-	کود پتاسه (سولوپتاس)
۰۲۱۳۰۱	دستمزد کوپاشی به ازای هر ۵۰ کیلوگرم در هکتار توسط کارگر

۴-۲-۲- خسارت جایگزینی عناصر غذایی

براساس گزارش مطالعات فرسایش و رسوب، حوزه آبخیز گوش و بهره دارای فرسایش خاک در حدود ۱۰/۲ تن در هکتار در سال است. براساس اطلاعات جدول ۴-۲، ۱۰/۳ کیلوگرم نیتروژن، ۰/۲ کیلو فسفر و ۳/۱ کیلو پتاسیم در هر هکتار طی فرآیند فرسایش از دسترس خارج می‌شود.

جدول ۴-۲- هدررفت عناصرغذایی پرمصرف خاک طی فرسایش در حوضه مورد مطالعه

عنصر	غلظت در خاک (گرم در کیلوگرم)	فرسایش خاک (کیلوگرم در هکتار)	عنصر از دست رفته (کیلوگرم در هکتار)
N	۱/۰۱	۱۰۲۰۰	۱۰/۳
P	۰/۰۲	۱۰۲۰۰	۰/۲
K	۰/۳۰	۱۰۲۰۰	۳/۱

براساس فهرست بهای آبخیزداری سال ۱۴۰۳ در هر هکتار حدود ۳۳/۷ کیلوگرم کود (جمع سه کود مورد بررسی) برای ازبین‌بردن اثرفرسایش خاک مورد نیاز است. خسارت کل هدررفت عناصر غذایی در هر سال مطابق جدول ۴-۳ صورت پذیرفت.

جدول ۴-۳- خسارت کل هدررفت عناصر غذایی در منطقه مورد مطالعه

نوع کود	درصد عنصر در کود (٪)	خسارت در هکتار (ریال)	کل هزینه خرید کودها (میلیارد ریال)	کل هزینه انتقال تا محل مصرف (میلیارد ریال)	کل هزینه کوپاشی (میلیارد ریال)
کود اوره	۴۵	۵۰۳۶۵۳۳	۲۷/۷	۰/۹	۷/۴
سوپرفسفات تریپل	۴۶	۱۵۳۰۰۰			
سلوپتاس	۴۲	۲۰۰۶۵۷۱			

بدون لحاظ ضرایب منطقه‌ای، احداث کارگاه و ...، خسارت هدررفت عناصر غذایی برای هر هکتار براساس قیمت سال ۱۴۰۳، حدود ۹/۳ میلیون ریال برآورد شده است که در مجموع ۳۶/۱ میلیارد ریال در هر سال ایجاد خسارت می‌کند. باید توجه داشت که در هر پروژه اجرایی آبخیزداری ضرایب منطقه‌ای و احداث کارگاه و ... درنظر گرفته می‌شود که در منطقه مورد مطالعه حدود ۲۵ درصد موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود.

۴-۲-۳- اثر فرسایش خاک بر کاهش تولید مراتع و اراضی دیم

به‌منظور کمی‌کردن اثر فرسایش خاک بر تولید اراضی دیم و مراتع می‌توان از اطلاعات موجود در کتاب "اقتصاد فرسایش خاک" (حسینی و قربانی، ۱۳۸۴) استفاده کرد. در این کتاب براساس داده‌های ثبت‌شده در کشور روابطی بین فرسایش خاک و تولید گندم دیم با توجه به عمق خاک ارائه شده است. برای نمونه در عمق ۰الی ۵ سانتی‌متر به ازای هر سانتی‌متر فرسایش ۸۵ کیلوگرم کاهش تولید گندم دیم مشاهده شده است. برای عمق ۱۰الی ۱۵سانتی‌متر به ازای هر سانتی‌متر فرسایش ۳۹ کیلوگرم کاهش تولید گندم دیم و برای عمق ۲۰ الی ۲۵ سانتی‌متر به ازای هر سانتی‌متر فرسایش ۳۰ کیلوگرم کاهش تولید گندم دیم مشاهده شده است.

در مورد مراتع تحقیقات کمی وجود دارد و در این راستا می‌توان نیمی از مقدار کاهش تولید گندم دیم برای علوفه مراتع در نظر گرفته شد. قیمت علوفه مراتع نیز ۳۵ درصد قیمت گندم مدنظر قرار گرفت (نور و همکاران، ۱۴۰۱).

براساس روش تحقیق، به ازای حدود ۱۲ تن فرسایش خاک (یک میلی‌متر فرسایش) کاهش ۳/۹ کیلوگرم در هکتاری تولید گندم دیم و ۱/۹ کیلوگرمی علوفه مراتع مورد انتظار است. براین‌اساس با توجه به فرسایش متوسط حوضه و فرسایش قابل تحمل، میزان کاهش تولید در هر سال ۱ کیلوگرم علوفه در هکتار است که در سطح ۳۷۲۳ هکتار مراتع منطقه هر سال ۳۷۲۳ کیلوگرم از تولید علوفه فقط به‌دلیل کاهش عمق خاک کاسته می‌شود (مطمئناً سایر عوامل شامل کاهش عناصر غذایی، آب قابل دسترس و ... نیز می‌توان به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرند) که براساس قیمت علوفه ۸۰ هزار ریال برای هر کیلو، در مجموع خسارت ۳۲۰ میلیون ریالی ایجاد می‌شود. در این محاسبات توجه به نکات زیر ضروری است:

۱. مطمئناً بخشی از کاهش عمق به سال بعدی منتقل خواهد شد و آثار تجمعی کاهش محصول وجود دارد. با گذشت چند دهه، انتقال به کلاس عمق خاک پایین‌تر نیز مورد انتظار است.

۲. فقط قیمت علوفه از مراتع در محاسبات وارد شده است که طبق گزارش یگانه بدرآبادی و همکاران (۱۳۹۴) به نقل از فائو فقط ۲۵ درصد ارزش اقتصادی مراتع را شامل می شود و ۷۵ درصد ارزش مراتع به سایر خدمات اکوسیستمی آن مربوط است.

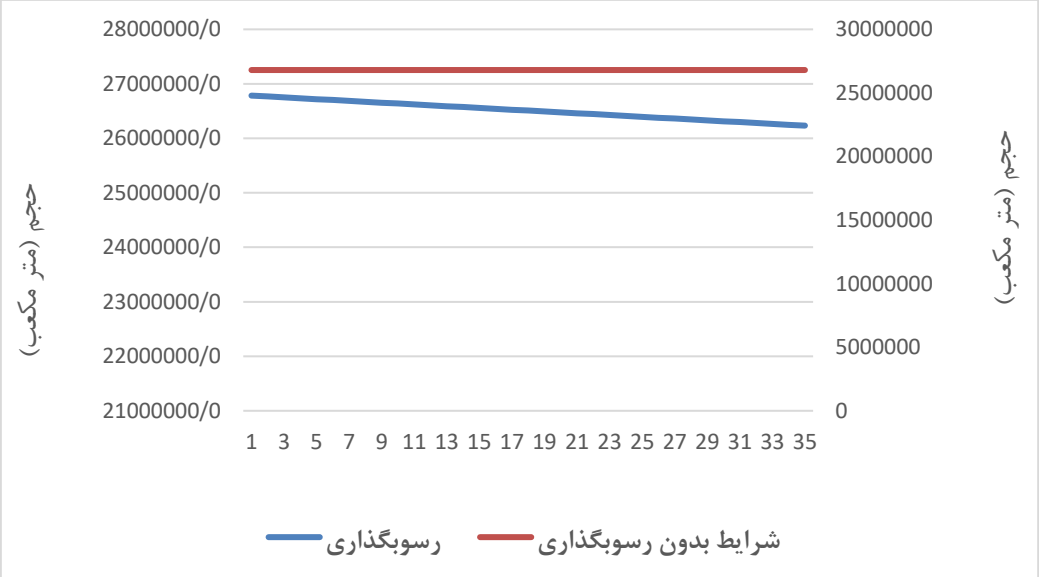
۴-۳- خسارت‌های برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک

۴-۳-۱- رسوب‌گذاری در سد کارده

یکی از مشکلات مهم برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک، انتقال رسوبات به مخازن سدها و پرشدن آن‌ها از رسوباتی است که توسط جریان آب حمل شده و در مخزن سد ته‌نشین می‌شود.

خسارت رسوب‌گذاری از زیرحوضه گوش و بهره در سد کارده به شرح زیر صورت گرفت:

- براساس اطلاعات ارائه‌شده از سد کارده در روش تحقیق، حجم مفید سد ۲۶/۸ میلیون مترمکعب است. بنابراین از ابتدای احداث تاکنون (تا سال ۱۴۰۳) امکان تنظیم ۹۳۸ میلیون مترمکعب آب وجود داشته است.
- براساس گزارش فرسایش و رسوب حوضه مورد مطالعه متوسط فرسایش سالانه حوضه ۱۰/۲ تن در هکتار است (شرکت نقش آب طوس ، ۱۳۸۸). با توجه به نسبت تحویل رسوب و وزن مخصوص رسوب براساس نمودار تعیین SDR براساس مساحت و مقدار متوسط وزن مخصوص خاک، به‌ترتیب ۳۵ درصد و ۱/۲۵ تن بر مترمکعب، می‌توان انتظار داشت که هر سال ۱۶۲۰۰ مترمکعب رسوب از این زیرحوضه در سد کارده ترسیب کند.
- با توجه به کاهش حجم سد در هر سال بر اثر رسوب‌گذاری، میزان ذخیره آب در کل دوره تغییر کرده و به عدد ۹۲۷/۸ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. شکل ۴-۱ حجم سد کارده (قابل ذخیره) در دو سناریوی با و بدون رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- حجم سد کارده (قابل ذخیره) در دو سناریوی با و بدون رسوب‌گذاری

- به‌منظور تعیین هزینه تمام شده ساخت سد (در سال مبنای ۱۴۰۳) لازم است هزینه‌ها براساس نرخ بهره برای سال ۱۴۰۳ به‌روزرسانی شوند. در این تحقیق نرخ بهره بین ۱۵ الی ۴۰ درصد در سال‌های مختلف تغییر کرد تا با واقعیت اقتصادی حاکم بر پروژه‌ها منطبق باشد. هم‌چنین دو درصد از هزینه ساخت به‌عنوان هزینه نگهداری مدنظر قرار گرفت (رحمانی و انصاری، ۱۳۹۱). جدول ۴-۴ محاسبات هزینه ساخت سد کارده و تبدیل هزینه‌ها برای سال ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد. براین‌اساس هزینه ساخت این سد ۲۴۸۱۱ میلیارد ریال در سال ۱۴۰۳ برآورد شد.
- با توجه به روش تحقیق و نتایج حاصل در جدول ۴-۴،کل خسارت رسوب‌گذاری از زیرحوضه مورد مطالعه در سد کارده که کمتر از ۱۰ درصد مساحت حوضه بالادست سد را شامل می‌شود، حدود ۵۵۶/۵ میلیارد ریال برآورد می‌شود. می‌توان انتظار داشت که مقدار رسوب وارد شده به سد از کل آبخیز بالادست (تعمیم مقادیر زیرحوضه گوش-بهره با کل آبخیز) منجر به کاهش حدود ۲۰ درصد حجم مخزن شده است. در حالی که حجم مرده یک میلیون مترمکعبی برای این منظور در سد مدنظر قرار گرفته است.
- یکی از موارد مهم در تعیین قیمت آب می‌توان به مساله هزینه تأمین آب از سایر روش‌ها توجه داشت. در این زمینه هزینه انتقال آب از دریای عمان به شهر مشهد حدود سه دلار برای هر مترمکعب هزینه

دربر دارد (قدس‌آنلاین به نقل از مدیرعامل شرکت تأمین آب صنایع و معادن، ۱۴۰۴). براین‌اساس خسارت رسوب‌گذاری در سد کارده طی دوره مورد بررسی درحدود ۳۲۶۱۶ میلیارد ریال است.

جدول ۴-۴- هزینه ساخت و نگهداری سد کارده بر مبنای قیمت سال ۱۴۰۳

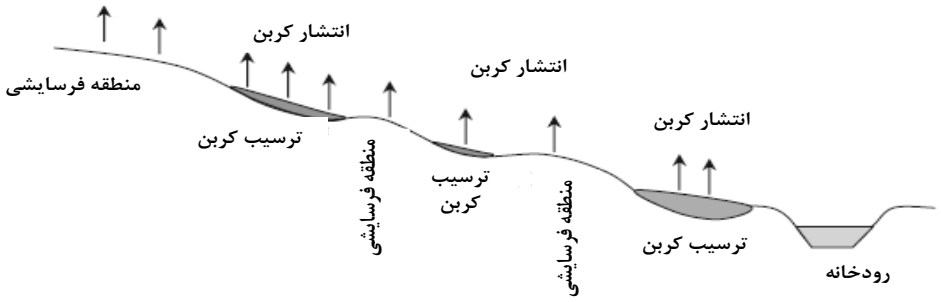
سال	نرخ بهره	هزینه ۱۴۰۳ میلیارد ریال	هزینه نگهداری	هزینه کل میلیارد ریال
۱۳۶۶	۱/۱۵	۷/۷	۰/۲	۷/۹
۱۳۶۷	۱/۱۵	۸/۸۶	۰/۲	۹
۱۳۶۸	۱/۱۵	۱۰/۱۸	۰/۲	۱۰/۴
۱۳۶۹	۱/۱۵	۱۱/۷۱	۰	۱۱/۷
۱۳۷۰	۱/۱۵	۱۳/۴۷	۰	۱۳/۵
۱۳۷۱	۱/۱۵	۱۵/۴۹	۰/۳	۱۵/۸
۱۳۷۲	۱/۱۵	۱۷/۸۱	۰/۴	۱۸/۲
۱۳۷۳	۱/۱۵	۲۰/۴۸	۰/۴	۲۰/۹
۱۳۷۴	۱/۲۰	۲۴/۵۸	۰/۵	۲۵/۱
۱۳۷۵	۱/۲۰	۲۹/۴۹	۰/۶	۳۰/۱
۱۳۷۶	۱/۲۰	۳۵/۳۹	۰/۷	۳۶/۱
۱۳۷۷	۱/۲۰	۴۲/۴۷	۰/۸	۴۳/۳
۱۳۷۸	۱/۲۰	۵۰/۹۷	۱	۵۲
۱۳۷۹	۱/۲۰	۶۱/۱۶	۱/۲	۶۲/۴
۱۳۸۰	۱/۲۰	۷۳/۳۹	۱/۵	۷۴/۹
۱۳۸۱	۱/۲۲	۸۹/۵۴	۱/۸	۹۱/۳
۱۳۸۲	۱/۲۲	۱۰۹/۲۴	۲/۲	۱۱۱/۴
۱۳۸۳	۱/۲۲	۱۳۳/۲۷	۲/۷	۱۳۵/۹
۱۳۸۴	۱/۲۲	۱۶۲/۵۹	۳/۳	۱۶۵/۸
۱۳۸۵	۱/۲۲	۱۹۸/۳۶	۴	۲۰۲/۳
۱۳۸۶	۱/۲۲	۲۴۱/۹۹	۴/۸	۲۴۶/۸
۱۳۸۷	۱/۲۲	۲۹۵/۲۳	۵/۹	۳۰۱/۱
۱۳۸۸	۱/۲۵	۳۶۹/۰۴	۷/۴	۳۷۶/۴
۱۳۸۹	۱/۲۵	۴۶۱/۳	۹/۲	۴۷۰/۵
۱۳۹۰	۱/۲۵	۵۷۶/۶۲	۱۱/۵	۵۸۸/۲
۱۳۹۱	۱/۲۵	۷۲۰/۷۸	۱۴/۴	۷۳۵/۲
۱۳۹۲	۱/۳۰	۹۳۷/۰۲	۱۸/۷	۹۵۵/۸
۱۳۹۳	۱/۳۰	۱۲۱۸/۱۲	۲۴/۴	۱۲۴۲/۵
۱۳۹۴	۱/۳۰	۱۵۸۳/۵۶	۳۱/۷	۱۶۱۵/۲
۱۳۹۵	۱/۳۰	۲۰۵۸/۶۲	۴۱/۲	۲۰۹۹/۸
۱۳۹۶	۱/۳۰	۲۶۷۶/۲۱	۵۳/۵	۲۷۲۹/۷

سال	نرخ بهره	هزینه ۱۴۰۳ میلیارد ریال	هزینه نگهداری	هزینه کل میلیارد ریال
۱۳۹۷	۱/۳۰	۳۴۷۹/۰۷	۶۹/۶	۳۵۴۸/۷
۱۳۹۸	۱/۳۰	۴۵۲۲/۷۹	۹۰/۵	۴۶۱۳/۲
۱۳۹۹	۱/۴۰	۶۳۳۱/۹۱	۱۲۶/۶	۶۴۵۸/۵
۱۴۰۰	۱/۴۰	۸۸۶۴/۶۷	۱۷۷/۳	۹۰۴۲
۱۴۰۱	۱/۴۰	۱۲۴۱۰/۵۴	۲۴۸/۲	۱۲۶۵۸/۸
۱۴۰۲	۱/۴۰	۱۷۳۷۴/۷۶	۳۴۷/۵	۱۷۷۲۲/۳
۱۴۰۳	۱/۴۰	۲۴۳۲۴/۶۲	۴۸۶/۵	۲۴۸۱۱/۲

۴-۳-۲- اثر فرسایش بر انتشار CO2 به اتمسفر

خاک سطحی به‌عنوان منبعی برای کربن عمل کرده و از اثرات CO_2 و دیگر گازهای گلخانه‌ای اتمسفر می‌کاهد (Sparling و همکاران ۲۰۰۶) و بر گرمای جهانی مؤثر است. Robert (۲۰۰۵) ذخیره کربن در خاک را راه‌حل مناسب برای درمان کوتاه مدت افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌داند. ذخیره کربن موجود در خاک تقریباً دو برابر مقدار کربن موجود در اتمسفر است. بنابراین، هر تغییری در ذخیره کربن خاک‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر CO_2 اتمسفر تأثیر می‌گذارد. فرسایش خاک باعث جدا شدن کربن از خاک‌دانه‌ها شده و طی مرحله حمل و رسوب، معدنی شدن و بازگشت کربن به اتمسفر را تسهیل می‌کند (Robert، ۲۰۰۵). بنابراین هدررفت خاک علاوه بر تأثیر درون‌منطقه‌ای که بر خصوصیات خاک منطقه دارد، دارای اثرات برون‌منطقه‌ای و حتّی جهانی است.

کربن انتقال‌یافته توسط فرآیندهای فرسایشی در مسیر حمل خود در قسمت‌های مختلف ترسیب می‌کند. مقداری از این مواد در سطح اراضی و در محل‌های تله انداز رسوب قرار می‌گیرند و مقدار دیگر به بیرون منطقه فرسایش منتقل‌شده و به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و در نهایت به آب‌های آزاد (در صورت تخلیه به آب‌های آزاد) وارد می‌شوند. مناطق ترسیب (انواع محیط ترسیب مواد) معمولاً دارای غلظت بیشتر کربن در مقایسه با محیط‌های فرسایش‌یافته و شیب‌های محدب هستند (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲- تغییرات کربن آلی خاک در طول فرسایش

اگر میزان رسوبات معلّق رودخانه‌های جهان در حدود ۱۵ تا ۲۰ میلیارد تن در سال باشد، با فرض اینکه نسبت تحویل رسوب ۱۳ تا۲۰ درصد (Walling و Webb، ۱۹۸۲) و میزان کربن آلی رسوبات دو درصد در نظر گرفته شود (Lal، ۲۰۰۵)، مقدار کربن خاک که توسط فرسایش هدر می‌رود در حدود چهار تا ۶/۱ میلیارد تن است. هم‌چنین اگر میزان اکسید شدن کربن فرسایش‌یافته ۲۰ درصد در نظر گرفته شود، در این‌صورت سالانه در حدود ۰/۷ تا ۱/۲ میلیارد تن کربن آلی به‌صورت CO_2 به اتمسفر بازگشته و بر گازهای گلخانه‌ای می‌افزاید (Lal، ۲۰۰۵).

برای محاسبه خسارت‌های فرسایش خاک از طریق انتشار CO_2 اتمسفری، نیاز به مقدار متوسط فرسایش در هر سال، مقدار کربن خاک و میزان ضریب انتشار است. برای مثال در مورد زیرحوضه گوش و بهره در سد کارده، میزان فرسایش خاک در منطقه ۱۰/۲ تن در هکتار در سال است. میزان کربن آلی خاک نیز حدود یک درصد و میزان اکسیدشدن کربن طی حمل نیز براساس مطالعه Lal (۲۰۰۵) ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. براساس جدول ۴-۵ جریمه انتشار هر تن CO_2 در حدود ۱۰۰ دلار در نظر گرفته شد (پرویزی، ۱۴۰۲).

جدول ۴-۵- خسارت انتشار CO2 در اثر فرسایش خاک در آبخیز گوش و بهره

خسارت (میلیارد ریال)	کل انتشار (تن)	مقدار انتشار در هکتار (کیلوگرم)	مقدار کل کربن فرسایشی (کیلوگرم در هکتار)	مقدار فرسایش (کیلوگرم در هکتار)
۷/۵	۱۰۱/۲	۲۰/۴	۱۰۲	۱۰۲۰۰

علاوه‌براین باید در نظر داشت که در خاک فرسایش‌یافته به‌دلیل حمل ذرات ریز، کاهش عمق خاک و کاهش تولید گیاهی انتظار کاهش ترسیب کربن هم وجود دارد. به‌عبارتی علاوه بر فرسایش کربن موجود در

خاک و انتشار بخشی از آن به اتمسفر، انتظار می‌رود نقش ذخیره‌ای خاک و ترسیب کرین نیز کمتر شود، که این بخش (کاهش ترسیب کربن) در محاسبات خسارت مورد بررسی قرار نگرفته است.

۴-۴- تعیین منافع درون و برون‌منطقه‌ای حفاظت خاک

۴-۴-۱- تعیین اثرات درون‌منطقه‌ای حفاظت خاک

اجرای اقدامات بیولوژیک مطابق مدل مفهومی ارائه‌شده دارای اثرات مختلفی است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۴-۱-۱- افزایش تولید علوفه در اثر اجرای اقدامات بیولوژیک

اقدام‌های بیولوژیک باعث افزایش پوشش گیاهی در منطقه می‌شوند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری برای ارزیابی پروژه در یک‌سال صورت می‌گیرد و تولید علوفه وابسته به نوسانات اقلیمی است، باید وضعیت اقلیمی را مدنظر قرار داد. برای مثال در حوضه گوش و بهره در بالادست سد کارده، سال مورد بررسی تقریباً یک‌سال ترسالی خفیف است بنابراین مقدار افزایش تولید علوفه برای کل دوره ۲۵ ساله در مقایسه با منطقه شاهد، ۵۰ درصد مقدار گزارش شده در نظر گرفته شد. هم‌چنین باید توجه داشت که درمجموع مقدار تولید علوفه پس از کسر از مقدار منطقه شاهد در سه ضریب اصلاحی شامل ضریب تبدیل علوفه تر به خشک (حدود ۳۳ درصد)، ضریب تبدیل علوفه قابل برداشت (۵۰ درصد) و ضریب تبدیل قیمت علوفه به جو (۴۰ درصد)، ضرب می‌شود (نور و همکاران، ۱۴۰۱).

چهار اقدام بیولوژیک مطابق جدول ۴-۶ باعث افزایش پوشش گیاهی در منطقه شده است. به‌گونه‌ای که کپه‌کاری، بذرپاشی، علوفه‌کاری و قرق مدیریتی باعث افزایش ۶۸، ۴۸، ۷۰۰ و ۲۸ کیلوگرمی تولید علوفه در هر هکتار شده است. براساس بررسی قیمت در سطح بازار (سال ۱۴۰۳) قیمت جو ۱۷۵۰۰ ریال برای هر کیلوگرم در نظر گرفته شد. براین‌اساس درآمد حاصل از افزایش تولید علوفه حدود ۴/۲ میلیارد ریال در هر سال و ۱۰۴/۴ میلیارد ریال در کل دوره داشته است.

جدول ۴-۶- درآمد حاصل از افزایش تولید علوفه ناشی از اجرای اقدامات بیولوژیک در آبخیز گوش و بهره

نوع اقدام	افزایش تولید علوفه (کیلوگرم در هکتار)	افزایش علوفه در کل دوره (کیلوگرم در هکتار)	علوفه قابل برداشت در کل دوره (کیلوگرم در هکتار)	مساحت (هکتار)	تولید علوفه معادل جو (تن)	درآمد (میلیون ریال)
کپه‌کاری	۶۸	۸۲۴/۵	۴۱۲/۳	۹۲۷	۶/۱	۱۰۷۰
بذرپاشی	۴۸	۵۸۲	۲۹۱	۵۰۶	۲/۴	۴۱۲
قرق مدیریتی	۲۸	۳۳۹/۵	۱۶۹/۸	۲۱۹۵	۶	۱۰۴۳
علوفه‌کاری	۷۰۰	۸۴۸۷/۵	۴۲۴۳/۸	۹۵	۶/۵	۱۱۲۸

۴-۴-۱-۲- اثر اقدامات بیولوژیک بر فرسایش خاک و حفظ عناصر غذایی خاک

برای این منظور لازم است مقدار کنترل فرسایش خاک توسط اقدامات بیولوژیک تخمین زده شود. در این راستا استفاده از مدل‌های برآورد توصیه می‌شود. در صورت تحلیل دوره قبل و بعد از اجرای اقدامات، می‌توان از مدل‌هایی استفاده کرد که میانگین بلندمدت فرسایش را برآورد می‌کنند مانند USLE، RUSLE، MPSIAC و مانند اینها، مفید است. البته در برخی موارد نیاز به اطلاعات جزئی‌تر مکانی و زمانی از اثرات حفاظت خاک است. برای مثال در دوره بازگشت‌های مختلف اثر اقدامات چگونه است و یا اینکه در هر قسمت از حوضه، اثرگذاری اقدامات چگونه بوده است.

لازم به توضیح است که اقدامات سازه‌ای درون آبراهه اثری در کاهش فرسایش خاک در دامنه‌ها ندارند و فقط اقدامات بیولوژیک و بیومیکانیکی موجب کاهش فرسایش خاک و کنترل هدررفت عناصر غذایی می‌شوند. در جدول ۴-۷ اثر اقدامات بیولوژیک بر فرسایش منطبق بر مطالعات ارزیابی پروژه آبخیزداری گوش- بهره (شرکت نقش آب طوس ، ۱۳۸۷) ارائه شده است.

۴-۷- اثرگذاری اقدامات بیولوژیک در حوضه گوش و بهره بر میزان فرسایش خاک

نوع اقدام	فرسایش منطقه شاهد (تن بر هکتار)	فرسایش منطقه اجرای اقدامات (تن بر هکتار)	درصد کاهش فرسایش	مساحت (هکتار)	مقدار کاهش (تن در هکتار)	مقدار کل کاهش (تن)
کپه‌کاری	۱۰/۲	۷/۲۹	۲۹	۹۲۷	۲/۹	۲۶۹۸/۵
بذرپاشی		۷/۸۸	۲۳	۵۰۶	۲/۳	۱۱۷۵/۶
قرق مدیریتی		۸/۲۷	۱۹	۲۱۹۵	۱/۹	۴۲۳۲/۴
علوفه‌کاری		۰/۹۷	۹۱	۹۵	۹/۲	۸۷۷/۱

در هر سال به‌طور متوسط ۲/۴ تن در هکتار معادل ۸۹۸۳ تن فرسایش از طریق اجرای اقدامات بیولوژیک کاهش یافته است. با توجه به مفروضات ارائه‌شده و نتایج ارائه‌شده در جدول ۴-۸، اجرای اقدامات بیولوژیک موجب کنترل حدود ۲۹/۷ تن کود، عناصر غذایی پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم شده است.

جدول ۴-۸- منافع حاصل از کاهش هدررفت عناصرغذایی پرمصرف توسط اقدامات بیولوژیک

ماده غذایی خاک	فرسایش خاک (تن)	عنصر ازدست‌رفته (تن)	مقدار کود موردنیاز (تن)
N	۸۹۸۳/۶	۹/۹۸	۲۲/۲
P	۸۹۸۳/۶	۰/۲۱	۰/۴
K	۸۹۸۳/۶	۲/۹۶	۷/۱

هزینه خرید کود ۶/۴ میلیارد ریال برآورد شده است که برای حمل و کودپاشی آن حدود ۶/۳ میلیارد ریال نیاز بود. در مجموع ۱۲/۷ میلیارد ریال منفعت حفظ عناصرغذایی پرمصرف موردنیاز گیاه، در اثر اجرای اقدامات بیولوژیک برای هر سال در این حوضه متصور است.

۴-۴-۱-۳- اثر اقدامات بیولوژیک در ترسیب کربن

ترسیب کربن توسط خاک، جنگل‌ها، مراتع و اکوسیستم‌های طبیعی راهکاری منطبق با اصول توسعه پایدار و حفظ محیط زیست است که امروزه در مقیاس جهانی به آن توجه ویژه‌ای شده و نقطه امیدی است که به کاهش کربن اتمسفری و اصلاح وضع موجود کمک کند. به همین دلیل ترسیب کربن، به‌عنوان ارزش افزوده

برای پروژه‌های احیاء و مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی در حوزه‌های آبخیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در سطوح منطقه‌ای، ملی و بین المللی ارزش افزوده و توجیه اقتصادی بسیاری از این عملیات مدیریتی در حوزه‌های آبخیز قابل باز تعریف است (پرویزی، ۱۴۰۲).

مناسب‌ترین گزینه‌های اقلیمی برای ترسیب کربن، مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند و افزایش میزان بیوماس گیاهان خشبی در این مناطق، به دلیل کاهش هزینه ترسیب گاز کربنیک دارای مزیت فراوان است (زاهدی و پرویزی، ۱۳۹۹). این موضوع موجب شده که سازمانهای بینالمللی مانند FAO و UNDP این مناطق را برای اجرای برنامه‌های ترسیب کربن به‌منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای انتخاب کنند.

پرویزی (۱۴۰۲) مطالعات کاملی در زمینه اثرگذاری اقدامات بیولوژیک در مناطق مختلف کشور بر ترسیب کربن را ارائه دادند. بر این اساس در پروژه‌های احیای مراتع انتظار ترسیب سالانه یک الی ۷/۵ تن کربن در هر هکتار گزارش شده است. ایشان درآمد حاصل از ترسیب هر تن کربن را حدود ۱۰۰ دلار اعلام کردند. براساس اطلاعات مندرج در جدول ۴-۹ هر سال حدود ۶۸/۸ میلیارد ریال درآمد ترسیب کربن از طریق اقدامات بیولوژیک حاصل شده است.

جدول ۴-۹- درآمد ترسیب کربن از طریق اقدامات بیولوژیک در حوزه آبخیز بازه حوض

نوع عملیات اصلاحی	میزان ترسیب کربن (تن)	درآمد ترسیب هر تن کربن (دلار)	درامد ترسیب (میلیارد ریال)
کپه‌کاری	۴۶۳	۱۰۰	۳۲/۴
بذرپاشی	۲۵۳		۱۷/۷
قرق مدیریتی	۲۱۹		۱۵/۳
علوفه‌کاری	۴۷		۳/۳

۴-۴-۱-۴- اثر اقدامات بیولوژیک بر ذخیره رواناب در سطح دامنه

همان‌گونه که تحقیقات پیشین (نور و همکاران، ۱۴۰۳) نیز بیان کرده اقدامات آبخیزداری در سطح دامنه‌ها باعث بهبود بیلان آبی به سمت نفوذ بیشتر و کاهش رواناب سطحی می‌شوند. به‌عبارتی با کنترل رواناب در محل باعث کاهش خسارت‌های بعدی خواهند شد. برای کمی‌سازی اثرات اقدامات بیولوژیک بر رواناب از تغییرات شماره منحنی استفاده می‌شود. در این رابطه با توجه به تغییرات شماره منحنی انتظار تغییر S و I

در روش سرویس حفاظت خاک وجود دارد. در مثال حوضه سد کارده، با توجه به اجرای وسیع اقدامات بیولوژیک در سطح آبخیز و براساس مطالعات ارزیابی، "شماره منحنی" در تمامی زیرحوضه‌ها نسبت به قبل از اجرای اقدامات آبخیزداری کاهش یافته است. جدول ۴-۱۰ پارمترهای CN (شماره منحنی)، S (ضریب ذخیره) و I (تلفات اولیه) قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۰- پارمترهای CN، S و I قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری

زیر حوضه	قبل از عملیات آبخیزداری			بعد از عملیات آبخیزداری		
	CN	S	I	CN	S	I
		میلی‌متر			میلی‌متر	
B'	۸۱	۵۹/۶	۱۱/۹	۷۹	۶۷/۵	۱۳/۵
B1	۸۴	۴۸/۴	۹/۷	۸۳	۵۲	۱۰/۴
B2	۸۴	۴۸/۴	۹/۷	۸۱	۵۹/۶	۱۱/۹
B3	۸۴	۴۸/۴	۹/۷	۷۹	۶۷/۵	۱۳/۵
B4	۸۸	۳۴/۶	۶/۹	۸۴	۴۸/۴	۹/۷
B5	۸۶	۴۱/۳	۸/۳	۸۳	۵۲	۱۰/۴
B6	۸۱	۵۹/۶	۱۱/۹	۷۵	۸۴/۷	۱۶/۹

در این حالت با تعیین پارامترهای CN، S و I می‌توان میزان رواناب قبل و بعد از اجرای اقدامات را برآورد کرد، هم‌چنین در این شرایط با توجه به خصوصیات اقلیمی منطقه، عدم قطعیت‌های حاکم بر رشد، استقرار و بقای پوشش گیاهی و وجود دوره‌های ترسالی و خشکسالی در منطقه، باید درصدی از رواناب کنترل‌شده را به‌عنوان رواناب ذخیره‌شده در نظر گرفت. در این راستا از آن‌جایی که اغلب بارش‌های کشور (در این زمینه باید به شرایط منطقه توجه کرد) در فصول زمستان و اوایل بهار صورت می‌گیرد که خاک تقریباً اشباع بوده و تبخیر نیز کمینه است (نور و همکاران، ۱۴۰۱)، ۵۰ درصد از این مقدار در محاسبات لحاظ شود.

در نهایت لازم است درآمد حاصل از آب ذخیره شده از طریق اقدامات بیولوژیک محاسبه شود. در این راستا انتخاب قیمت مناسب برای هر مترمکعب آب در محاسبه درآمدها تعیین‌کننده است. برای مثال در حوضه سد کارده با توجه به محاسبات قیمت تمام‌شده آب در سد کارده، درآمد حاصل از کنترل رواناب در دامنه‌ها حدود

۲۲۰/۸ میلیارد ریال در کل دوره ۲۵ ساله (تا ۱۴۰۳) براورد شد. البته می‌توان هزینه هر مترمکعب انتقال آب از دریای عمان به شهر مشهد (حدود سه دلار برای هر مترمکعب) را نیز در محاسبات لحاظ کرد.

۴-۴-۲- منافع برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت خاک

۴-۴-۲-۱- اثر اقدامات آبخیزداری بر کاهش رسوب‌دهی

اقدامات حفاظت خاک از سه طریق باعث کاهش رسوب‌دهی حوضه می‌شود و در نتیجه از رسوب ورودی به پایین‌دست می‌کاهند.

۱. کاهش فرسایش خاک: با کاهش فرسایش خاک در سطح دامنه‌ها از میزان مواد همراه رواناب کاسته شده و در نتیجه رسوب‌دهی حوضه کاسته می‌شود.
۲. ترسیب مواد در مسیر حمل جریان: سازه‌های آبخیزداری قادرند به اندازه حجم مخازن خود رسوبات را در مسیر حمل به تله انداخته و از ادامه مسیر آن‌ها جلوگیری کنند. در نتیجه این اقدام از بار رسوب خروجی از حوضه کاسته می‌شود.
۳. کاهش نسبت تحویل رسوب: اجرای اقدامات سازه‌ای در حوضه به‌ویژه درصورتی که پلکانی اجرا شوند، منجر به کاهش شیب آبراهه می‌شود. بنابراین اقدامات بیولوژیک و سازه‌ای (در حالت پر و خالی) و تغییرات شیب آبراهه موجب کاهش حجم و دبی اوج جریان می‌شوند. در این زمینه می‌توان انتظار داشت که با کاهش دبی جریان از قدرت رواناب کاسته شده و نسبت تحویل رسوب کاهش یابد (نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲). در این رابطه ویلیامز (به نقل از بیات و مرادی، ۱۳۹۳) معادله ۴-۱ را برای نسبت تحویل رسوب ارائه داده است که مشخصاً اثر کاهش دبی اوج و حجم رواناب بر نسبت تحویل رسوب را نشان می‌دهد.

$$D=11.8(Q\times q_p)^{0.56}\div R\times A$$ رابطه ۴-۱

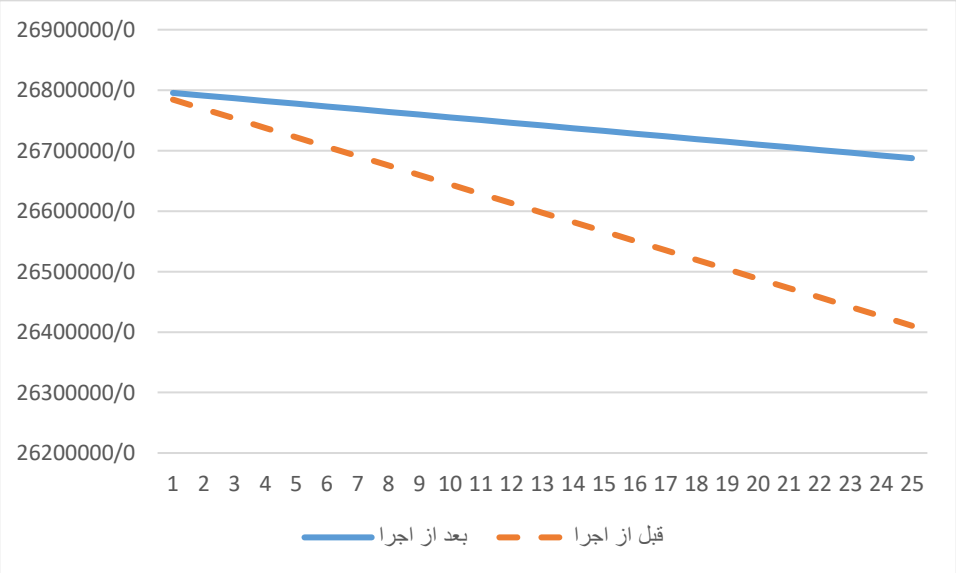
برای آشنایی بهتر با نحوه محاسبات این بخش مثالی از ارزیابی پروژه حفاظت خاک در بخشی سد کارده ارائه می‌شود. براساس گزارش ارزیابی حوضه گوش و بهره (شرکت نقش آب طوس ، ۱۳۸۸)، پس از اجرای

اقدامات بیولوژیک میزان متوسط فرسایش در حوضه از ۱۰/۲ تن در هکتار به ۷/۸ تن در هکتار رسیده است.

محاسبات مربوط به کاهش حجم رسوب ورودی به سد کارده در جدول ۴-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۱- میزان رسوب ورودی به سد کارده در سناریوهای مختلف کنترل فرسایش و رسوب

مؤلفه رسوب و رسوب‌گذاری در سد	حجم
حجم رسوب قبل از اجرای اقدامات (مترمکعب)	۳۸۹۵۵۸/۴
کاهش رسوب به‌دلیل اجرای اقدامات بیولوژیک (کاهش فرسایش) (مترمکعب)	۹۱۶۶۰/۸
کاهش رسوب به‌دلیل کاهش SDR (مترمکعب)	۲۹۷۸۹/۸
کاهش رسوب ورودی به سد به‌دلیل تله‌اندازی در سازه‌های آبخیزداری (مترمکعب)	۱۵۵۷۲۳
مجموع اثرگذاری اقدامات بر رسوبدهی حوضه	۲۷۷۱۷۳/۶
حجم رسوب ورودی بعد از اجرای اقدامات (مترمکعب)	۱۱۲۳۸۴/۸
حجم اسمی قابل مدیریت توسط سد در دوره ۲۵ ساله (میلیون مترمکعب)	۶۷۰
حجم قابل مدیریت توسط سد در دوره ۲۵ ساله (میلیون مترمکعب)- بدون اجرای اقدامات	۶۶۴/۹
کاهش حجم سد به‌دلیل رسوب‌گذاری در کل دوره (میلیون مترمکعب)	۵/۱
حجم قابل مدیریت توسط سد در کل دوره (میلیون مترمکعب)- با اجرای اقدامات	۶۶۸/۵
اثر اقدامات حفاظت خاک بر حجم قابل ذخیره آب در سد کارده (میلیون مترمکعب)	۳/۶



شکل ۴-۳- کاهش حجم قابل مدیریت سد کارده در دو سناریوی با و بدون اجرای اقدامات

در صورت ثابت‌بودن نسبت تحویل رسوب در قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری میزان رسوب ورودی به سد در دو دوره به‌ترتیب ۲۰۲۳۶ و ۱۵۴۷۵ تن در سال برآورد می‌شود. براین‌اساس حجم رسوب در قبل از

اجرای اقدامات طی ۲۵ سال (از زمان اجرای اقدامات تاکنون) ۳۸۹۵۵۸ مترمکعب بوده است و بعد از اجرای اقدامات بیولوژیک و فرض ثابت‌بودن نسبت تحویل رسوب، به‌میزان ۹۱۶۶۰ مترمکعب از تولید رسوب منطقه کاسته شده است.

هم‌چنین اجرای اقدامات سازه‌ای آبخیزداری باعث ترسیب رسوب به میزان ۱۵۵۷۲۳ متر مکعب رسوب در پشت سازه‌ها شده است. همچنین کاهش دبی اوج در اثر اجرای اقدامات حفاظت از خاک در دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است. دوره بازگشت دوساله نشان دهنده میانگینی از شرایط حوضه است (مهدوی، ۱۳۹۶) و برای انجام محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. بااین‌حال انتظار می‌رود با فرض ثابت‌بودن سایر پارامترهای معادله ۴-۱ به‌جز مشخصات دبی، نسبت تحویل رسوب بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری به میزان حدود ۹/۸ درصد کاهش یابد و بنابراین از رسوب ورودی به سد کارده به میزان ۲۹۷۸۹ مترمکعب به‌دلیل کاهش نسبت تحویل رسوب، کاسته شده است.

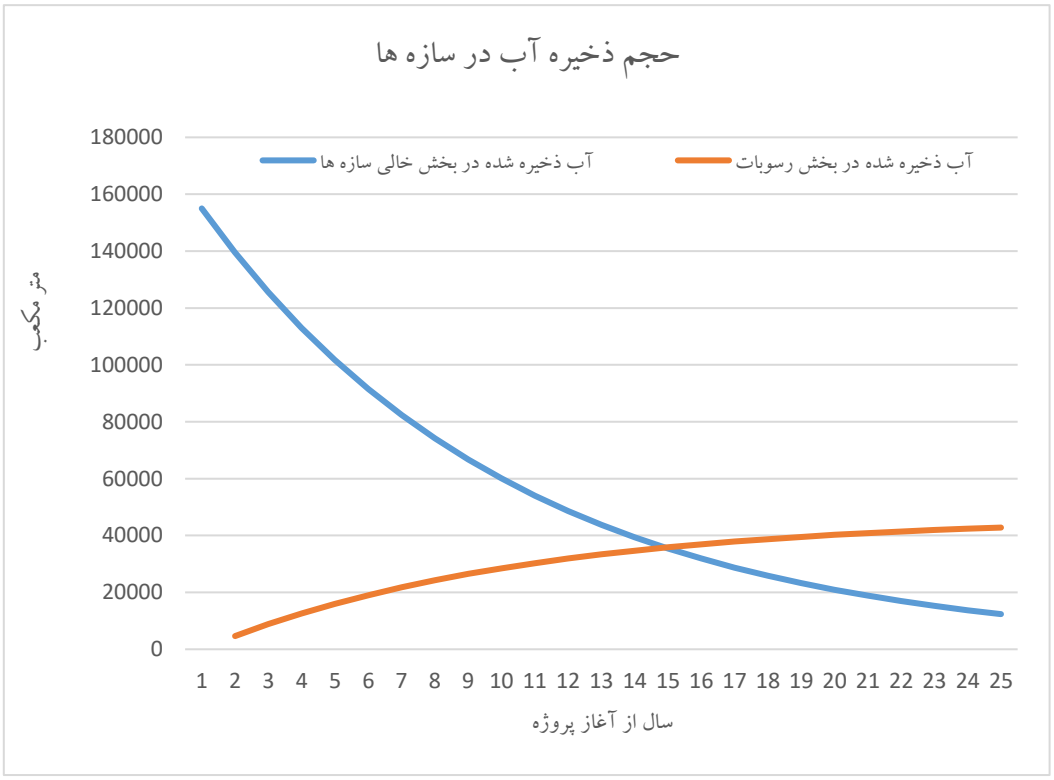
جدول ۴-۱۲- کاهش دبی اوج در دوره بازگشت‌های مختلف در اثر اجرای اقدامات حفاظت از خاک

دوره بازگشت	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
درصد کاهش دبی	۱۸/۴	۳۶/۸	۳۵/۶	۳۰/۹	۲۸/۲	۲۶/۸

در مجموع کل اثرگذاری اقدامات بیولوژیک و سازه‌ای بر کاهش رسوب ورودی به سد کارده به میزان ۲۷۷۱۷۳ مترمکعب شامل ۹۱۶۶۰ مترمکعب در اثر کاهش فرسایش خاک، ۲۹۷۸۹ مترمکعب به‌دلیل کاهش نسبت تحویل رسوب و ۱۵۵۷۲۳ متر مکعب رسوب در پشت سازه‌ها، است. در این حالت کاهش حدود ۷۰ درصد رسوب ورودی به سد نسبت به قبل از اجرای اقدامات آبخیزداری مشاهده شده است. شکل ۴-۳ نشان‌دهنده حجم قابل ذخیره سد کارده در دو سناریوی قبل و بعد از اجرای اقدامات حفاظت از خاک است. براساس محاسبات جدول ۴-۱۲، میزان کل خسارت رسوبگذاری در سدکارده از زیرحوضه گوش و بهره حدود ۵۵۶/۱ میلیارد ریال است. بنابراین با کنترل حدود ۷۰ درصدی رسوب توسط اقدامات حفاظت خاک، میزان کاهش خسارت به میزان ۳۸۹/۲ میلیارد ریال حاصل شده است.

۴-۴-۲-۲- اثر سازه‌های حفاظت خاک بر ذخیره رواناب

همان‌گونه که بیان شد سازه‌های احداث‌شده مانع انتقال رسوب به سمت پایین دست و باعث کنترل رسوب می‌شوند، بنابراین به‌تدریج از قابلیت ذخیره رواناب توسط آن‌ها کاسته می‌شود. در این راستا باید در هر سال میزان ترسیب رسوب در سازه‌ها را مد نظر قرار داد. در این حالت مخزن سازه از یک بخش خالی و یک بخش پرشده از رسوب تشکیل می‌شود. در بخشی که از رسوب پرشده است آب در فضای متخلخل قابلیت ذخیره‌شدن دارد. فضای متخلخل رسوبات برای ذخیره رواناب، در سازه‌های آبخیزداری بالادست سد کارده حدود ۳۰ درصد مدنظر قرار گرفت. بر این اساس تغییرات حجم قابل تنظیم توسط سازه‌های آبخیزداری بالادست سد کارده مطابق شکل ۴-۴ خواهد بود.



شکل ۴-۴- تغییرات مقدار آب قابل ذخیره در سازه‌های آبخیزداری با توجه به رسوب‌گذاری در آن‌ها

هم‌چنین نتایج تحقیق عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در زمینه بیلان آبی یکی از سازه‌های خاکی حوضه گوش و بهره با ۱/۷ متر رسوب ریزدانه نشان دادند که تبخیر سهم ۳۰ درصدی را داشته است و حدود ۷۰ درصد در خاک نفوذ کرده است که می‌تواند معیاری برای مطالعات سایر مناطق باشد.

همان‌گونه که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود به‌تدریج از حجم آب کنترل‌شده توسط سازه‌ها کاسته می‌شود. در این شرایط طی ۲۵ سال حدود ۴/۳ میلیون مترمکعب کنترل می‌شود. نتایج تحقیق عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در زمینه بیلان آبی یکی از سازه‌های خاکی حوضه گوش و بهره با ۱/۷ متر رسوب ریزدانه نشان دادند که تبخیر سهم ۳۰ درصدی را داشته است. در این تحقیق به‌طور متوسط برای کل دوره سهم ۵۰ درصدی برای نفوذ آب کنترل شده در نظر گرفته شد. براین‌اساس و با توجه به قیمت تعیین‌شده آب در سد کارده، درآمد حاصله از آب کنترل شده توسط سازه‌های آبخیزداری چیزی در حدود ۶۰/۷ میلیارد ریال در کل دوره تخمین زده می‌شود.

البته این مقدار آب باید در سد ذخیره می‌شده است و فقط از ورود رسوب به سد جلوگیری کند. البته این اقدام باعث ایجاد منابع آب در سراب حوضه که معمولا دارای شیب زیاد و قدرت نفوذ کم رواناب هستند، ایجاد شده و باعث بهبود توزیع آب در سطح حوضه شده و منابع آب سطحی و زیرسطحی کم‌عمق (قنات و چاه‌های کنار آبراهه‌ها) را پرآب می‌کند که اثرات مثبت بر نگرش افراد داشته و موجب افزایش مشارکت‌پذیری آن‌ها خواهد شد. بنابراین دارای اثرات غیرمستقیم و اجتماعی است. مطمئناً بخشی از این رواناب به‌صورت طبیعی نیز بدون وجود سازه‌ها نیز درون کانال ذخیره می‌شده است که درصورت وجود سازه‌ها و کنترل جریان و ایجاد تأخیر در آن انتظار ذخیره حجم بیشتری از جریان وجود دارد. بااین‌حال در این تحقیق روشی دقیق برای این منظور بدست نیامد.

۴-۴-۳- جمع‌بندی منافع

در جدول ۴-۱۳ جمع‌بندی اقدامات حفاظت خاک در حوضه گوش و بهره ارائه شده است.

جدول ۴-۱۳- مجموع منافع حفاظت از خاک در حوزه آبخیز گوش و بهره

محل اثرگذاری	نوع متافع	دوره مبنا	میزان منافع در دوره مبنا (میلیارد ریال)	منافع سالانه (میلیارد ریال)
درون‌منطقه‌ای	افزایش تولید علوفه	کل دوره	۱۰۴/۴	۴/۲
	حفظ عناصر غذایی خاک	هر سال	۱۲/۷	۱۲/۷
	ترسیب کربن خاک	هر سال	۶/۷	۶/۷
	ذخیره رواناب در دامنه	کل دوره	۲۲۰/۸	۸/۸
برون‌منطقه‌ای	کاهش رسوب ورودی به سد	کل دوره	۳۸۹/۲	۱۵/۵
	ذخیره آب در سازه‌ها	کل دوره	۶۰/۷	۲/۴

تحلیل نسبت فایده - هزینه پروژه حفاظت از خاک اجرا شده نشان دهنده عدد ۳۷/۴ است. به‌عبارتی انتظار بر آن است که با هزینه یک ریال در پروژه‌های حفاظت از خاک منطقه، حدود ۳۷/۴ ریال درآمد ناخالص حاصل شود. در این راستا تحقیقات متعددی اثرات اقدامات حفاظت از خاک و آبخیزداری شامل پخش سیلاب (نور و همکاران، ۱۴۰۱)، جمع‌آوری آب باران (مظهری و همکاران، ۱۴۰۳)، سد زیرزمینی (فاضل‌پور عقدائی و همکاران، ۱۳۹۳)، اقدامات بیولوژیک و سازه‌ای (گرشاسبی و قربانپور، ۱۳۹۴) را مورد بررسی قرار داده‌اند و اجرای آنها را دارای توجیه اقتصادی اعلام کرده‌اند.

در مجموع می‌توان بیان کرد که این تحقیق نشان داد که اقدامات حفاظت از خاک اجراشده در حوضه گوش و بهره بر خسارت‌های درون و برون‌منطقه‌ای فرسایش خاک اثرگذار بوده‌اند، به‌گونه‌ای‌که از این میان حدود ۶۴ درصد مربوط به منافع درون‌منطقه‌ای و ۳۶ درصد نیز مربوط به اثرات برون‌منطقه‌ای است.

تمایز قائل‌شدن بین منافع درون و برون‌منطقه‌ای در این تحقیق، لایه جدیدی از تحلیل را اضافه می‌کند. سهم ۶۴ درصدی منافع درون‌منطقه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر مستقیم این پروژه‌ها در بهبود وضعیت همان حوزه آبخیز است؛ این شامل افزایش بهره‌وری کشاورزی، کاهش هزینه‌های تولید، و بهبود کیفیت منابع آب محلی می‌شود. درعین‌حال، سهم ۳۶ درصدی منافع برون‌منطقه‌ای نیز نباید نادیده گرفته شود؛ این منافع می‌تواند شامل کاهش رسوب‌گذاری در سدها، بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها و سفره‌های زیرزمینی در پایین‌دست و کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب‌های مخرب باشد. نکته قابل توجه در این تحقیق، تفکیک دقیق‌تر بین اثرات درون و برون‌منطقه‌ای است که در برخی مطالعات قبلی به این شکل مورد تأکید قرار نگرفته

بود. این تفکیک به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا نه‌تنها از منافع مستقیم پروژه‌ها در منطقه اجرا آگاه شوند، بلکه اهمیت گسترده‌تر آن‌ها را در سطح ملی و منطقه‌ای نیز درک کنند. این موضوع به ویژه در مورد کشور پهناوری چون ایران که با چالش‌های فرسایش خاک در گستره وسیعی مواجه است، حائز اهمیت فراوان است.

باید توجه داشت که در این حوزه آبخیز اقدامات بیولوژیک در سطح مراتع و اقدامات سازه‌ای در آبراهه‌ها و به‌صورت پلکانی اجرا شده است که خود موجب اثرات درون‌منطقه‌ای زیادی در حوضه شده است. به‌عبارتی در این حوضه فرسایش خاک در محل وقوع، تا حدودی کنترل شده است و از ایجاد خسارت‌های بعدی جلوگیری شده است. در سال‌های اخیر اجرای اقدامات حفاظت خاک در سطح دامنه‌ها (کنترل در مبدأ) مانند پروژه‌های بیولوژیک محدود و یا حذف شده است و اقدامات سازه‌ای نیز به‌صورت تک‌سازه در زیرحوضه‌ها صورت گرفته است. در این حالت مطمئناً بخشی از منافع اقدامات حفاظت از خاک از دست خواهد رفت. برای مثال در حوضه کریم‌آباد که یکی دیگر از زیرحوضه‌های بالادست سد کارده است، اقدامات بیولوژیک مدنظر قرار نگرفته است و فقط تعداد ۱۳ سازه در آبراهه‌های اصلی اجرا شده است. بنابراین در آبخیز کریم‌آباد نباید انتظار منافع درون‌منطقه‌ای از اقدامات حفاظت از خاک شامل افزایش تولید علوفه، کاهش فرسایش و حفظ عناصر غذایی، ترسیب کربن و ذخیره رواناب را داشت. به عبارتی در این نوع پروژه‌ها فقط بخشی از منافع برون‌منطقه‌ای شامل ترسیب رسوب در مخازن سازه‌ها و ذخیره رواناب قابل محاسبه خواهد بود. مدیران و سیاست‌گزاران باید به اجرای منافع اقتصادی اقدامات پیشنهادی توجه داشته باشند و براین‌اساس به اصلاح برنامه‌های گذشته و پیشنهاد برنامه‌های آینده حفاظت از خاک اقدام کنند.

ملاحظات اخلاقی

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر در جای دیگری منتشر، ارائه یا برای چاپ استفاده نشده است و هم‌زمان برای انتشار در نشریه یا مجموعه دیگری نیز ارسال نشده و نخواهد شد.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول، طراحی و تدوین چارچوب، گردآوری و تحلیل داده‌ها، انجام محاسبات و نگارش اولیه اثر؛ نویسنده دوم، مشارکت در تدوین روش‌شناسی؛ نویسنده سوم، مشارکت در گردآوری و تحلیل اطلاعات و محاسبات اقتصادی.

بیانیه استفاده از هوش مصنوعی: در تهیه و ویرایش این اثر، از ابزار هوش مصنوعی صرفاً برای بررسی تطبیق ارجاعات و منابع استفاده شده است. محتوای علمی، داده‌ها، محاسبات و نتایج پژوهش توسط نویسندگان تهیه، بررسی و تأیید شده است.

خوداظهاری: این اثر بر پایه نتایج و داده‌های حاصل از مطالعه موردی حوزه آبخیز سد کارده و فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان تدوین شده است. در این اثر، اطلاعات و نتایج موجود در مطالعات و منابع پیشین با هدف ارائه یک چارچوب کاربردی برای تعیین و ارزش‌گذاری منافع درون‌منطقه‌ای و برون‌منطقه‌ای اقدامات حفاظت آب و خاک بازتنظیم و یکپارچه شده و آزمون آن در حوزه آبخیز گوش و بهره (سد کارده) انجام شده است.

منابع

- بیات، ر.، مرادی، ش. ۱۳۹۳. مروری بر تحقیقات انجام‌شده روی نسبت تحویل رسوب. ترویج و توسعه آبخیز، ۲(۵): ۳۶-۲۷.
- پرویزی، ی. ۱۴۰۲. ظرفیت منابع اراضی کشور در تجارت جهانی کربن از طریق عملیات احیایی آبخیزداری. بازتاب تات، ۶ (۱۸): ۲۸–۲۹.
- پرویزی، ی.، غفاری گوشه، ی.، عباسی، ع.ا. ۱۴۰۴. روش‌شناسی تعیین خسارت‌های اقتصادی فرسایش سطحی- شیاری خاک: بررسی موردی دیمزارهای شونه اسدلی خراسان شمالی. نشریه فنی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۷۰ ص.
- قربانی، م.، حسینی، س.ص. ۱۳۸۶. کاربرد روش هزینه جایگزین در برآورد هزینه سالانه فرسایش آبی خاک در ایران، نشریه فناوری زیستی در کشاورزی، ۳(۷): ۱۷۷-۱۸۷.
- حسینی، س. ص.، و قربانی، م. ۱۳۸۴. اقتصاد فرسایش خاک (چاپ اول). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۲۸ ص.

- خزایی، م.، صادقی، س. ح.، میرنیا، س. خ.، و یزدانی‌مقدم، ی. ۱۳۹۱. اثر تخریب جنگل بر هدررفت عناصر غذایی خاک و رسوب در حوزه آبخیز جنگلی کجور: مطالعه موردی جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس. اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۳: ۱–۱۲.
- سازمان برنامه و بودجه. ۱۴۰۳. فهرست‌بهای واحد پایه رشته آبخیزداری و منابع طبیعی، ۱۲۵ ص.
- شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۱. راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۲۵۱ ص.
- شرکت نقش آب طوس. ۱۳۸۸. مطالعات ارزیابی اثرات عملیات آبخیزداری در حوزه گوش و بهره شهرستان مشهد، ۱۴۵ ص.
- شهریور، ع.، نور، ح.، و خزائی، م. ۱۳۹۶. مسائل زیست‌محیطی فرسایش خاک. انتشارات ارشدان، ۱۵۱ ص.
- طلوعی، ا. ۱۳۸۴. طراحی و بهره‌برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب. در مجموعه مقالات نخستین همایش مدیریت رسوب. دانشگاه شهید چمران اهواز. صص. ۸۲–۹۱.
- عباسی، ع. ا.، باقریان کلات، ع.، و خوشبزم، ا. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر سازه‌های کوتاه در ذخیره رواناب و رطوبت خاک (مطالعه موردی حوزه سد کارده). مجله سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۲(۱): ۱۷–۲۶. http://magiran.com/p1341134.
- عرب‌خدری، م.، و نور، ح. ۱۴۰۰. پژوهش‌های تجربی فرسایش و رسوب (در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه): فرصت‌های تحقیقاتی، آموزشی و ترویجی . پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۳۳۶ ص.
- فاضل‌پور عقدائی، م.ر.، زکی‌زاده، ف.، و دستورانی، م.ت. ۱۳۹۳. بررسی اقتصادی سد زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز میل سفید). ترویج و توسعه آبخیزداری، ۲(۷): ۱–۷.
- فضلی، س.، و نور، ح. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی و ارزیابی اثر سناریوهای مختلف درصد پوشش گیاهی بر فرسایش خاک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۱ (۴): ۵۶۲–۵۷۱.
- قربانی، م.، و حسینی، س.ص. ۱۳۸۶. کاربرد روش هزینه جایگزین در برآورد هزینه سالانه فرسایش آبی خاک در ایران. ۳(۷): ۱۷۷–۱۸۶.
- رحمانی، ف.، انصاری، ح. ۱۳۹۱. برآورد قیمت آب پای سدها در دشت های ممنوعه و ممنوعه بحرانی استان خراسان رضوی. مجله انسان و محیط زیست، ۱۰(۱): ۱۲-۲۰.
- گرشاسبی، پ.، و قربانپور، د. ۱۳۹۴. ارزیابی اقتصادی اقدامات حفاظت خاک، مطالعه موردی: زیرحوضه میان‌بیشه در حوزه آبخیز طالقان. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۷(۳): ۲۲۹–۲۳۹. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.101629.

- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۲. راهنمای ارزیابی اقتصادی پروژه‌های آبخیزداری، نشریه ۶۴۲، ۱۶۵ ص.
- مظهری، م.، میرزایی، م.، نور، ح.، رحمانی، ص. ا.، نعمتی، ع.، هاشمی، ع. ا.، باقریان کلات، ع.، عین‌اللهی محرم‌آبادی، م.، و شیروانیان، ع. ۱۴۰۳. بررسی اثربخشی اقتصادی و اجتماعی دستاوردهای طرح‌های تحقیقاتی اجراشده در حوزه‌های آبخیز برخی از استان‌های کشور. مجله ترویج و توسعه آبخیزداری، ۱۲(۴۵): ۶۸–۷۳. http://magiran.com/p2784115.
- مهدوی، م. ۱۳۹۵. هیدرولوژی عمومی . انتشارات دانشگاه تهران، ۲۷۲ ص.
- نور، ح.، دسترنج، ع.، و صادقی، س. ۱۴۰۱. ارزیابی اثربخشی پروژه پخش سیلاب جاجرم با استفاده از معیارهای اقتصادی و نظرات ساکنین حاشیه طرح. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۴(۴): ۴۳۸–۴۴۹. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.128502.1741.
- نور، ح.، عرب‌خدری، م.، پرویزی، ی. ۱۴۰۳. ارزیابی اثر اقدامات آبخیزداری بر فرسایش خاک و تولید رواناب در مقیاس کرت و آبخیز زوجی کاخک. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۶(۱): ۱۶-۳۲.
- نور، ح.، فضلی، س.، و میرنیا، س. خ. ۱۳۹۰. برآورد فسفر بار معلق وقایع سیلابی با استفاده از مؤلفه‌های بارش و رواناب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کجور). پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۲۴(۲): ۳۳–۳۶.
- نور، ح. و فضلی، س. ۱۳۹۱. برآورد آلاینده‌های غیرنقطه‌ای وقایع سیلابی. در دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست. ۶ ص.
- نور، ف.، نصری، م.، یگانه، ح.، مقیمی‌نژاد، ف.، قاسمی آریان، ی. بنی نعمه، ج. ۱۳۹۲. برآورد تلفات اقتصادی فرسایش خاک مراتع با استفاده از روش جایگزینی مواد غذایی. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۰(۳): ۵۲۲-۵۳۰.
- یزدان‌پرست، م.، مساعدی، ا.، خداشناس، س. ر.، و گل‌کاریان، ع. ۱۳۹۵. تأثیر رسوب‌گذاری بر تبخیر از دریاچه سد کارده. در ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران ، سنندج. ۷ ص.
- یگانه بدرآبادی، ح.، آذرنیوند، ح.، صالح، ا.، ارزانی، ح.، و امیرنژاد، ح. ۱۳۹۴. برآورد ارزش اقتصادی کارکرد علوفه تولیدی مراتع حوزه آبخیز تهم. پژوهش‌های آبخیزداری، ۲۸(۱): ۷۳–۸۵. https://doi.org/10.22092/wmej.2015.107049.
- Andraski, B.J. & Lowery, B. 1992. Erosion effects on soil water storage, plant water uptake, and corn growth. Soil Science Society of America Journal, 56(6): 1911–1919.
- Bakker, M.M., Govers, G. & Rounsevell, M.D.A. 2004. The crop productivity–erosion relationship: An analysis based on experimental work. Catena, 57(1): 55–76.

- 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): 497–508.
- Blanco, H. & Lal, R. 2008. Principles of Soil Conservation and Management. Springer, 617 p.
- Ekholm, P. & Lehtoranta, J. 2012. Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication? Journal of Environmental Management, 93(1): 140–146.
- Flörchinger, F.A., Leihner, D.E., Steinmüller, N., Müller-Sämann, K. & El-Sharkawy, M.A. 2000. Effects of artificial topsoil removal on sorghum, peanut, and cassava yield. Journal of Soil and Water Conservation, 55(3): 334–339.
- Freeman, A.M., III, Herriges, J.A. & Kling, C.L. 2014. The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods. Routledge, 478 p.
- Gollany, H.T., Schumacher, T.E., Evenson, P.D., Lindstrom, M.J. & Lemme, G.D. 1992. Topsoil depth and desurfacing effects on properties and productivity of a Typic Argiustoll. Soil Science Society of America Journal, 56 (1): 220–225.
- Görlach, B., Landgrebe-Trinkunaite, R., Interwies, E., Bouzit, M., Darmendrail, D. & Rinaudo, J.D. 2004. Assessing the Economic Impacts of Soil Degradation. Volume IV: Executive Summary. Study commissioned by the European Commission, DG Environment, Berlin, 96 p.
- Lal, R. 2005. Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. In R. Lal (Ed.), Soil erosion and carbon dynamics. Taylor & Francis. pp. 23–36
- Massee, T.W. 1990. Simulated erosion and fertilizer effects on winter wheat cropping intermountain dryland area. Soil Science Society of America Journal, 54(6): 1720–1725.
- Montanarella, L. 2007. Trends in land degradation in Europe. In M. V. K. Sivakumar & N. Ndiang'ui (Eds.), Climate and land degradation. Springer. pp. 83–104
- Noor, H., Fazli, S. & Alibakhshi, S.M. 2013. Evaluation of the relationships between runoff-rainfall-sediment related nutrient loss (A case study: Kojour Watershed, Iran). Soil and Water Research, 8(4): 172–177.
- Noor, H., Fazli, S., Rostami, M. & Kalat, A.B. 2017. Cost-effectiveness analysis of different watershed management scenarios developed by simulation–optimization model. Water Science and Technology: Water Supply, 17(4): 1029–1038.
- Noor, H., Mirnia, S. K., Fazli, S., Raisi, M. B. & Vafakhah, M. 2010. Application of MUSLE for the prediction of phosphorus losses. Water Science and Technology, 62(4): 809–815.
- Noor, H., Vafakhah, M. & Mohammady, M. 2016. Comparison of different targeting methods for watershed management practices implementation in Taleghan Dam watershed, Iran. Water Science and Technology: Water Supply, 16(6): 1484–1496.

- Pimentel, D. & Burgess, M. 2013. Soil erosion threatens food production. Agriculture, 3(3): 443-463.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science, 267 (5201): 1117–1123.
- Predo, C., Grist, P. & Menz, K.R. 1997. Estimating the onsite cost of soil erosion in the Philippines: The replacement cost approach. In Imperata Project: Improving smallholder farming systems in Imperata areas of Southeast Asia. pp. 22–35.
- Pretty, J.N., Brett, C., Gee, D., Hine, R.E., Mason, C.F., Morison, J.I.L., Raven, H., Rayment, M.D. & van der Bijl, G. 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture. Agricultural Systems, 65(2): 113–136.
- Robert, M. 2005. Global Change and Carbon Cycle: The Position of Soils and Agriculture. In: Roose, E., Lal, R., Feller, C., Barthès, B. & Stewart, B.A. (Eds.), Soil Erosion and Carbon Dynamics. CRC Press, pp. 3–12.
- Sparling, G.P., Wheeler, D., Vesely, E.T. & Schipper, L.A. 2006. What is soil organic matter worth? Journal of Environmental Quality, 35(2): 548–557.
- Verstraeten, S.V., Keen, C.L., Schmitz, H.H., Fraga, C.G. & Oteiza, P.I. 2003. Flavan-3-ols and procyanidins protect liposomes against lipid oxidation and disruption of the bilayer structure. Free Radical Biology and Medicine, 34(1): 84-92.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. 1982. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. In Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. Vol. 137. pp. 327–337.

Abstract

This technical publication was developed to provide a framework for determining the intra-regional and extra-regional benefits of soil and water conservation measures. Soil erosion is one of the major environmental and economic challenges, causing adverse impacts both at the site of occurrence (intra-regional impacts) and in downstream or more distant areas (extra-regional impacts). However, due to the lack of well-defined criteria and transparent economic valuation methods, these impacts are often overlooked in strategic decision-making. In this study, the key factors influencing soil erosion-related damages were first identified from both intra-regional and extra-regional perspectives. Subsequently, a framework based on these factors was developed to enable a more accurate assessment of the quantitative and qualitative dimensions of such damages. Using this framework, the economic benefits resulting from the implementation of soil conservation projects were then evaluated within and beyond the watershed. The results of the assessment for an implemented project indicated a benefit-to-cost ratio (B/C) of 4.37. This finding suggests that for every monetary unit invested in soil conservation projects, a gross return of approximately 4.37 monetary units can be expected, demonstrating the considerable economic viability of such projects. Finally, the results showed that the implemented soil conservation measures in the study watershed had a substantial effect on reducing both intra-regional and extra-regional damages caused by soil erosion. The share of intra-regional benefits was estimated at approximately 64%, while extra-regional benefits accounted for approximately 36%. This distinction highlights the importance of local impacts alongside the broader benefits generated by soil conservation projects.

Keywords: Cost-benefit analysis, Economic value of soil, Monitoring and evaluation

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Education Center

Title: Methodology for Determining Onsite- and Offsite- Benefits of Water and Soil Conservation Measures (Case Study: Kardeh Dam, Mashhad)
Authors: Hamzeh Noor, Yahya Parvizi, Ali Dastranj
Editor: Saeed Nabipay Lashkarian
Page Layout: Abbas Seddigh
Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Circulation:10 copies
Date of publication: Summer 2026
This scientific work has been registered with the series number of **70096** at the date of **2026-09-29** the Agriculture Information and Scientific Documents Center.
All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Education Center

Technical Guideline:
Methodology for Determining Onsite- and Offsite- Benefits of Water and Soil Conservation Measures (Case Study: Kardeh Dam, Mashhad)

Authors:
Hamzeh Noor, Yahya Parvizi, Ali Dastranj

Series number: 70096

2026

Minstry of Agriculture - Jahad
Agriculture Research, Education and Extention Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Technical Guideline

Methodology for Determining Onsite- and Offsite- Benefits of Water and Soil Conservation Measures (Case Study: Kardeh Dam, Mashhad)

Authors:
Hamzeh Noor, Yahya Parvizi, Ali Dastranj

Series Number: 70096

2026