

حفاظت خاک و آب برای تولید پایدار غذا

نویسنده:

سوبهابراتا پاندا

مترجم:

زهرا گرامی



سرشناسه: پاندا، سوبهابراتا؛ Panda, Subhabrata

عنوان و نام پدیدآور: حفاظت خاک و آب برای تولید پایدار غذا/ نویسنده سوبهابراتا پاندا؛

مترجم زهرا گرامی؛ ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان.

مشخصات نشر: تهران: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۴۰۳.

مشخصات ظاهری: ۱۷۵ ص.: مصور (رنگی)، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۰۵۴-۴۴-۵

وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا

یادداشت: کتابنامه

موضوع: حفاظت خاک Soil conservation

حفاظت آب Water conservation

فراورده‌های زراعی و خاک Crops and soils

خاک—فرسایش Soil erosion

خاک—رطوبت Soil moisture

کشاورزی پایدار Sustainable agriculture

امنیت غذایی Food security

شناسه افزوده: گرامی، زهرا، ۱۳۶۸-، مترجم

شناسه افزوده: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

رده‌بندی کنگره: S۶۲۳

رده‌بندی دیویی: ۶۳۱/۴۵

شماره کتابشناسی ملی: ۹۹۳۸۰۴۴

اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیپا

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

عنوان: حفاظت خاک و آب برای تولید پایدار غذا

نویسنده: سوبه‌ابراتا پاندا

مترجم: زهرا گرامی

ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۰۵۴-۴۴-۵

نوبت چاپ: اول

قیمت: ۱۲۰۰۰۰۰ ریال

شمارگان: ۱۰۰ نسخه

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳

این اثر در مورخه ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ با شماره فروست ۳۱۴۰۳۷۱ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

تقدیم به :

**همه آنان که با دل و جان می‌کوشند تا
چراغ امید و انگیزه تلاش
در دل جوانان این سرز و بوم فروزان بماند.**

سخن مترجم:

امروزه اهمیت حفظ منابع طبیعی برای تأمین امنیت غذایی و توسعه پایدار بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. کتاب «حفاظت خاک و آب برای تولید پایدار غذا» به‌عنوان یکی از منابع در این حوزه، با تمرکز بر روش‌ها و راهکارهای علمی و کاربردی، به بررسی چالش‌ها و راه‌حل‌های موجود برای مدیریت پایدار خاک و آب می‌پردازد.

ترجمه این کتاب تلاشی است در جهت انتقال دانش و تجربیات ارزشمندی که می‌تواند الهام‌بخش پژوهشگران، دانشجویان، سیاست‌گذاران و کشاورزان باشد. در فرایند ترجمه، تلاش شده است که ضمن وفاداری به متن اصلی، مطالب به‌گونه‌ای روان و قابل فهم ارائه شود تا مخاطبان فارسی‌زبان بتوانند به‌راحتی از محتوای آن بهره‌مند شوند.

در پایان، لازم می‌دانم از آقایان دکتر حمیدرضا پیروان و دکتر یحیی پرویزی به‌عنوان داوران علمی این کتاب و آقای دکتر رضا بیات برای حمایت‌های بی‌دریغ و مشاوره‌های ارزشمندشان جهت بهبود کیفیت ترجمه، و از مهندس سعید نبی پی لشکریان، برای ویراستاری دقیق و کمک‌های شایانشان در اجرای این ترجمه قدردانی کنم.

امیدوارم این اثر بتواند گامی در راستای آگاهی‌بخشی و تقویت مدیریت پایدار منابع خاک و آب در کشور ما باشد. از همه متخصصان و علاقه‌مندان دعوت می‌کنم تا با نقد و پیشنهادهای خود، راهنمای من در بهبود کیفیت کارهای آتی باشند.

زهره گرامی

زمستان ۱۴۰۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱.....	۱
سخن ابتدایی: حفاظت خاک و آب برای بهبود سلامت خاک.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- نتیجه گیری کلی.....	۱۲
فصل ۲.....	۱۹
ویژگی های پاسخگوی تلفات خاک.....	۱۹
۱-۲- مقدمه.....	۲۲
۲-۲- فرسایش پذیری خاک و سامانه سه فازی آن.....	۲۴
۱-۲-۲- فرسایش پذیری خاک و بافت خاک.....	۲۵
۲-۲-۲- فرسایش پذیری خاک و ساختمان خاک.....	۲۵
۳-۲- ویژگی های خاک پاسخگو فرسایش آبی.....	۲۶
۱-۳-۲- ویژگی های خاک و برآورد فرسایش آبی.....	۲۷
۴-۲- ویژگی های خاک پاسخگو فرسایش آبی و بادی.....	۲۹
۱-۴-۲- نیروهای باد و یا آب، اثرگذار بر ذرات خاک در آستانه حرکت.....	۳۱
۵-۲- ویژگی های خاک مؤثر بر رشد محصول.....	۳۲
۶-۲- تلفات خاک باعث آسیب پذیری بوم سازگان خاک- مسائل اساسی در زمینه طبیعت و محیط زیست.....	۳۷
۷-۲- نتیجه گیری کلی.....	۴۲
فصل ۳.....	۵۱
تأثیر اقلیم، آب و عوامل بیولوژیکی بر سلامت خاک.....	۵۱
۱-۳- مقدمه.....	۵۳
۲-۳- تدوین شاخص کیفیت خاک شامل کیفیت آب در چارچوب تغییرات اقلیمی.....	۵۵

۳-۳- تأثیر آب بر سلامت خاک در زمینه تغییرات اقلیمی	۵۸
۳-۴- بیومس میکروبی خاک-بزاری برای ارزیابی سلامت خاک در زمینه تغییرات اقلیمی	۶۴
۳-۵- تنوع زیستی ژنتیکی و کارکردی خاک‌ها، سلامت خاک و تغییرات اقلیمی	۶۶
۳-۶- شاخص‌های کلیدی سلامت خاک برای ارزیابی سلامت خاک در محل تحت تغییرات اقلیمی	۶۷
۳-۷- نتیجه‌گیری کلی	۶۹
فصل ۴	۸۰
تأثیر خاک بر کیفیت آب	۸۰
۴-۱- مقدمه	۸۱
۴-۲- تأثیر زمین‌شناسی بر کیفیت آب	۸۲
۴-۳- تأثیر توپوگرافی بر کیفیت آب	۸۳
۴-۴- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب تحت تأثیر اقلیم	۸۳
۴-۵- تأثیر ویژگی‌های خاک بر کیفیت آب	۸۳
۴-۶- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب تحت تأثیر پوشش گیاهی	۸۴
۴-۷- تأثیر حوزه آبخیز بر کیفیت آب	۸۴
۴-۷-۱- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب بوم‌سازگان آبزیان و هیدرولوژی حوضه ..	۸۵
۴-۸- تأثیر پوشش اراضی / کاربری اراضی بر کیفیت آب	۹۰
۴-۹- نتیجه‌گیری کلی	۹۱
فصل ۵	۹۹
۵-۱- مقدمه	۱۰۰
۵-۲- ویژگی‌های ضروری زمین برای آبیاری	۱۰۱
۵-۳- ضرورت سازگاری خاک و آب برای آبیاری	۱۰۲
۵-۳-۱- تعامل (اندرکنش) بین خاک و آب	۱۰۲

۱۰۴	۵-۳-۲- وضعیت خشکی فیزیولوژیکی خاک
۱۰۷	۵-۳-۳- شناخت ویژگی های خاک برای مدیریت آبیاری
۱۱۰	۵-۳-۴- کیفیت آب آبیاری
۱۱۱	۵-۴- مدیریت آبیاری در خاک های متأثر از نمک
۱۱۲	۵-۵- شناسایی خاک های متأثر از نمک
۱۱۳	۵-۶- مدیریت خاک و آب برای تولید پایدار محصول
۱۱۴	۵-۷- نتیجه گیری کلی
۱۱۶	فصل ۶
۱۱۶	تأثیر حفظ رطوبت خاک بر تولید مواد غذایی
۱۱۷	۶-۱- مقدمه
	۶-۲- ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر عمق ریشه زایی، جرم مخصوص ظاهری خاک،
۱۱۸	بارندگی و تبخیر و تعرق
۱۲۰	۶-۳- تکنیک های حفاظت از رطوبت خاک و اجرای آنها
۱۲۶	۶-۳-۱- ملاحظات اجرایی برای فناوری های حفظ رطوبت خاک
۱۲۸	۶-۴- نقش های مفید حفظ رطوبت خاک
۱۲۹	۶-۵- دورنما و مشکلات فناوری های حفظ رطوبت خاک
۱۲۹	۶-۵-۱- دورنما فناوری های حفظ رطوبت خاک
۱۲۹	۶-۵-۲- مشکلات فناوری های حفظ رطوبت خاک
۱۳۰	۶-۶- نتیجه گیری کلی
۱۳۳	فصل ۷
۱۳۳	مدیریت کربن آلی خاک
۱۳۵	۷-۱- مقدمه
۱۳۸	۷-۲- روابط متقابل SOM، کربن، نیتروژن، فسفر، گوگرد و هوموس
۱۴۱	۷-۳- نقش مواد آلی خاک در پایداری خاکدانه ها

۱۴۷	 نتیجه‌گیری کلی	۴-۷
۱۵۲	 فصل ۸	
۱۵۲	 نکات پایانی: خاک و آب برای امنیت غذایی	
۱۵۳	 نتیجه‌گیری کلی	۸-۱

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ - این جدول شامل پارامترهای خاک و پارامتر کلیدی توضیحی است که در منحنی نگهداشت آب خاک (SWRC) استفاده می‌شود. همچنین، نشانگرهایی را که با استفاده از توابع انتقالی تخمین زده شده‌اند، نشان می‌دهد (بر اساس گزارش European Union، ۲۰۱۴).....	۲۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ - خدمات زیست‌بوم و کارکردهای خاک (بر اساس MEA، ۲۰۰۵).....	۶
شکل ۱-۲ - پیشرفت در دانش خاک از قبل از ۱۸۸۰ تا زمان حال (بر اساس Bockheim و همکاران، ۲۰۱۵).....	۸
شکل ۱-۳ - تأثیر تهدیدات خاک بر روی کارکردهای خاک (بر اساس FAO و ITPS، ۲۰۱۵).....	۹
شکل ۱-۲ - سنگ‌های هوازده.....	۲۳
شکل ۲-۲ - فرسایش بادی a: صحرای راجستان و b: ساحل دریای خلیج بنگال.....	۳۱
شکل ۲-۳ - فرسایش پاشمانی در اثر ضربه قطرات باران.....	۳۳
شکل ۲-۴ - فرسایش ورقه‌ای.....	۳۳
شکل ۲-۵ - فرسایش‌های کنار رودخانه‌ای.....	۳۳
شکل ۲-۶ - انتقال رسوب از خشکی به دریا از طریق رودخانه، a: نمای هوایی از سامانه رودخانه‌ای متصل به دریا با بار رسوب. b: رودخانه متصل به دریا با بار رسوب.....	۴۰
شکل ۳-۱ - برآورد شاخص سلامت خاک شامل محرک‌های تغییرات اقلیم، اثرات پیش‌بینی شده تغییرات اقلیم و مدیریت زمین، تولید مواد غذایی، فرایندهای خاک و شاخص	

های سلامت خاک با شاخص مکانی خاص سلامت خاک (بر اساس Allen و همکاران، ۲۰۱۱)	۵۹
شکل ۴-۱- رسوب گذاری بستر رودخانه	۸۸
شکل ۴-۲- محصول پوششی نخود سیاه	۸۸
شکل ۵-۱- پاشش نمک به وسیله باد از سطح آب و امواج دریا به هوا در نواحی ساحلی	۱۰۵
شکل ۵-۲- رسوب نمک در سطح خاک، a: یک منطقه مرطوب ساحلی در بنگال غربی، هند و b: منطقه خشک در راجستان، هند	۱۰۶
شکل ۵-۳- خاک ورزی خاک های خیس و باتلاقی	۱۰۹
شکل ۵-۴- لایه های شن در نزدیکی سطح باعث عمق ضعیف ریشه زایی می شود.	۱۰۹
شکل ۶-۱- سه فاز خاک: خاک (S)، آب (W) و هوا (A) و رابطه جرم (M) و حجم (V) آن ها	۱۱۸
شکل ۶-۲- سله یا اندوده سطحی خاک	۱۱۹
شکل ۶-۳- استفاده از کود آلی در گودال اطراف درخت در زیر سطح خاک و سپس پوشش داده شده توسط خاک برای حفظ رطوبت خاک پس از بارندگی	۱۲۱
شکل ۶-۴- کاربرد مالچ پاشی در کشت سبزیجات در یک منطقه دیم	۱۲۱
شکل ۶-۵- کود سبز: جوانه زنی گیاه ماش سیاه زیر درختان گلایی	۱۲۳
شکل ۶-۶- کاشت مخلوط: a: کشت مخلوط، b: کاشت مخلوط: موز با کلم، c: مزارع مرتعی، d: کاشت درخت در مزارع محصولات، e: کشت کنجد با درختان جوان کادام، f: کاشت درختان در مرزهای مزارع برنج	۱۲۴
شکل ۶-۷- شخم نواری: شخم زدن در سراسر شیب	۱۲۵
شکل ۶-۸- کشت نواری: خردل (مقاوم در برابر فرسایش) و گل کلم (غیرمقاوم در برابر فرسایش)	۱۲۶

- شکل ۶-۹- استخری در مزرعه جهت جمع آوری آب باران و کاربردهای چند منظوره
آن ۱۲۷
- شکل ۷-۱- اجزای ماده آلی خاک (SOM) (بر اساس Baldock و Broos، ۲۰۱۲) ۱۳۶
- شکل ۷-۲- ترکیب خاک (بر اساس Buckman و Brady، ۱۹۷۴؛ Kalev و Toor، ۲۰۱۸؛
USDA NRCS، ۲۰۲۲): a: خاک، b: خاک و ماده آلی خاک ۱۴۳
- شکل ۷-۳- ماده آلی خاک (SOM) در چرخه اکولوژیکی خاک که شامل کارکردهای
مختلف خاک است (بر اساس Stevenson، ۱۹۶۴) ۱۴۴
- شکل ۷-۴- واکنش Maillard یا قهوه‌ای شدن ۱۴۵

فصل ۱

سخن ابتدایی: حفاظت خاک و آب برای بهبود سلامت خاک

چکیده

سلامت خاک بیانگر توانایی خاک برای حفظ و ادامه کارکردهای هشت‌گانه آن است. این امر تنها با غلبه بر ۱۰ تهدید موجود علیه خاک و با هدف دستیابی به تولید پایدار غذا در آینده (از طریق اجرای سیاست‌های منطقی بر پایه علم حفاظت خاک و آب) ممکن خواهد بود. در این زمینه، باید با آگاهی بخشی به سیاست‌گذاران و مدیران در حوزه آب و خاک، از تکرار پروژه‌های بزرگ و ناموفق حفاظت در این حوزه جلوگیری کرد. همچنین، باید فواید استفاده از ایستگاه‌های تحقیقاتی در مزارع، برای اجرای اقدامات حفاظتی در مقیاس کوچک، برای آنها به‌روشنی بیان شود.

کلمات کلیدی: آب، اقلیم، تولید غذا، سلامت خاک، کشاورزی، ماده آلی خاک، هدف توسعه پایدار

کلمات اختصاری

CEC	کمیسیون جوامع اروپایی
FAO	سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد
GIS	سامانه اطلاعات جغرافیایی
ITPS	پنل فنی بین دولتی در مورد خاک
MEA	ارزیابی زیست‌بوم هزاره
SOM	مواد آلی خاک
SDG	هدف توسعه پایدار
SSM	مدیریت پایدار خاک

UN	سازمان ملل متحد
UNCCD	کنوانسیون سازمان ملل متحد برای مبارزه با بیابان‌زایی
WWC	شورای جهانی آب

۱-۱- مقدمه

امروزه حفاظت خاک و آب و سلامت خاک به دلیل آلودگی‌های محیط‌زیستی روزافزون و تأثیرات منفی آن‌ها بر سلامت انسان، به‌طور جدایی‌ناپذیری با هم مرتبط هستند. به‌طور سنتی، خاک فقط به‌عنوان محل تولید مواد غذایی و مکان دفع زباله‌ها در نظر گرفته می‌شود.

به‌دلیل بحران‌های محیط‌زیستی متعدد که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند، جلوگیری از سوء استفاده‌های رایج از خاک در شرایط کنونی ضروری است. وضعیت بحرانی کنونی در زمینه محیط‌زیست، نیازمند توجه ویژه برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار (SDG)، از جمله تضمین پایان دادن به گرسنگی (SDG 2) و فراهم کردن دسترسی به آب سالم و بهداشت برای همه (SDG 6) است (UN، ۲۰۲۱). برای بهبود سلامت انسان و رسیدن به اهداف امنیت غذایی (SDG 2) و تأمین آب در مناطق روستایی (SDG 6)، که به‌وسیله خاک و ذخیره‌سازی آب باران فراهم می‌شود، باید به این دو معیار توجه کرد.

استفاده نادرست یا سوء استفاده از منابع زمین بر کیفیت خاک و آب تأثیر می‌گذارد و در نتیجه بر سلامت ما نیز اثر می‌گذارد. محصولات غذایی که در خاک آلوده رشد می‌کنند یا با آب آلوده آبیاری می‌شوند، با تجمع آلاینده‌ها در محصولات کشاورزی، غذای آلوده تولید می‌کنند. منابع خاک و آب برای تولید محصولات کشاورزی، تأمین آب آشامیدنی سالم و آب موردنیاز برای سایر اهداف بهداشتی ضروری هستند. با این حال، ممکن است عوامل متعددی برای آلودگی این منابع ارزشمند وجود داشته باشد.

برای استفاده بهینه از این دو منبع طبیعی جدایی‌ناپذیر و حفظ کمیت و کیفیت آن‌ها، نیاز به اقدامات مختلفی در زمینه حفاظت خاک و آب وجود دارد. این اقدامات برای کنترل خسارات طبیعی یا انسانی و حفظ سلامت خاک ضروری هستند. به این ترتیب، حفظ خاک و آب با سلامت خاک در بحران‌های محیط‌زیستی امروزی مترادف شده است. هیچ چیز، حتی تغییرات محیط‌زیستی نتوانسته است، دیدگاهی که خاک را تنها برای تولید مواد غذایی در نظر می‌گیرد، تغییر دهد.

با این حال، در دو دهه گذشته روش‌های نوآورانه‌ای برای پیوند دادن خاک با مسائل اجتماعی مانند امنیت غذایی و مسائل محیط‌زیستی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و فرسایش خاک، مطرح شده است. همچنین، ارتباط خاک با رفاه کلی انسان مورد توجه قرار گرفته و در گزارش وضعیت منابع خاک جهان (FAO و ITPS، ۲۰۱۵) به رسمیت شناخته شده است.

بدیهی است که مانند پیوند گوشت و خون، خاک و آب به عنوان یک واحد یکپارچه در سامانه طبیعی شناخته می‌شود؛ بنابراین کارکردهای خاک در زیست‌بوم، نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ بین خاک و آب در این سامانه هستند. تاکنون هفت کارکرد اصلی برای خاک شناسایی شده است:

- ۱- تولید زیست‌توده، شامل کشاورزی و جنگل‌داری
- ۲- ذخیره‌سازی، تصفیه و تغییر شکل مواد غذایی، مواد مختلف و آب
- ۳- حفظ تنوع زیستی، شامل زیستگاه‌ها، گونه‌ها و ژن‌ها
- ۴- فراهم کردن محیط فیزیکی و فضای مناسب برای فعالیت کشاورزی و فعالیت‌های انسانی دیگر
- ۵- منبعی برای مواد خام
- ۶- ایفای نقش به عنوان مخزن کربن
- ۷- حفظ و نگهداری میراث زمین‌شناسی و باستان‌شناسی

دستورالعمل پیشنهادی برای خاک که توسط اتحادیه اروپا ارائه شده است (CEC)، (۲۰۰۶)، اعلام می‌کند که کارکردهای خاک به دلیل مداخلات انسانی آسیب‌پذیر شده‌اند. برای حفاظت و استفاده پایدار از زیست‌بوم، از روش ارزیابی زیست‌بوم هزاره سازمان ملل (MEA، ۲۰۰۵) می‌توان استفاده کرد. این ارزیابی برای بررسی پیامدهای تغییرات زیست‌بوم بر رفاه انسان، بر اساس خدمات زیست‌بوم انجام می‌شود (Costanza و همکاران، ۱۹۹۷؛ Daily و همکاران، ۱۹۹۷). این ارزیابی به چهار دسته تقسیم می‌شود: (۱) پشتیبانی، (۲) تنظیم‌کنندگی، (۳) تأمین، و (۴) خدمات کشت.

با در نظر گرفتن خاک به عنوان محیط اصلی تولید غذا، خدمات عمده زیست‌بومی خاک شامل موارد زیر است:

(I) خدمات پشتیبانی:

۱- تولید اولیه: شامل کارکردهای خاک به عنوان محیطی برای جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه و تأمین مواد غذایی و آب برای محصولات.

۲- چرخه عناصر غذایی: شامل تبدیل مواد آلی توسط ارگانیسم‌های خاک و حفظ و انتشار مواد غذایی در سطح ذرات خاک.

(II) خدمات تنظیمی خاک در زیست‌بوم:

۱- تنظیم کیفیت آب: از طریق تصفیه و بافر کردن مواد در آب خاک و تبدیل آلاینده‌ها.

۲- تنظیم تأمین آب: از طریق کنترل نفوذ آب به خاک و زهکشی آب اضافی به عنوان آب زیرزمینی یا رواناب سطحی.

۳- تنظیم آب و هوا: با کنترل انتشار گازهای دی اکسید کربن، اکسید نیتروژن و متان از خاک.

۴- تنظیم و کنترل فرسایش: با کمک کارکردهای خاک برای حفظ و نگهداری خاک در سطح زمین.

(III) خدمات تأمین کنندگی خاک به تولید غذا مربوط می شود و شامل دو کارکرد زیر است:

۱- تأمین غذا: خاک با فراهم کردن آب، مواد غذایی و حمایت فیزیکی برای رشد گیاهان، به تأمین غذای انسان و حیوان کمک می کند.

۲- تأمین آب: خاک نقش مهمی در حفظ و تصفیه آب دارد.

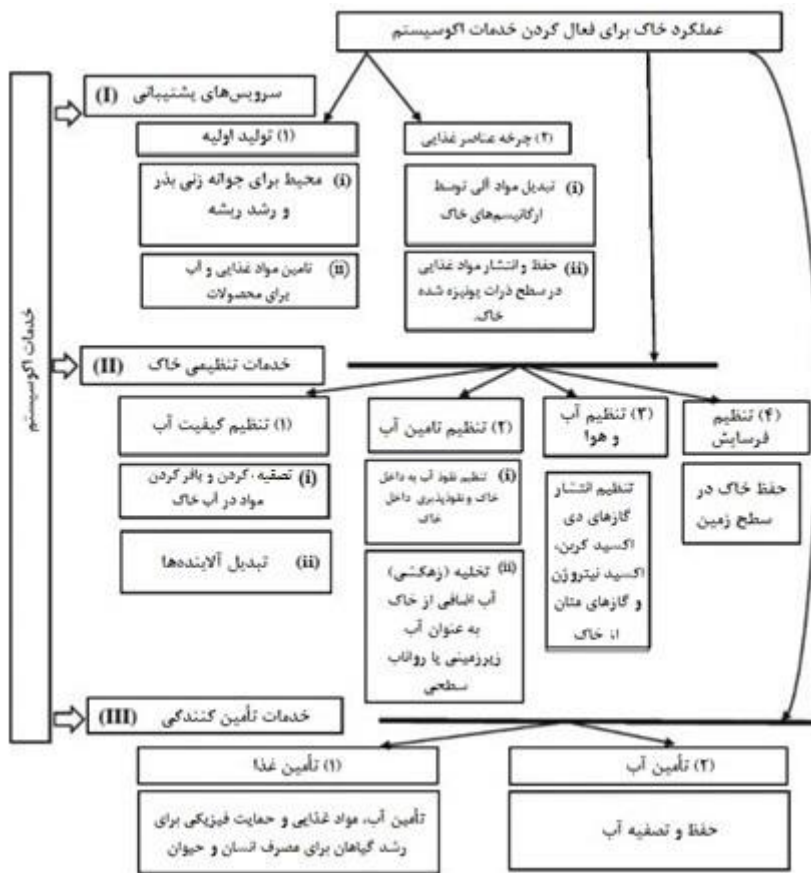
علاوه بر این، خدمات زیست بومی تشکیل خاک به بخش پیدایش خاک مربوط است و توسط چهار کارکرد زیر پشتیبانی می شود:

۱- هوازدگی مواد معدنی اولیه و آزادسازی مواد غذایی

۲- تبدیل و تجمع مواد آلی

۳- ایجاد ساختمان خاک (مانند خاکدانه ها و افق ها) برای تسهیل جریان آب و گازها و رشد ریشه

۴- ایجاد سطح باردار در ذرات خاک برای حفظ و تبادل یون ها (شکل ۱-۱)



شکل ۱-۱- خدمات زیست‌بوم و کارکردهای خاک (بر اساس MEA، ۲۰۰۵)

Bockheim و همکاران، تغییرات و تحولات دانش خاک را از قبل از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۵ به هفت دوره زمانی تقسیم کردند. این تقسیم‌بندی بر اساس ارزیابی روش‌های مختلف مدیریت خاک انجام شده است. این دوره‌ها با تمرکز بر حفاظت خاک در سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۴۰ آغاز می‌شوند. در ادامه، روش‌های مدیریت پایدار خاک بر اساس ارزیابی‌های علمی کارکرد خاک، در دوره‌های بعدی به کار گرفته شده‌اند (Bockheim و همکاران، ۲۰۱۵).

بعد از سال ۲۰۱۵ و با افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی، مشخص شد که سامانه‌های کشاورزی باید به‌طور مداوم با تغییرات اقلیمی، خشکسالی و سیل سازگار شوند. این تغییرات از طریق به‌روزرسانی مدیریت کشت و کاربری اراضی انجام می‌شود (Ahuja و همکاران، ۲۰۱۹). برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سنجش از دور، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و هوش مصنوعی است. به این ترتیب، عصر حاضر را می‌توان دوره دیجیتال و مدل‌سازی سامانه‌های بیوفیزیکی نامید (شکل ۱-۲).

در شرایط کنونی تغییرات اقلیمی، همچنان بهترین روش برای مدیریت یکپارچه خاک و آب، مدیریت در مقیاس کوچک خواهد بود. با توجه به به‌روزرسانی توافقات قبلی و بیانیه اخیر کمیسیون مشورتی پارلمان اروپا، کمیته اقتصادی و اجتماعی، و کمیته مناطق اروپا (CEC، ۲۰۰۶) و همچنین تأثیر تغییرات اقلیمی بر کارکردهای خاک، کمیته‌ها و کمیسیون‌های بررسی وضعیت جهانی منابع خاک (FAO و ITPS، ۲۰۱۵)، ده تهدید اصلی برای خاک را شناسایی کرده‌اند:

۱. اسیدی شدن خاک
۲. شور شدن خاک
۳. از دست دادن تنوع زیستی خاک
۴. عدم تعادل مواد غذایی
۵. فرسایش خاک
۶. کاهش کربن آلی خاک
۷. آلودگی خاک
۸. سیمانی شدن (گسترش فضاها، ساخت و ساز شهری و آسفالت و سیمانی شدن سطح) و سله بستن خاک سطحی
۹. متراکم شدن خاک
۱۰. آب‌گرفتگی و غرقاب شدن

دوره	پیشرفت مفاهیم و دانش خاک
اکنون - ۱۹۹۰	فرایندهای خاک - افزایش درک مدل های جهانی خاک - اصلاح سیستم های طبقه بندی خاک جهانی - اصلاح بیشتر آمار و آماری در کامپیوتری توسعه سیستم های اطلاعات خاک
۱۹۶۰ - ۱۹۹۰	اصلاح سیستم های طبقه بندی خاک جهانی شناسایی مفهوم بدون توسعه مفاهیم مدل های اولیه خاک و الگوهای پوشش خاک شناخت هم تکاملی خاک و شکل زمین
۱۹۴۰ - ۱۹۶۰	مشخص شدن عوامل تشکیل خاک و پیدایش خاک توسعه سیستم های طبقه بندی خاک جهانی تشدید نقشه برداری خاک
۱۹۰۰ - ۱۹۴۰	پذیرش جهانی مفاهیم: الف) خاک به عنوان یک جسم طبیعی. ب) عوامل تشکیل دهنده خاک توسعه اولین طبقه بندی خاک منطقه ای آغاز شدن شناسایی خاک شناسایی فرایندهای تشکیل دهنده خاک
۱۸۸۰ - ۱۹۰۰	ظاهر پدولوژی بنیادی: خاک به عنوان یک جسم طبیعی القای پروتایل های خاک عوامل تشکیل دهنده خاک ایده های اولیه جغرافیای خاک
قبل از ۱۸۸۰	خاک: محیطی برای رشد گیاه لایه سنگی هوازده

شکل ۱-۲- پیشرفت در دانش خاک از قبل از ۱۸۸۰ تا زمان حال (بر اساس Bockheim و

همکاران، ۲۰۱۵)

ده تهدید ذکر شده بر سلامت خاک تأثیر می گذارند. سلامت خاک با هشت کارکرد

کلیدی برای تولید گیاهان مرتبط است:

۱- تبدیل و تجمع مواد آلی خاک (SOM)

۲- تأمین مواد غذایی

۳- ایجاد سطوح باردار

۴- تغییر شکل آلاینده ها

۵- فراهم کردن محیط مناسب برای تولید بذر و رشد گیاه

۶- تنظیم نفوذ آب

۷- حفظ و تأمین آب

۸- زهکشی آب اضافی

این تهدیدها می‌توانند هر یک از این کارکردها را تحت تأثیر قرار دهند (شکل ۱-۳).

تأثیرات خاک	I تغییر شکل و تجمع مواد آلی خاک	II تأمین مواد مغذی	III ایجاد سطوح بردار	IV تغییر شکل آینده‌ها	V محیط تولید بذر و رشد گیاه	VI تنظیم نفوذ آب	VII حفظ و تأمین آب	VIII زهکشی آب اضافی
۱ آلودگی شدن خاک								
۲ شور شدن خاک								
۳ تنوع زیستی خاک								
۴ عدم تعادل مواد مغذی								
۵ فرسایش خاک								
۶ تلفات کربن آلی خاک								
۷ آلودگی خاک								
۸ گندیده سطحی خاک								
۹ تراکم خاک								
۱۰ غرقاب شدن								

شکل ۱-۳- تأثیر تهدیدات خاک بر روی کارکردهای خاک (بر اساس FAO و ITPS، ۲۰۱۵)

فرسایش خاک یکی از ده تهدید اصلی خاک است و عوامل مهمی مانند از دست دادن کربن آلی، کاهش تنوع زیستی و تخریب خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود که به دلیل فعالیت‌های انسانی، سرعت فرسایش خاک در دهه‌های آینده افزایش یابد. با این حال، شیوه‌های حفاظت از خاک و مدیریت پایدار خاک (SSM) می‌توانند نرخ فرسایش را در مناطق حساس کاهش دهند (Borrelli و همکاران، ۲۰۲۰؛ FAO، ۲۰۱۹a؛ Gharibreza و همکاران، ۲۰۲۰؛ Guerra و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lefèvre و همکاران،

۲۰۲۰؛ Naipal و همکاران، ۲۰۱۸؛ Olson و همکاران، ۲۰۱۶؛ Tsymbarovich و همکاران، ۲۰۲۰).

شناسایی و حل مشکلات نیاز به اجرای یک چارچوب سیاست علمی معتبر دارد. این مسئله در اقدامات حفاظت خاک و آب برای کنترل فرسایش، تخریب خاک و حفظ کیفیت منابع آب و خاک اهمیت زیادی دارد. این موضوع در توافق‌نامه‌ها و برنامه‌های ملی (van Leeuwen و همکاران، ۲۰۱۹؛ Xie و همکاران، ۲۰۱۹)، منطقه‌ای (Turpin و همکاران، ۲۰۱۷)، و بین‌المللی (FAO، ۲۰۱۷) و همچنین در دستورالعمل‌های داوطلبانه برای مدیریت پایدار خاک و مفهوم تخریب زمین متعادل (UNCCD) (Orr و همکاران، ۲۰۱۷؛ UNCCD، ۲۰۱۷) مطرح شده است. با کاهش و احیای خاک‌های فرسایش یافته، پیش‌بینی می‌شود که بتوان به نیمی از اهداف توسعه پایدار (SDG) دست یافت (FAO، ۲۰۱۹b).

بنابراین، برای حفاظت خاک و آب باید از علوم پیشرفته استفاده کرد تا فرسایش خاک با دقت بیشتری پیش‌بینی شود. این کار نیاز به قدرت تفکیک بالا در مقیاس مکانی و زمانی دارد. اجرای سیاست‌هایی که بر اساس علم حفاظت خاک و آب استوارند و همچنین، به اشتراک‌گذاری داده‌های تلفات خاک میان محققان با هدف مشترک (FAO، ۲۰۱۹b)، برای دستیابی به سلامت خاک و تولید مواد غذایی پایدار، ضروری است.

مشخص شده است که طرح‌های آبیاری در مقیاس کوچک، مانند کانال‌های مزرعه و مخازن برای تغذیه سفره‌های زیرزمینی، باید به‌عنوان اولویت دنبال شوند. این طرح‌ها از نظر اقتصادی به صرفه‌تر هستند (Om-kar و همکاران، ۱۹۷۵) و در حوزه‌های آبخیز کوچک بسیار مفیدند. این سامانه‌ها برای مدیریت آب مزرعه در پاکستان، مناسب (Bergsma، ۱۹۸۵) و در هند، اهمیت دارند (Caprihan، ۱۹۷۵)، و همچنین، در حفظ آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر هستند (Limaye، ۱۹۷۵).

کمیسیون ملی کشاورزی هند (۱۹۷۶) پیشنهاد کرده است که ایجاد استخرهای کشاورزی در بنگال غربی می‌تواند، زمین‌های کشاورزی با یک بار کشت در سال زراعی

را به زمین‌هایی با قابلیت سه بار کشت در سال زراعی تبدیل کند (Panda، ۱۹۸۷؛ Panda و De، ۱۹۸۹؛ Panda و همکاران، ۱۹۹۰؛ Saren، ۲۰۱۹).

مطالعه کیفیت آب در مناطقی از بنگال غربی هند نشان داد که استفاده از آب استخرهای کشاورزی برای آبیاری در خاک‌های شور بهتر از سایر منابع آبی است (Dhara، ۱۹۸۶ و Dhara، ۱۹۹۱). این تحقیق نشان داد که سیاست‌های تشویقی برای استفاده از آب استخرهای کوچک کشاورزی در هند مؤثر بوده‌اند (Ray، ۱۹۸۶). ذخیره‌سازی باران و رواناب جمع‌آوری‌شده در مناطق روستایی نیز به‌عنوان یک راه‌حل امیدبخش برای جوامع کوچک در کشورهای در حال توسعه مطرح شده است. این روش در گواتمالا برای تأمین آب آشامیدنی روستایی مناسب شناخته شده است (Salazar، ۱۹۸۳). در آینده، به‌دلیل شرایط مختلف مانند محدودیت منابع یا هزینه‌های بالا، استفاده از سامانه‌های بزرگ و متمرکز برای تأمین آب دشوار خواهد بود. بنابراین، ممکن است نیاز باشد که به دنبال راه‌حل‌های جایگزین و محلی برای تأمین آب رفت (Pacey و Cullis، ۱۹۸۶).

در کشورهای مانند هند، مدیریت بارندگی‌های شدید و کوتاه‌مدت با ساخت محل‌های ذخیره مانند انبارهای کوچک، یک راه‌حل ایده‌آل است. این روش به جلوگیری از توزیع نامنظم بارندگی و به تغذیه مجدد آبخوان‌ها و خاک زیرسطحی از طریق نفوذ آب کمک می‌کند. استخرهای کشاورزی نیز بر ایجاد تأخیر در وقوع سیل و تأمین منبع آب برای آبیاری تکمیلی در بخش‌های مختلف هند مؤثر بوده‌اند (Narayana، ۱۹۹۳). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که روش‌های سنتی و غیرمتمرکز مدیریت آب به دلیل ویژگی‌های هیدرولوژیکی مناطق مختلف، بهتر از مدیریت مدرن متمرکز عمل می‌کنند (Slaheddine، ۱۹۸۶). این تحقیق‌ها پس از تجارب منفی ناشی از پروژه‌های بزرگ برای کنترل سیل، آبیاری و تولید غذا، و همچنین خسارت‌های ویرانگر به زمین، زندگی و معیشت، در قرن گذشته آغاز شده‌اند (Luino و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ghosh، ۲۰۱۴؛ Connell، ۲۰۱۳).

این پروژه‌ها در حفظ خاک و آب به دلیل رسوب‌گذاری‌های شدید و غیرقابل کنترل، شکست خورده‌اند. اکنون کشورها هر سال با سیل‌ها و خشکسالی‌های مکرر مواجه‌اند. هرچند نمی‌توان به‌طور کلی رویکردهای مقیاس کوچک را نادیده گرفت (FAO، ۲۰۱۱)، اما اخیراً توجه به زیرساخت‌های جدید و کشاورزی هوشمند با فناوری و سرمایه بخش خصوصی، همراه با منابع مالی خارجی، افزایش یافته است (Hirji و Davis، ۲۰۰۹). بنابراین، با توجه به تجربیات گذشته، ضروری است که سیاست‌گذاران و مسئولان برای مدیریت منابع آب و خاک بر اساس منطق علمی و سودمندی، آگاه شوند. همچنین باید اقدامات کوچک حفاظت آب و خاک را به‌طور مؤثر اجرا کنند تا سلامت خاک حفظ شده و غذای پایدار برای جمعیت جهانی نه تا ۱۰ میلیارد نفری تأمین شود (FAO، ۲۰۲۱؛ WWC، ۲۰۱۵؛ NREL، ۲۰۲۱).

۱-۲- نتیجه‌گیری کلی

با توجه به مباحث مطرح شده، مشخص می‌شود که حفظ سلامت خاک به معنای تداوم هشت کارکرد اصلی خاک و مقابله با ده تهدید آن است. هدف این است که با استفاده از سیاست‌های منطقی و علم حفاظت خاک و آب، به تولید غذای پایدار در آینده دست یافت. اقدامات حفاظت خاک و آب باید شامل روش‌های مکانیکی، بیولوژیکی، کشت محصول و اقدامات اصلاحی باشد. این اقدامات برای محافظت از خاک در برابر فرسایش و تخریب کیفی ناشی از فشردگی، اسیدیته، شوری، و غرقابی شدن ضروری است. در حالی که آب و باد عوامل اصلی فرسایش خاک هستند، عوامل انسانی مانند جنگل‌زدایی، کشت فشرده، استفاده نادرست از آب آبیاری، سوء مدیریت اراضی زیر کشت، چرای بی‌رویه و شهرنشینی نیز به تخریب خاک کمک می‌کنند.

در این زمینه، استفاده از علم حفاظت خاک و آب برای انجام اقدامات مناسب، توصیه می‌شود. این اقدامات می‌تواند شامل روش‌های مکانیکی، بیولوژیکی و اصلاحی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک یا ترکیبی از آن‌ها باشد. انتخاب این روش‌ها

باید بر اساس ضرورت و پذیرش اجتماعی در مکان‌های خاص انجام شود. آگاهی‌بخشی به سیاست‌گذاران و مسئولان درباره خطرات پروژه‌های بزرگ و نادرست ضروری است تا از تکرار آن‌ها جلوگیری شود. همچنین، بهتر است از منطق علمی برای اجرای اقدامات حفاظت از آب و خاک در مقیاس کوچک استفاده شود. این اقدامات باید به‌عنوان پروژه‌های مستقل علمی طراحی شوند تا سلامت خاک، حفظ آب، پیشگیری از سیل، نجات زمین‌های کشاورزی، تأمین آب آشامیدنی در مناطق روستایی، و آبیاری برای تولید پایدار مواد غذایی تضمین شود.

بنابراین، در فصل‌های آینده باید به مطالعات مربوط به مشکلات خاک و آب و چشم‌اندازها و حفاظت از این دو منبع طبیعی در رابطه با مزارع تک‌محصولی توجه ویژه‌ای شود.

منابع مورد استفاده

1. Ahuja, L. R., Ma, L., Anapalli, S. S. (2019). Biophysical system models advance agricultural research and technology: some examples and further research needs. In: Wendroth O, Lascano RJ, Ma L (eds) Bridging among disciplines by synthesizing soil and plant processes, Chap 1, within Ahuja LR (Series Ed) Advances in agricultural systems modeling, vol 8. ASA, CSSA, SSSA, Madison. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel8.2017.0008>
2. Bergsma, H. M. (1985). Training and the development of curriculum standards in on farm water management: Pakistan, 1984–1985. Department of Curriculum and Instruction, New Mexico State University, Las Cruces, and Department of Curriculum and Instruction, Colorado State University, Ft. Collins.
3. Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hammer, R. D., Tandarich, J. P. (2005). Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*, 124(1–2), 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.004>
4. Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015– 2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
5. Caprihan, S. P. (1975). Past, present and future of irrigation practices in Madhya Pradesh in India. *Water for human needs, Proceeding 2nd world*

- congress on water resources, Indian committee of IWRA, CBIP I, New Delhi, pp 253–263.
6. CEC (2006). Communication from the commission to the council, the European parliament, the European economic and social committee and the committee of the regions. Thematic strategy for soil protection. COM 231 final. Commission of the European communities (CEC), Brussels. Available <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006D00231&from=EN>. Accessed 16 June 2022.
7. Connel, D. (2013). The Tennessee valley authority: catchment planning for social development. Part of an 11-part series titled ‘International water politics’. Global water forum (<https://globalwaterforum.org/>). Available <https://globalwaterforum.org/2013/03/20/international-water-politics-the-tennessee-valley-authority-catchment-planning-for-social-development/>. Accessed 16 June 2022.
8. Costanza, R., d’Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & van den Belt, M. (1997). The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
9. Daily, G. C., Matson, P. A., Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. In: Daily G (ed) *Nature’s services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, DC, pp 113–132.
10. Dhara, P. K., Panda, S., Roy, G. B., Datta, D. K. (1991). Effect of water bodies on the quality of groundwater in coastal areas of South 24 Parganas in West Bengal, India. *Journal of Indian Society of Coastal Agricultural Research*, 9(1/2), 395–396.
11. Dhara, P. K. (1986). Study on the quality of water available from different sources in Sundarban area. Dissertation, West Bengal, India.
12. FAO and ITPS (2015). Status of world’s soil resources (SWSR)—main report. Intergovernmental technical panel on soils (ITPS), and FAO, Rome. Available <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/435200/>. Accessed 16 June 2022.
13. FAO and WWC (2015). Towards a water and food secure future—critical perspective of policy-makers. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, and world water council (WWC), Marseille. Available <http://www.fao.org/3/i4560e/i4560e.pdf>. Accessed 16 June 2022.
14. FAO (2011). The state of the world’s land and water resources for food and agriculture (SOLAW)—managing systems at risk. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, and Earthscan, London. Available <http://www.fao.org/nr/solaw/the-book/en/>. Accessed 16 June 2022.

15. FAO (2017). Voluntary guidelines for sustainable soil management. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. Available <https://www.fao.org/3/bl813e/bl813e.pdf>. Accessed 16 June 2022.
16. FAO (2019a). Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. Available <https://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>. Accessed 16 June 2022.
17. FAO (2019b). Outcome document of the global symposium on soil erosion. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. Available <https://www.fao.org/3/ca5697en/ca5697en.pdf>. Accessed 16 June 2022.
18. FAO (2021). Land and water: sustainable land management. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. Available
19. Gharibreza, M., Zaman, M., Porto, P., Fulajtar, E., Parsaei, L., Eisaei, H. (2020). Assessment of deforestation impact on soil erosion in loess formation using ¹³⁷Cs method (case study: Golestan Province, Iran). *International Journal of Soil and Water Conservation Research*, 8, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.07.006>
20. Ghosh, S. (2014). The impact of the Damodar valley project on the environmental sustainability of the lower Damodar basin in West Bengal, Eastern India. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 7(2), 47–54. Available <http://www.ssrn.com/link/OIDA-Intl-Journal-Sustainable-Dev.html>. Accessed 18 June 2022.
21. Guerra, C. A., Rosa, I. M. D., Valentini, E., Wolf, F., Filipponi, F., Karger, D. N., ... & Eisenhauer, N. (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, 35(4), 823–842. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00984-z>
22. Hirji, R., & Davis, R. (2009). Environmental flows in water resources policies, plans, and projects: findings and recommendations. Environment and development. World Bank, Washington, DC. Available at <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2635>. Accessed 18 June 2022.
23. FAO (n.d.). Sustainable land management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at <https://www.fao.org/land-water/land/sustainable-land-management/en/>. Accessed 16 June 2022.
24. Lefèvre, C., Cruse, R. M., Cunha dos Anjos, L. H., & Calzolari Haregeweyn, C. N. (2020). Guest editorial—soil erosion assessment, tools and data: a special issue from the Global Symposium on soil Erosion 2019. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 333–336. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.004>

25. Limaye, S. D. (1975). Utility of percolation tanks for water conservation in arid and semi-arid regions. In: Water for human needs, Proceedings of the second world congress on water resources, Indian committee of IWRA. CBIP IV, New Delhi, pp 205–208.
26. Luino, F., Tosatti, G., & Bonaria, V. (2014). Dam failures in the 20th century: nearly 1000 avoidable victims in Italy alone. *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 3(1), 19–31.
27. MEA (2005). Ecosystems and human well-being: synthesis. Millennium Ecosystem Assessment (MEA), World Resources Institute, Washington, DC. Island Press, Washington, DC.
28. Naipal, V., Ciais, P., Wang, Y., Lauerwald, R., Guenet, B., & Oost, K. V. (2018). Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850–2005. *Biogeosciences*, 15, 4459–4480. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4459-2018>
29. Narayana, V. V. D. (1993). Water harvesting, recycling and estimation of runoff. In: Narayana VVD (ed) Soil and water conservation research in India, Chap. 8. ICAR, New Delhi, pp 111–151.
30. National Commission on Agriculture (1976). Rainfall and cropping patterns, vol XVI. Ministry of Agriculture and Irrigation, West Bengal, Govt. of India, New Delhi.
31. NREL (2021). Food security. Natural Resources Ecology Lab (NREL), Fort Collins, Colorado. Available at <https://www.nrel.colostate.edu/research/food-security/>. Accessed 18 June 2022.
32. Olson, K. R., Al-Kaisi, M., Lal, R., & Cihacek, L. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(3), 61A-67A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.61A>
33. Om-kar et al (1975). Production costs in irrigated agriculture in the lower Mekong Basin. In: Water for human needs, Proceedings of the second world congress on water resources, Indian Committee of IWRA. CBIP I, New Delhi, pp 265–278.
34. Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., ... & Welton, S. (2017). Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A report of the science-policy interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn.
35. Pacey, A., & Cullis, A. (1986). Rainwater harvesting: the collection of rainfall and runoff in rural areas. Intermediate Technology Publications, London.
36. Panda, S., Roy, G. B., & Ghosh, R. K. (1990). Detection of agroclimatic feasibility for transforming an apparently water deficit monocropped area to a yearlong cultivable tract in Contai, Midnapore, West Bengal. *Indian*

- Journal of Landscape Systems & Ecological Studies, 13(2), 174–175.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14316.41600>
37. Panda, S., & De, P. (1989). Hydrological balance approach for planning irrigation in coastal areas of Contai, Midnapore, West Bengal. In: Proceedings of all India seminar on “Role of hydrology in efficient management of irrigation system”, organized by Indian Association of Hydrologists, West Bengal Regional Centre. At the Auditorium, Birla Industrial and Technological Museum, 19 A, Calcutta 700019, West Bengal, India, 19–20 May (1989).
 38. Panda, S. (1987). Water management planning: a case study in a coastal mauza (Contai-III, Dist-Midnapore, West Bengal). Dissertation, M.Sc. (Agriculture) in soil and water conservation thesis, Department of Agricultural Engineering, BCKV, West Bengal, India.
 39. Ray, D. (1986). Some agricultural policy effects of encouraging water harvesting in India. *Agricultural Administration*, 21(4), 235–248.
[https://doi.org/10.1016/0309-586X\(86\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0309-586X(86)90041-5)
 40. Salazar, L. J. (1983). Water management on small farm: a training manual for farmers in hill area. Water Management Synthesis Project no. 88, University Services Centre, Colorado State University, Fort Collins.
 41. Saren, S. (2019). Mouza wise water management planning in red and laterite zone of West Bengal. Dissertation, M.Sc. (Agriculture) in soil and water conservation thesis, Bidhan Chandra Krishi Viswavidyalaya, West Bengal, India.
 42. Slaheddine, E. A. (1986). Traditional versus modern irrigation methods in Tunisia. In: Goldsmith E, Hildyard N (eds) *The social and environmental effects of large dams*, vol 2. Case studies. Wadebridge Ecological Centre, Camel-Ford Cornwall.
 43. Tsymbarovich, P., Kust, G., Kumani, M., Golosov, V., Andreeva, O. (2020). Soil erosion: an important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 418–429.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
 44. Turpin, N., ten Berge, H., Grignani, C., Guzman, G., ... & Baumgarten, A. (2017). An assessment of policies affecting sustainable soil management in Europe and selected member states. *Land Use Policy*, 66, 241–249.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.001>
 45. UN. (2021). The sustainable development goals report. The Sustainable Development Goals website of the United Nations, Department of Economic and Social Affairs Statistics Division, The United Nations, New York. Available at <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/>. Accessed 18 June 2022.

46. UNCCD. (2017). Land degradation neutrality transformative action—tapping opportunities. Global Mechanism of the UNCCD Platz der Vereinten Nationen, Bonn. Available at https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-10/171006_LDN_TP_web.pdf. Accessed 18 June 2022.
47. van Leeuwen, C. C., Cammeraat, E. L., de Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2019). The evolution of soil conservation policies targeting land abandonment and soil erosion in Spain: a review. *Land Use Policy*, 83, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.018>
48. Xie, Y., Lin, H., Ye, Y., & Ren, X. (2019). Changes in soil erosion in cropland in northeastern China over the past 300 years. *Catena*, 176, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.026>

فصل ۲

ویژگی‌های پاسخگوی تلفات خاک

چکیده

ساختمان خاک بر حفظ و جریان آب، مواد معدنی، گازها و پراکندگی موجودات زنده در خاک تأثیر می‌گذارد. پایداری خاکدانه‌ها، نقش مهمی در میزان تلفات خاک دارد. تلفات خاک یک پدیده طبیعی است که در انواع اراضی رخ می‌دهد و تحت تأثیر نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی بین ذرات خاک، آب، مواد آلی و دیگر عوامل بیولوژیکی قرار دارد. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی نادرست و بهره‌برداری ناصحیح از خاک، تلفات خاک را افزایش می‌دهد. درک فرسایش خاک و ویژگی‌های آن، برای شناسایی مناطق با فرسایش‌پذیری مختلف و کاهش تلفات خاک از مزارع کوچک، کمک‌کننده خواهد بود و به دستیابی به اهداف توسعه پایدار و امنیت غذایی کمک می‌کند.

کلمات کلیدی: آب، تلفات خاک، فرسایش‌پذیری خاک، کربن آلی خاک، ماده آلی خاک، نسبت پراکندگی، هدف توسعه پایدار

کلمات اختصاری

تراکم خاکدانه	AD
شاخص خاکدانه	Agg
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃
مقدار خاکدانه بیش از ۲۰۰ میلی‌متر	Ag
حداکثر مقدار پراکنده شده از جزء ۲۰-۰ میلی‌متری به‌ست	(A+ LF) _{Max}
آمده پس از سه مرتبه تیمار نمونه اولیه خاک	
توزیع اندازه خاکدانه خشک	ASD

ظرفیت تبادل کاتیونی	CEC
نسبت بالای پراکندگی رس	CDR
غلظت نهایی از ماده تثبیت کننده (کمپلکس های آلی-معدنی یا جزء هیومیک)	C _i
غلظت اصلی ماده تثبیت کننده (کمپلکس های آلی-معدنی یا جزء هیومیک)	C _o
درصد رس	Cl
پایداری خاکدانه خشک	DAS
نسبت پراکندگی	DR
محدوده اندازه ذرات	D _r
شاخص فرسایش	EI
سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد	FAO
اکسید آهن (III)	Fe ₂ O ₃
آهن قابل استخراج دیتیونیت	Fed
سامانه اطلاعات جغرافیایی	GIS
شاخص ایجاد سله	I _c
شاخص فرسایش پذیری	I _e
شاخص مقاومت	I _r
شاخص ناپایداری	I _s
شاخص پایداری ساختمان	I _{ss}
فرسایش پذیری خاک	K
انتقال آب در خاک	k
نرخ ثابت	k ₁
تخریب زمین متعادل	LDN

باروری اولیه خالص	NPP
سز کوئی اکسید	R_2O_3
معادله جهانی تجدیدنظرشده فرسایش خاک	RUSLE
درصد سیلت درشت	S_c
درصد سیلت ریز	S_f
درصد شن	S
درصد سیلت	si
مقدار بحرانی ماده آلی خاک	S_t
مقدار شن‌های معدنی درشت (بیش از ۲۰۰ میکرومتر)	SG
اکسید سیلیسیوم	SiO_2
مدل ارزیابی خاک و آب	SWAT
فرسایش خاک	SE
کربن آلی خاک	SOC
ماده آلی خاک	SOM
هدف توسعه پایدار	SDG
زمان	T_i
کنوانسیون مبارزه با بیابان‌زایی سازمان ملل متحد	UNCCD
یونسکو، سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی سازمان ملل متحد	UNESCO
سازمان ملل متحد	UN
وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا	USDA
معادله جهانی فرسایش خاک	USLE
میزان رطوبت خاک	W
رس قابل پخش در آب	WDC
جرم مخصوص ظاهری خاک	ρ_B

۲-۱- مقدمه

تلفات خاک در تمام انواع تشکیلات زمین‌شناسی رخ می‌دهد و فرسایش با سست شدن توده خاک توسط عوامل فرسایشی مانند آب و باد آغاز می‌شود. این فرایند تحت تأثیر عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و انسانی است که نقش مهمی در هوازدهی سنگ‌ها و تشکیل خاک دارند (شکل ۱-۲). توده خاک یکپارچه، یا ماتریس خاک، زمانی شکل می‌گیرد که ذرات خاک به وسیله عوامل فیزیکی و بیولوژیکی مختلف به هم فشرده می‌شوند. ماتریس خاک ناشی از اتصال ذرات توسط نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی بین مواد معدنی خاک و مواد غیرخاکی است.

ذرات کلئیدی خاک به دلیل ویژگی‌های الکتریکی خود به هم متصل می‌شوند. این ذرات بسیار ریز، که در اندازه ذرات موجود در فاز پراکندگی یک سامانه کلئیدی هستند، با اتصال به یکدیگر و همچنین به ذرات دیگر خاک و مواد معدنی غیرخاکی، در تشکیل ماتریس خاک نقش دارند. جاذبه‌های بین خاک و آب، خاک و مواد آلی، به عنوان نیروهای دگرچسبی، ذرات خاک را به هم پیوند می‌دهند. رطوبت و ترشحات بیولوژیکی نیز مانند صمغ عمل کرده و به اتصال ذرات خاک و سایر مواد در ماتریس خاک کمک می‌کنند. عواملی مانند رطوبت، گرانش (مانند وزن ماتریکس خاک)، هیدرولوژیکی (مانند تشکیل یخ و نفوذ آب در خاک) و عوامل بیولوژیکی (مانند تجزیه مواد آلی و ترشحات ریشه‌ها) نیز به اتصال ذرات خاک از طریق نیروهای چسبنده کمک می‌کنند.

ترکیب این نیروها باعث پیوند فیزیکی ریشه گیاه با توده‌های خاک می‌شود. ضعف در نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی که درون خاک عمل می‌کنند، موجب سست شدن ذرات و در نهایت تلفات خاک می‌شوند. بنابراین، نیروهای فیزیکی آب، باد و عوامل انسانی از عوامل اصلی تلفات خاک هستند.

با تحقیقات گسترده درباره فرسایش‌پذیری خاک، مشخص شده است که برخی خاک‌ها در شرایط یکسان بیشتر از دیگر خاک‌ها فرسایش پیدا می‌کنند. این یافته‌ها نشان

داده‌اند که باید به دنبال یک اصل اساسی بود که تفاوت تلفات خاک بین انواع مختلف خاک را توضیح دهد.

با مرور تحقیقات Middleton و همکاران (Middleton و همکاران، ۱۹۳۲، ۱۹۳۴؛ Middleton، ۱۹۳۰) و مطالعات جامع آن‌ها درباره ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک که بر فرسایش تأثیر می‌گذارند، مشخص شد که Middleton نسبت رس را به‌عنوان بهترین معیار برای سنجش فرسایش خاک پیشنهاد کرده است (Bouyoucos، ۱۹۳۵). نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که ساختمان خاک بر حفظ و جریان آب، املاح، گازها و توزیع موجودات زنده در خاک تأثیر می‌گذارد. با این حال، تفاوت در ساختمان خاک‌های مختلف را نمی‌توان به‌سادگی با بررسی خاکدانه‌ها توضیح داد (Young و همکاران، ۲۰۰۱) و این مسئله هنوز به‌طور کامل حل نشده است.



شکل ۱-۲- سنگ‌های هوازده

مدل‌های تجربی مختلفی مانند مدل USLE (معادله جهانی فرسایش خاک)، RUSLE (نسخه به‌روز شده USLE) و SWAT (مدل ارزیابی خاک و آب) برای تخمین تلفات خاک وجود دارند. با این حال، مشکلات مربوط به دسترسی و کیفیت داده‌ها، تخمین دقیق تلفات خاک از یک منطقه را دشوار می‌کند (Golosov و همکاران، ۲۰۱۹). در این زمینه، شناخت فرسایش خاک با توجه به ویژگی‌های مختلف خاک و تغییرات فرسایش‌پذیری در شرایط کاربری اراضی مختلف، برای کاهش تلفات خاک در مناطق کوچک بسیار مفید است.

۲-۲- فرسایش‌پذیری خاک و سامانه سه فازی آن

خاک یک سامانه سه فازی است که از جامد، مایع و گاز تشکیل شده و از طریق منافذ موئینه به هم متصل هستند. این منافذ به آب اجازه می‌دهند که تحت تأثیر نیروهای موئینگی در خاک حرکت کند. منافذ ممکن است با مایع یا گاز پر شوند. فاز جامد خاک با آب تماس پیدا کرده و با یک لایه نازک از آن پوشیده می‌شود. گاهی مواد آلی می‌توانند روی ذرات خشک خاک را بپوشانند که باعث می‌شود خاک خاصیت آب‌دوستی محدودی داشته باشد یا به‌طور موقت آب‌گریز شود. در این شرایط که خاک ممکن است موقتی آب‌گریز شود، به این معنی است که به‌خوبی آب را جذب نمی‌کند. در نتیجه، گیاهان نمی‌توانند به‌خوبی در چنین خاکی که آب را به‌سختی جذب می‌کند، رشد کنند.

حساسیت خاک به فرسایش با ویژگی دینامیکی فرسایش‌پذیری خاک تعیین می‌شود. این شاخص فرسایش (EI) از طریق مطالعات آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای به‌دست می‌آید. ویژگی‌هایی از خاک مانند بافت، ساختمان، مقدار مواد آلی، ویژگی‌های هیدرولیکی و قابلیت جذب آب بر فرسایش‌پذیری آن تأثیر می‌گذارند.

۲-۲-۱- فرسایش پذیری خاک و بافت خاک

فرسایش پذیری خاک به معنای آسیب پذیری آن در برابر فرسایش است. این ویژگی به ویژگی‌های فیزیکی خاک و نحوه مدیریت آن در شرایط اقلیمی و محیطی بستگی دارد. فرسایش پذیری خاک با میزان انسجام خاکدانه‌ها و نفوذ آب در خاک مرتبط است. خاک‌های رسی که دانه‌بندی بهتری دارند، چسبندگی بیشتری نسبت به خاک‌های شنی دارند و در نتیجه مقاوم‌تر هستند. اما به دلیل کوچک بودن ذرات رس، پس از جدا شدن از خاک، به راحتی توسط رواناب جابه‌جا می‌شوند.

خاک‌های سیلتی با منشأ لس از جمله فرسایش پذیرترین خاک‌ها هستند. این در حالی است که نفوذ آب در خاک‌های با دانه‌های درشت‌تر و کمتر منسجم، بیشتر است. منافذ درشت (ماکروپورها) می‌توانند آب را سریع‌تر از منافذ ریز عبور دهند. خاک‌های با دانه‌های درشت و انسجام کمتر، ظرفیت بیشتری برای نفوذ آب دارند، هرچند خاک‌های شنی با وجود داشتن منافذ درشت، نسبت به خاک‌های رسی فضای منفذی کمتری دارند. خاک‌های رسی در بارش‌های با شدت کم، به دلیل انسجام بیشتر خاکدانه‌ها، رواناب بیشتری ایجاد می‌کنند (Wuest و همکاران ۲۰۰۶؛ Lal و همکاران، ۲۰۰۶؛ Hudson، ۱۹۸۱).

۲-۲-۲- فرسایش پذیری خاک و ساختمان خاک

ساختمان خاک شامل چارچوب مکانیکی ذرات خاک و مواد بیولوژیکی، به همراه فضاهای خالی درون خاک است. پایداری ساختمان خاک به عواملی مانند جریان هوا، مقدار مواد آلی، رطوبت و نفوذ آب بستگی دارد. خاک‌هایی با ساختمان ضعیف، نفوذپذیری کمی دارند و به راحتی فشرده و فرسایش پذیر می‌شوند. این ویژگی‌ها در مقیاس بزرگ، نقش مهمی در حفظ آب، ذخیره مواد آلی و مقاومت خاک در برابر فرسایش دارند. بررسی‌های توپوگرافی (تصویر سه بعدی) و تئوری فراکتال نشان می‌دهند

که عملیات خاک‌ورزی و حساسیت خاک به فرسایش و جریان آب، به فراوانی، آرایش و پیچیدگی ذرات خاک و منافذ خاک وابسته است (Young و همکاران ۲۰۰۱).

۲-۳- ویژگی‌های خاک پاسخگو فرسایش آبی

برخورد قطرات باران با خاک باعث جداشدن ذرات رس می‌شود و در نتیجه، سطح خاک از هم می‌پاشد. ذرات پراکنده رس که همراه رواناب جدا می‌شوند، لایه‌ای نازک و فشرده به نام اندوده سطحی را تشکیل می‌دهند. این لایه باعث کاهش سرعت نفوذ آب به خاک و افزایش رواناب و در نتیجه فرسایش بیشتر می‌شود. ذرات ریز رس، پس از ته‌نشین شدن، منافذ خاک را مسدود می‌کنند که این نیز سرعت نفوذ آب را کاهش داده و به افزایش رواناب و فرسایش خاک کمک می‌کند.

عوامل مؤثر بر تشکیل اندوده سطحی شامل پایداری خاکدانه‌ها، پوشش گیاهی و مالچ سطح خاک، بافت خاک، مقدار مواد آلی، رطوبت اولیه خاک، تأثیر قطرات باران و انرژی آن و همچنین مدیریت‌های انسانی مثل خاک‌ورزی است. اندوده سطحی پس از خشک شدن به صورت سله‌های خاکی با ضخامت ۰/۱ تا ۵ سانتی‌متر ظاهر می‌شود (Blanco-Lal و Canqui، ۲۰۰۸؛ Ma و همکاران، ۲۰۱۴؛ Lu و همکاران، ۲۰۱۶؛ Gao و همکاران، ۲۰۰۵).

خاکدانه‌ها که به عنوان "ریزساختمان خاک" یا ذرات ثانویه (Baver، ۱۹۳۵) توصیف شده‌اند که از گسیختگی مکانیکی به ذرات ریزتر تبدیل می‌شوند و در اثر وجود مواد خاکدانه‌ساز در خاک تشکیل می‌شوند. این مواد خاکدانه‌ساز شامل ماده آلی، ترکیبات آهن و آلومینیوم هستند. مواد آلی خاک، یکی از عوامل اصلی تشکیل خاکدانه‌هاست، به جز در خاک‌های لاتریتی که اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و اکسید آهن (Fe_2O_3) به‌طور قابل توجهی در تشکیل خاکدانه‌ها نقش دارند.

پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند به ذرات کلئیدی خاک، مواد آلی خاک (SOM) و کاتیون‌های موجود در خاک بستگی داشته باشد. اتحادیه اروپا در ارزیابی خود با عنوان

"خاک و آب در یک محیط در حال تغییر" روابط بین پارامترهای مختلف خاک و شاخص‌های عملکرد انتقال مواد را شناسایی کرده و این روابط را در جدول ۱-۲ ارائه داده است (European Union, ۲۰۱۴).

۲-۳-۱- ویژگی‌های خاک و برآورد فرسایش آبی

بیشتر خاک‌های مستعد فرسایش معمولاً سیلت زیاد و مقدار کمی رس و مواد آلی دارند (Wischmeier و Mannering, ۱۹۶۹). با کاهش شن در خاک، فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد، صرف‌نظر از تغییرات در میزان شن یا رس، درصد سیلت، رس و شن باید همراه با سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شود. شاخص تشکیل خاکدانه نیز به‌عنوان نسبت شن به سیلت بیان شده است (معادله ۱-۲).

جدول ۱-۲- این جدول شامل پارامترهای خاک و پارامتر کلیدی توضیحی است که در منحنی نگهداشت آب خاک (SWRC) استفاده می‌شود. همچنین، نشانگرهایی را که با استفاده از توابع انتقالی تخمین زده شده‌اند، نشان می‌دهد (بر اساس گزارش European Union, ۲۰۱۴).

پارامترهای خاک	پارامتر توضیحی کلیدی	نشانگر به‌دست‌آمده با استفاده از توابع انتقالی
بافت	درصد رس	توزیع دانه‌بندی
	درصد شن	
فشرده‌گی و ساختمان	جرم مخصوص ظاهری	درصد ماده آلی، رس، سیلت، خاک سطحی، خاک زیر
ظرفیت تبادل کاتیونی	درصد ماده آلی	مقدار کربن آلی، نیتروژن کل
	هدایت هیدرولیکی	هدایت هیدرولیکی اشباع

$$Aggregation\ index = \frac{Sand}{Silt} \quad (1-2)$$

Wischmeier و Mannering (۱۹۶۹) دو رابطه ۲-۲ و ۳-۲ را پیشنهاد کردند که ترکیبی از فرسایش‌پذیری خاک (K)، واکنش (R)، درصد شن (s)، رس (c) و سیلت (si)، شاخص خاکدانه سازی ($agg.$) و نسبت رس است.

$$K \propto (0.043 R + \frac{0.62}{OM} + 0.0082s - 0.0062c) si \quad (2-2)$$

و

$$K \propto (1.73 - 0.26 OM - \frac{2.42}{OM} + 0.3agg. - \frac{0.024}{agg.} - 0.0062si) clay \text{ ratio} \quad (3-2)$$

Bouyoucos نسبت رس را به عنوان شاخصی از فرسایش خاک پیشنهاد کرده است، همان طور که در رابطه (۲-۴) نشان داده شده است (Bouyoucos, ۱۹۳۵).

$$Index \text{ of erosiveness or Clay ratio} = \frac{(Sand+Silt)}{Clay} \quad (4-2)$$

نسبت درصد سیلت و رس تعیین شده توسط پراکندگی در آب مقطر به کل سیلت و رس به دست آمده (رابطه ۲-۵) از طریق آنالیز فیزیکی به عنوان نسبت پراکندگی نامیده می شود (Middleton, ۱۹۳۰؛ Lal و Shukla, ۲۰۰۴؛ Singh, ۱۹۸۰).

$$Dispersion \text{ ratio} = \frac{(Dispersed (Silt+Clay))}{Total (Silt+Clay)} \quad (5-2)$$

اکنون (Middleton, ۱۹۳۰):

$$Erosion \text{ ratio} = Dispersion \text{ ratio} / (\frac{Colloid \text{ content}}{Moisture \text{ equivalent}}) \quad (6-2)$$

در اینجا، رطوبت معادل، مقدار رطوبت خاک در زمانی است که خاک تحت یک نیروی گریز از مرکز معادل ۱۰۰۰ گرم قرار می گیرد (Briggs و McLane, ۱۹۰۷؛ Briggs و Shantz, ۱۹۱۲؛ Gupta و Dakshinamurti, ۱۹۶۸؛ Veihmeyer و Hendrickson, ۱۹۳۱).

ثابت شده است که رطوبت معادل، حد روانی پایین، حداکثر ظرفیت نگهداری آب، و میزان کاهش حجم و انقباض خاک به ترکیب فیزیکی و محتوای کلئیدی آن بستگی دارند (Middleton, ۱۹۳۰). برای خاک های مناطق گرمسیری، نسبت پراکندگی (DR) معمولاً بالا است و ممکن است در محدوده ۰/۹۴-۰/۱۳ باشد. خاک هایی با DR بالا، بیشتر فرسایش پذیر هستند و برعکس، خاک های با DR پایین فرسایش پذیری کمتری دارند. مقدار DR برابر ۱۰ به عنوان مرزی بین خاک های فرسایش پذیر و غیر فرسایش پذیر در نظر گرفته می شود. فرسایش پذیری خاک به میزان اکسیدهای سطح، مواد آلی و عوامل

اتصال‌دهنده در توده خاک وابسته است (Glinski و همکاران، ۲۰۱۱؛ Igwe، ۲۰۰۵؛ Lal و Shukla، ۲۰۰۴).

۲-۴- ویژگی‌های خاک پاسخگو فرسایش آبی و بادی

فرسایش خاک را می‌توان به‌عنوان سست شدن خاکدانه‌ها و سپس جدا شدن و جابجایی ذرات خاک توسط عوامل فرساینده مانند آب یا باد تعریف کرد (Flanagan و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی، فرسایش خاک چه به‌وسیله آب یا باد، به ویژگی‌های خاک، جداسازی و انتقال عوامل فرساینده در تعامل با شرایط اقلیمی، وضعیت زمین و روش‌های مدیریتی وابسته است (Cruse و همکاران، ۱۹۹۰). فرسایش‌پذیری خاک به شدت بر حساسیت زمین به فرسایش تأثیر می‌گذارد. مانند فرسایش آبی، مدل‌های تجربی و فیزیکی زیادی برای پیش‌بینی فرسایش بادی توسعه داده شده‌اند، اما همچنان محدودیت در دسترسی و کیفیت داده‌ها وجود دارد. بنابراین، با شناخت ویژگی‌های خاک که در فرسایش بادی موثر هستند، می‌توان برای اجرای روش‌های پیشگیری یا اصلاحی در مدیریت زمین و کاهش فرسایش خاک اقدام کرد.

فرسایش خاک توسط آب و باد، یک مشکل جدی جهانی است. هر سال حدود ۷۵ میلیارد تن خاک سطحی از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان از بین می‌رود (Flanagan و همکاران، ۲۰۱۳؛ Myers، ۱۹۹۳). این در حالی است که تشکیل خاک‌ها به‌طور طبیعی از مواد مادری خود طی هزاران سال، به‌عنوان بخشی از فرایند توسعه خاک انجام می‌گیرد (Flanagan و همکاران، ۲۰۱۳).

سرعت طبیعی تشکیل خاک حدود ۲۵ میلی‌متر در ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ سال است (Bennett، ۱۹۳۹؛ Pimental و همکاران، ۱۹۷۶). با وجود هوادیدگی، آبشویی و خاکورزی، این روند در ۳۰ سال به ۲۵ میلی‌متر تسریع می‌شود. بنابراین، فرسایش خاک نباید بیش از ۱۱/۲۱ تن در هکتار در سال باشد (Hudson، ۱۹۸۱)، هرچند اخیراً نرخ پایدار تلفات خاک حدود یک تن در هکتار در سال گزارش شده است (FAO، ۲۰۰۰).

همچنین گزارش شده که ۱۶ درصد از کل مساحت زمین (۲۱,۹۶۰,۰۰۰ کیلومتر مربع از ۱۳۴,۹۰۷,۰۰۰ کیلومتر مربع) در معرض خطر فرسایش خاک است. بیشترین میزان هدررفت خاک در آسیا، آمریکای جنوبی و آفریقا با میانگین حدود ۳۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال مشاهده شده، در حالی که برای آمریکای شمالی و اروپا این مقدار حدود ۱۷ تن در هکتار در سال است (Flanagan و همکاران، ۲۰۱۳؛ FAO، ۲۰۰۰).

برای درک فرسایش پذیری خاک در برابر باد، مهم ترین عوامل شامل ساختمان خاک، اندازه، شکل و تراکم اجزای فرسایش پذیر و غیرفرسایش پذیر هستند (Chepil و Woodruff، ۱۹۶۳). این عوامل با پایداری خاکدانه های خشک (DAS)، توزیع اندازه خاکدانه های خشک (ASD)، تراکم خاکدانه (AD)، رطوبت اولیه سطح خاک، تشکیل سله و وجود مواد سست روی سطح خاک (Zobeck et al., 2013) اندازه گیری می شوند. خرد شدن خاکدانه ها به ذرات ریزتر، اولین مرحله برای حرکت خاک توسط باد است. این حرکت زمانی شروع می شود که فشار باد از نیروی گرانش بر ذرات سطح خاک بیشتر شود. در نتیجه، ذرات خاک در یک سری حرکت های کوچک به نام "پرش" جابجا می شوند. برخورد این ذرات به ذرات بزرگ تر باعث متلاشی شدن توده ها و کلوخه های خاک می شود.

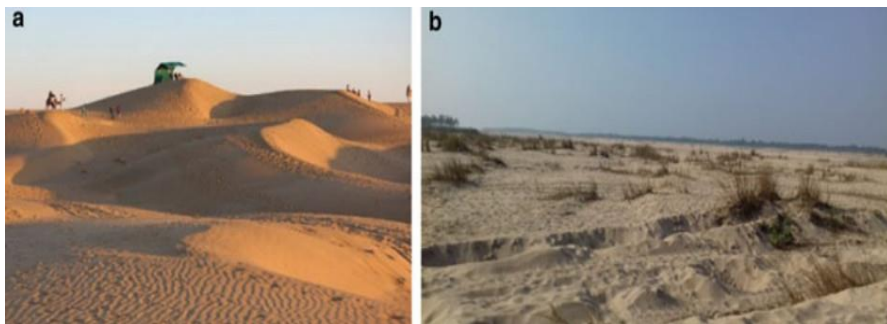
فرسایش بادی خاک تنها زمانی رخ می دهد که ذرات خاک قابلیت جابه جایی از طریق پرش را داشته باشند. معمولاً بیشتر این ذرات به بالای چند فوت از سطح زمین نمی جهند و ۹۰ درصد آنها از یک فوت بالاتر نمی روند. بنابراین، فرسایش بادی یک پدیده سطحی است که با پرش بلند گسترش می یابد. هرچه ذرات خاک بالاتر بجهند، با افزایش تراکم آنها در مسیر باد، انرژی بیشتری به دست می آورند. این فرایند تا زمانی که باد توان ادامه حرکت خود را با افزایش بار ذرات داشته باشد، ادامه پیدا می کند.

بادهای قوی که معمولاً متلاطم هستند، ابتدا باعث ساییدگی خاک از طریق پرش می شوند. کاهش سرعت باد به دلیل حرکت خاک، به طور مستقیم با فرسایش پذیری خاک

مرتبط است. هرچه خاک بیشتر فرسایش پذیر باشد، غلظت ذرات متحرک افزایش یافته و سرعت باد در نزدیکی زمین کاهش می یابد (Chepil و Woodruff، ۱۹۶۳).

۲-۴-۱- نیروهای باد و یا آب، اثرگذار بر ذرات خاک در آستانه حرکت

سیال متحرک مانند باد یا آب، سه نوع نیرو بر روی ذرات خاک اعمال می کند (Chepil و Woodruff، ۱۹۶۳؛ Einstein و El-Samni، ۱۹۴۹؛ Ippen و Verma، ۱۹۵۳): فشار مثبت: این نیرو بر بخشی از ذره که در جهت حرکت سیال قرار دارد، اعمال می شود. فشار مثبت نیرویی است که به سطح مقطع ذره عمود بر جهت سیال وارد می شود و مستقیماً با مجذور سرعت سیال تغییر می کند. این فشار ناشی از برخورد سیال به ذره است و به آن فشار ضربه ای یا سرعتی می گویند که باعث حرکت ذرات خاک می شود. فشار منفی: در سمت مخالف جریان سیال، یعنی در پشت ذره، فشار منفی ایجاد می شود که به آن فشار ویسکوزیته گفته می شود. بزرگی این فشار به ضریب ویسکوزیته، چگالی و سرعت سیال بستگی دارد.



شکل ۲-۲- فرسایش بادی a: صحرای راجستان و b: ساحل دریای خلیج بنگال

فشار منفی در بالای ذره: این فشار که ناشی از اثر برنولی است، به آن فشار استاتیک، ایزوتروپ یا داخلی می گویند. بر اساس قانون برنولی، هر جا که سرعت سیال افزایش یابد، مانند بالای ذره خاک، فشار کاهش می یابد (Chepil و Woodruff، ۱۹۶۳).

فشار ضربه‌ای یا سرعت جریان وارد بر ذرات خاک، نوعی مقاومت به نام مقاومت شکل ایجاد می‌کند. این مقاومت همراه با فشار برشی ناشی از لغزش سیال در نزدیکی سطح ذرات خاک، به عنوان مقاومت اصطکاکی پوسته‌ای شناخته می‌شود. مجموع این دو نیرو به عنوان کشش کل شناخته می‌شود. اختلاف فشار بین سمت بادگیر و پشت ذره باعث حرکت ذره می‌شود. کاهش فشار در بالای ذره نسبت به پایین آن، باعث بلند شدن ذره می‌شود و این فشار از طریق مرکز ثقل عمل می‌کند (Chepil و Woodruff، ۱۹۶۳). با توجه به حرکت ذرات رسوب در آب، هنوز نوسانات فشار متلاطم نزدیک به بستر رودخانه به‌طور قطعی تأیید نشده است. اما احتمالاً فرسایش‌های پاشمانی، ورقه‌ای، شیاری و آب‌کنندی ممکن است به دلیل فشار متلاطم ایجاد شده در انواع فرسایش آبی باشند. این فشار متلاطم ممکن است بر خلاف حرکت ذرات رسوب روی سطح بستر، با فرسایش‌های کنار رودخانه‌ای ارتباط داشته باشد.

به‌طور کلی، فرایند شروع فرسایش خاک توسط باد و آب از نظر تئوری مشابه است، با این تفاوت که در بستر رودخانه می‌توان با استفاده از نیروی کشش مصنوعی، مانند ماشین‌های لایروبی، رسوبات را جابجا کرد. در این شرایط، فرایند فرسایش آبی در نهایت شبیه به فرسایش بادی می‌شود، زمانی که ذرات خاک آماده حرکت هستند (شکل‌های ۲-۲، ۲-۳، ۲-۴ و ۲-۵).

۲-۵- ویژگی‌های خاک مؤثر بر رشد محصول

جهت‌گیری ذرات خاک در ساختمان خاک به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی آن تأثیر می‌گذارد و از طریق توزیع اندازه منافذ در ماتریس خاک، بر رشد گیاهان اثر می‌گذارد. ساختمان خاک به حفظ رابطه کمی و کیفی سه فاز سامانه خاک، یعنی جامد، مایع و گاز، کمک می‌کند. شرایط بهینه این رابطه متقابل، به تبادل مؤثر با محیط و تأمین نیازهای میکروارگانیزم‌های خاک و ریشه گیاه کمک می‌کند.



شکل ۲-۳- فرسایش پاشمانی در اثر ضربه قطرات باران



شکل ۲-۴- فرسایش ورقه‌ای



شکل ۲-۵- فرسایش‌های کنار رودخانه‌ای

در نتیجه، لازم به ذکر است که توزیع اندازه منافذ در تعیین ساختمان خاک مهم است و به پیوند و آرایش خاکدانه‌ها بستگی دارد. از طرف دیگر، توسعه پیوندهای بین‌ذره‌ای برای پایداری خاکدانه‌ها مفید است. در این زمینه توجه به موارد زیر نیز ضروری است: تجمع سیلت و رس، به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک شناخته می‌شود (Middleton, ۱۹۳۰). این شاخص از طریق تحلیل نسبت پراکندگی به‌دست می‌آید؛ به عبارت دیگر، با محاسبه تفاوت بین مجموع سیلت و رس و درصد ذرات معلق در آب بدون پراکندگی تعیین می‌شود. نسبت تشکیل خاکدانه سطحی (Anderson, ۱۹۵۴) نیز در رابطه (۷-۲) توضیح داده شده است.

$$\text{Surface aggregation ratio} = \frac{\text{Total surface area of particles} > 0.05 \text{ mm}}{\text{Aggregated (silt + clay)}} \quad (7-2)$$

شاخص مقاومت، I_r (Chorley, ۱۹۵۹)، همان‌طور که در رابطه نشان داده شده است (۸-۲):

$$I_r = (\rho b X \times Dr) / w \quad (8-2)$$

که در آن، ρb جرم مخصوص ظاهری خاک، D_r محدوده اندازه ذرات و w مقدار رطوبت خاک است.

۱- شاخص فرسایش‌پذیری، I_e (Chorley, ۱۹۵۹)، همان‌طور که در رابطه (۲-۹) نمایش داده شده است:

$$I_e = (I_r \times k)^{-1} \quad (9-2)$$

که در آن، I_r شاخص مقاومت و k نفوذپذیری خاک است.

شاخص پایداری ساختمان، I_{ss} (Kay و همکاران ۱۹۸۸)، بر اساس تغییر در سطح مواد تثبیت‌کننده، همان‌طور که در رابطه (۲-۱۰) نشان داده شده است:

$$I_{ss} = C_i / C_o = (1 - e^{-kI_{Ti}}) \quad (10-2)$$

که در آن، C جزء تثبیت‌کننده (کمپلکس‌های آلی - معدنی یا جزء هیومیک) است که غلظت اصلی (C_0) و نهایی (C_i) را نشان می‌دهد، T_i زمان (سال) و k_1 ثابت سرعت است.

شاخص ناپایداری، I_s ، بر اساس بافت و عوامل سیمانی دخیل در تشکیل خاکدانه‌های خاک‌های استوایی است، همان‌طور که در رابطه (۲-۱۱) نشان داده شده است (Hénin و همکاران، ۱۹۵۸):

$$I_s = \frac{(A+LF)max}{\frac{1}{3}Ag-0.9SG} \quad (2-11)$$

که در آن، $(A + LF)max$ به معنای حداکثر مقدار ذرات با اندازه ۲۰-۰ میلی‌متر است که پس از سه مرحله تیمار نمونه اولیه خاک به‌دست می‌آید. این مراحل شامل: (۱) استفاده از خاک هوا خشک بدون هیچ پیش‌تیماری، (۲) غوطه‌وری در الک، و (۳) سپس غوطه‌وری در بنزن می‌شود.

Ag ، نشان‌دهنده مقدار خاکدانه‌هایی با اندازه بیش از ۲۰۰ میلی‌متر است که پس از تکان دادن (۳۰ چرخش دستی و الک مرطوب) به‌دست می‌آید. این مقدار از سه نمونه خاک پیش‌تیمار شده در مراحل تیمار با هوا، الک و بنزن به‌دست آمده است. SG ، محتوای شن‌های معدنی درشت (بیش از ۲۰۰ میکرومتر) است و $1/3 Ag - 0.9SG$ میانگین خاکدانه‌های پایدار است.

شاخص ایجاد سله، I_c ، بر اساس ترکیب بافت خاک و مقدار مواد آلی خاک، همان‌طور که در رابطه (۲-۱۲) نوشته شده است (Lal و Shukla، ۲۰۰۴):

$$I_c = \frac{1.5 Sf + 0.75 Sc}{CI + (10 \times SOM)} \quad (2-12)$$

که در آن، Sf درصد سیلت ریز، Sc درصد سیلت درشت، CI درصد رس و SOM درصد مقدار آلی خاک است. بدیهی است که I_c رابطه معکوس با رس و مواد آلی خاک و مستقیماً با مقدار سیلت ریز و درشت رابطه دارد.

۲- مقدار بحرانی ماده آلی خاک، St ، که توسط Pieri (۱۹۹۱) پیشنهاد شده است، به‌عنوان سطح بحرانی غلظت مواد آلی خاک برای پایداری ساختمان خاک‌های

گرمسیری تعریف می‌شود. زیرا غلظت مواد آلی نقش عمده‌ای در تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها دارد. (رابطه ۲-۱۳).

$$S_t = \frac{SOM}{Clay+Silt\ content} \quad (۱۳-۲)$$

بر اساس آنالیز ۵۰۰ نمونه خاک از مناطق نیمه خشک غرب آفریقا، Pieri سه حد از S_t را برای توصیف ساختمان خاک پیشنهاد کرد:

S_t کمتر مساوی ۵ درصد، از دست دادن ساختمان خاک و حساسیت بالا به فرسایش،
 S_t بین ۵ تا ۷ درصد، ساختمان ناپایدار و خطر تخریب خاک،
 S_t بیشتر از ۹ درصد، ساختمان خاک پایدار.

۳- نسبت سیلیکا به سزکویی اکسید (Tan و Troth، ۱۹۸۲).

ماهیت کانی‌های رسی موجود در خاکدانه‌ها تأثیر زیادی بر توسعه پیوندهای بین‌ذره‌ای دارد که به پایداری خاکدانه‌های خاک در ابتدا از طریق کاتیون‌ها، مولکول‌های آلی، آب و همچنین بین رس- رس و رس- ذرات درشت خاک، کمک می‌کند.

نسبت سیلیکا به سزکویی اکسید بر اساس نسبت نسبی عوامل سیمانی (سزکویی اکسید یا R_2O_3) با موادی که قرار است سیمان شوند (سیلیکا یا SiO_2) است. بنابراین، این نسبت آشکارا تعیین‌کننده شاخص فرسایش‌پذیری است و ممکن است از کمتر یک، برای خاک‌های غیرفرسایش‌پذیر تا ۹، برای خاک‌های فرسایش‌پذیر متغیر باشد (Biswas و Nath، ۱۹۸۲؛ Lal و Shukla، ۲۰۰۴؛ Tan و Troth، ۱۹۸۲).

کلوئیدهای خاک با محدوده اندازه معمولی ۰/۲ تا ۰/۰۵ میکرون (به اندازه دو میکرون) و ذرات هوموس در اندازه میلی‌میکرون، جزء واکنش‌پذیر خاک هستند و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را کنترل می‌کنند. انواع سزکویی اکسید، تعیین‌کننده پایداری خاکدانه‌ها هستند. ذرات رس در حضور هیدروکسید آلومینیوم بی شکل، بهتر از هیدروکسید آهن بی شکل، تشکیل خاکدانه می‌دهد. خاک رس قابل پخش در آب (WDC) می‌تواند بر فرسایش آبی تأثیر بگذارد.

نسبت بالای پراکندگی رس (CDR) خاک، نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری بالای خاک است و با ($p > 0.05$) آهن قابل استخراج دیتیونیت (Fed)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و ماده آلی خاک (SOM) همبستگی مثبت دارد. خاک هایی با مقدار مشخصی از درصد پراکندگی رس یا DR کمتر از سه، به طور بالقوه فرسایش پذیر هستند اما چنین رویکردی نمی‌تواند پراکندگی ناشی از تغییر در غلظت الکترولیتی یا سایر پیوندهای مناسب خاک را تشخیص دهد.

علاوه بر این، WDC می‌تواند نفوذپذیری و تشکیل سله خاک را کاهش دهد. در خاک‌های آهن دار کشور هند، خاکدانه‌های پایدار در آب نتیجه فعل و انفعالات رس معدنی و اکسید آهن هستند. حفظ آب در ماتریکس خاک در برابر نیروهای خارجی مانند نیروهای گرانشی، میدان‌های گریز از مرکز و گرادیان فشار گاز خارجی، ماهیت اولیه خاک در حفظ رشد گیاه در شرایط دوره‌های کم آبی و تأمین متناوب آب است.

مقدار آب هیگروسکوپی در خاک می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای تعیین درصد رس استفاده شود. این اطلاعات می‌توانند با استفاده از سیگنال‌های ژئوفیزیکی که به ویژگی های خاک پاسخ می‌دهند، شناسایی و تحلیل شوند. شوری خاک، با افزایش تنش اسمزی، می‌تواند میزان آب هیگروسکوپی را تحت تأثیر قرار دهد. به عبارت دیگر، شوری بالا باعث کاهش پتانسیل آب در خاک می‌شود و به این ترتیب، مقدار آب قابل جذب برای گیاهان کاهش می‌یابد (Biswas و Mukherjee، ۱۹۸۷؛ Biswas و Nath، ۱۹۸۲؛ Santos و همکاران، ۲۰۲۲؛ Igwe، ۲۰۰۵؛ Pal و Durge، ۱۹۸۹، ۱۹۹۳؛ Pal و همکاران، ۲۰۰۰؛ Wuddivira و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zhao و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۶- تلفات خاک باعث آسیب پذیری بوم‌سازگان خاک- مسائل اساسی در زمینه

طبیعت و محیط زیست

فرسایش خاک یکی از رایج‌ترین مشکلات تخریب زمین در اراضی کشاورزی، مرتعی و جنگلی است. مفهوم جدید "تخریب زمین متعادل" (LDN) که اخیراً توسعه یافته، نیاز

به ارزیابی دقیق پویایی فرسایش خاک دارد. کنوانسیون سازمان ملل متحد برای مبارزه با بیابانزایی (UNCCD)، تخریب زمین متعادل (LDN) را به عنوان وضعیتی تعریف می کند که در آن مقدار و کیفیت منابع زمینی که برای حفظ کارکردها و خدمات بومسازگان و تقویت امنیت غذایی ضروری است، در طول زمان و مکان ثابت مانده یا افزایش می یابد (UNCCD، ۲۰۱۵).

در سطح جهانی، هدف ۱۵،۳ از اهداف توسعه پایدار (SDG) برای ارزیابی وضعیت تخریب زمین استفاده می شود. این هدف بر شاخص «نسبت زمین های تخریب شده به کل سطح زمین» و سه زیرشاخص آن شامل تغییرات پوشش زمین، بهره وری زمین، و میزان کربن آلی خاک تمرکز دارد. این اصل به نام "اگر یک شاخص از دست برود، همه شاخص ها از دست می روند" شناخته می شود (Akhtar-Schuster و همکاران ۲۰۱۷؛ Tsymbarovich و همکاران ۲۰۲۰؛ UN، ۲۰۲۱).

فرسایش ناشی از بارندگی و فرایندهای مرتبط با آبراهه ها و انتقال رسوبات از سطح زمین به اقیانوس ها از طریق رودخانه ها، بخشی از کارکرد طبیعی سامانه زمین است. فرسایش، به عنوان عامل اصلی شکل گیری سطح امروزی زمین از طریق فرایندهای زمین شناسی مانند فرسایش، رسوب گذاری و کوهزایی عمل می کند. همچنین فرسایش در چرخه های جهانی کربن، نیتروژن، فسفر و دیگر عناصر نقش دارد. فرسایش آبی نقش مهمی در توسعه و حفظ چشم اندازهای طبیعی و زیستگاه ها و بومسازگان های مرتبط دارد. رسوبات ریزدانه به دلیل انتقال آلاینده های مقاوم در محیط زیست و تخریب زیستگاه های آبی، به عنوان آلاینده اصلی جهان شناخته می شوند.

حتی افزایش جزئی در جریان و غلظت رسوبات می تواند باعث کاهش اکسیژن محلول در آب و در نتیجه کاهش موفقیت تخم ریزی ماهی ها و کاهش جمعیت آن ها شود. از طرف دیگر، کاهش رسوب و جریان رودخانه ممکن است تعادل اکولوژیکی برخی زیستگاه ها، مانند دلتاها را بر هم بزند. به همین دلیل، فرسایش و انتقال رسوب نقش مهمی در مدیریت پایدار محیط زیست و زیستگاه های آبی دارند (Golosov و همکاران،

۲۰۱۹؛ Kirwan و Megonigal، ۲۰۱۳؛ Lerman و Meybeck، ۱۹۸۸؛ Ludwig و همکاران، ۱۹۹۶؛ Pinter و Brandon، ۲۰۰۵؛ Tucker و Hancock، ۲۰۱۰).

مشاهدات تجربی Howard (۱۹۴۳) نشان می‌دهد که شبکه‌های غذایی ایجادشده توسط جوامع میکروبی خاک، اساس تغذیه‌ای حیات در اکوسیستم‌های زمینی را فراهم می‌کنند. این شبکه‌ها با بازیافت مواد مغذی، از رشد تولیدکنندگان اولیه حمایت کرده و چرخه‌های طبیعی تولید و تجزیه عناصر را تسهیل می‌کنند. در این فرایند، محصولات جانبی حاصل از تجزیه مواد آلی مرده و پوسیده توسط موجودات سطوح تغذیه‌ای بالاتر، به کمک فرایندهای میکروبی در خاک به عناصر معدنی مانند کربن، نیتروژن و فسفر تبدیل می‌شوند که برای رشد گیاهان ضروری هستند.

باروری خاک، به‌عنوان نشان‌دهنده سلامت بوم‌سازگان عمل می‌کند. خاک‌های بارور از تولید زیست‌توده در سطوح مختلف تغذیه‌ای پشتیبانی می‌کنند تا به‌طور پایدار نیازهای افزایش‌یافته کشاورزی در بوم‌سازگان‌های سالم را تامین کنند. زیست‌توده میکروبی خاک به‌طور طبیعی با ماتریس خاک پیوند دارد و خاکدانه‌های خاک به عنوان واحدهای کارکردی در بوم‌سازگان خاک عمل می‌کنند (Ciric و همکاران، ۲۰۱۲؛ Monrozier و همکاران، ۱۹۹۱؛ Van Gestel و همکاران، ۱۹۹۶؛ Wilpiseski و همکاران، ۲۰۱۹).

از سوی دیگر، خاکدانه‌ها می‌توانند به تثبیت میکروارگانیسم‌ها و بهبود تعاملات آن‌ها با جوامع میکروبی در خاک کمک کنند. اما این خاکدانه‌ها و ارتباطات میکروبی ممکن است کارکرد و ویژگی‌های جوامع میکروبی را با محصور کردن آن‌ها در منافذ مختلف تغییر دهند. در خاک‌های اشباع، نرخ انتشار املاح بیشتر است، اما در شرایط خشکی، میکروب‌ها نمی‌توانند به مواد غذایی یا سیگنال‌های موجود در منافذ دسترسی پیدا کنند. چون نفوذ مؤثر با تخلخل و ساختار منافذ مرتبط است، محصور شدن می‌تواند نرخ چرخه مواد غذایی را کنترل کرده و بر مسیرهای متابولیکی در خاک اثر بگذارد. تنوع کارکردی میکروب‌های خاک، مانند جنبه‌های مختلف چرخه نیتروژن، نیز با اندازه‌های مختلف منافذ خاکدانه‌ها متفاوت است.



شکل ۲-۶- انتقال رسوب از خشکی به دریا از طریق رودخانه، a: نمای هوایی از سامانه رودخانه ای متصل به دریا با بار رسوب. b: رودخانه متصل به دریا با بار رسوب

ساختمان خاکدانه‌ها تأثیر مهمی بر پیوستگی هیدرولوژیکی خاک دارد و در دوره‌های خشکی، جوامع میکروبی را از هم جدا می‌کند. در شرایط مرطوب، انتقال املاح، متابولیت‌ها، مواد ژنتیکی و ذرات ویروسی ممکن می‌شود. این نشان می‌دهد که هر جامعه میکروبی ممکن است به‌طور مستقل در محیط خود عمل کند و در دوره‌های خشکی، مواد غذایی را از ارگانیسم‌های ساکن و سلول‌های تجزیه‌شده آزاد کند. با مرطوب شدن

خاک، کربن محلول و متابولیت‌ها جابه‌جا می‌شوند و قابلیت‌های کارکردی جدید بین جوامع میکروبی منتقل می‌شوند. خاکدانه‌ها نمایانگر مقیاسی از منافذ خاک هستند که ویژگی‌های نوظهور خاک و سلامت محیط‌زیست را شکل می‌دهند (Evans و همکاران ۲۰۱۶؛ O'Donnell و همکاران ۲۰۰۷؛ Raynaud و Nunan، ۲۰۱۴؛ Schimel، ۲۰۱۸؛ Smith و همکاران ۲۰۱۷؛ Vincent و همکاران ۲۰۱۰؛ Vontobel و همکاران ۲۰۰۷؛ Wilpiseski و همکاران ۲۰۱۹).

فرسایش خاک، یکی از تهدیدهای اصلی تخریب زمین در جهان است که تأثیرات منفی بر کارکرد محصولات کشاورزی، موجودات زنده خاک، چرخه‌های مواد غذایی و در نهایت تغذیه انسان دارد. به مرور زمان، حفاظت از خاک کاهش یافته است که این موضوع باعث افزایش ۱۱/۷ درصدی فرسایش خاک در سطح جهانی بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳ نسبت به سال ۲۰۰۱ شده است. در این میان، پوشش گیاهی که نقش مهمی در جلوگیری از فرسایش خاک دارد، به‌ویژه تحت تأثیر تغییرات میزان بارندگی قرار می‌گیرد. فرسایش خاک در سطح جهانی به آسیب‌پذیری خاک و کاهش تنوع زیستی آن تأثیر می‌گذارد. در مناطق آسیب‌پذیر و با تنوع زیستی بالا، فرسایش خاک می‌تواند منجر به کاهش ۶/۴ درصدی ماکروفون‌های خاک و ۷/۶ درصدی قارچ‌های خاک شود. با این حال، افزایش پوشش گیاهی می‌تواند به کاهش خطر فرسایش خاک توسط آب کمک کند و بهبود شرایط خاک، موجب حفظ تنوع زیستی و افزایش خدمات بوم‌سازگانی می‌شود.

برای مدیریت بهتر خاک، برآورد و پیش‌بینی دقیق لازم است. با این حال، مدل‌های فیزیکی جهانی محدودیت‌هایی دارند زیرا داده‌های کامل از تخریب خاک در دسترس نیست. مدل‌های تجربی نیز برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و کاربری زمین استفاده می‌شوند (Borrelli و همکاران ۲۰۱۷؛ Guerra و همکاران ۲۰۱۶، ۲۰۲۰؛ Pimentel و همکاران، ۱۹۹۵).

۲-۷- نتیجه‌گیری کلی

خاک در بسیاری از نقاط جهان در معرض خطر فرسایش است. این ماده نه تنها یک عنصر کلیدی محیط زیستی بلکه یک منبع طبیعی غیرقابل تجدید است. انسان‌ها برای تأمین غذا و خدمات بوم‌سازگانی به خاک سالم نیاز دارند. از سوی دیگر، فرسایش خاک به عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی جهانی می‌تواند منجر به تخریب زمین و کاهش خدمات اکولوژیکی شود. همچنین، فرسایش باعث کاهش تنوع زیستی و رسوب‌گذاری در مخازن و دریاچه‌ها می‌شود و به نوبه خود بر توسعه پایدار منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد (Amundson و همکاران ۲۰۱۵؛ FAO، ۲۰۱۹؛ Montanarella، ۲۰۱۵؛ Morgan، ۲۰۰۵؛

Oldeman و همکاران ۱۹۹۱، ۱۹۹۴؛ Robinson و همکاران ۲۰۱۷؛ Yang، ۲۰۱۷).

فرسایش خاک یکی از مشکلات محیط زیستی جهانی است که احتمالاً باعث تسریع در تلفات کربن خاک و افزایش سطح دی‌اکسید کربن جو می‌شود. این وضعیت می‌تواند تأثیرات جهانی زیادی داشته باشد. برای مقابله با این مشکل، سمپوزیوم بین‌المللی فرسایش خاک (GSER19) و ششمین سالروز بین‌المللی خاک (۵ دسامبر ۲۰۱۹) با شعار "فرسایش خاک را متوقف کنید، آینده ما را نجات دهید" برگزار شدند. هدف این رویدادها بهبود سلامت خاک با تشویق کشاورزان، گروه‌های اجتماعی و دولت‌ها به مشارکت فعال در کنترل فرسایش خاک بود (Crosson و همکاران ۱۹۹۵؛ FAO، ۲۰۱۹؛ Lal، ۲۰۱۹؛ Montanarella، ۲۰۱۵؛ Yang و همکاران ۲۰۲۰).

بر اساس داده‌های آماری، سنجش از دور و مدل‌سازی ریاضی که از مطالعات علمی و میدانی به دست آمده است، در روسیه مساحت کل اراضی فرسایش‌یافته و اراضی در معرض خطر فرسایش، بیش از نیمی از تمامی زمین‌های کشاورزی را شامل می‌شود. در دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰، حاصلخیزی خاک زمین‌های زراعی به خاطر فرسایش آبی ۳۰ تا ۶۰ درصد کاهش یافت.

از سوی دیگر، رها شدن زمین‌های زراعی و رشد بیش از حد پوشش گیاهی طبیعی طی ۳۰ تا ۴۰ سال گذشته، کاهش نرخ فرسایش حتی در اراضی فرسایش‌یافته را نشان

می‌دهد. در روسیه، کاهش عمق یخ‌زدگی خاک و جریان رواناب بهاره به دلیل تغییرات آب و هوایی، منجر به کاهش فرسایش خاک شده است.

طبق اصل «یک شاخص از دست برود، همه شاخص‌ها از دست می‌رود»، سه شاخص کلیدی برای ارزیابی تخریب زمین متعادل (LDN) شامل کربن آلی خاک (SOC)، بهره‌وری اولیه خالص (NPP) و تغییر پوشش زمین وجود دارد.

شاخص فرسایش خاک (SE) می‌تواند به عنوان مکملی برای سه شاخص جهانی LDN استفاده شود. SE به دو شکل تعریف می‌شود: "نرخ تلفات خاک" (تن بر هکتار در سال) و "تلفات کل خاک" در یک منطقه خاص در طول یک دوره زمانی معین. این داده‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های خاص هر منطقه، مانند داده‌های سنجش از دور و فناوری‌های مربوط به مشاهدات محلی، در سطوح ملی و منطقه‌ای تحلیل و تفسیر شوند (Tsymbarovich و همکاران ۲۰۲۰؛ UNCCD، ۲۰۱۶).

از دهه ۱۹۹۰، مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی و نقشه‌برداری فرسایش خاک انجام شده است. این مطالعات داده‌های ارزشمندی در مورد الگوی فرسایش خاک و نقاط بحرانی عوامل فرسایش در برخی کشورها به دست آورده‌اند. این داده‌ها عمدتاً از تصاویر سنجش از دور با وضوح پایین و متوسط و نقشه‌برداری با مقیاس کوچک به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به دست آمده‌اند. بنابراین، این داده‌ها ممکن است نتوانند به طور کامل الزامات یک درک جامع از فرسایش خاک و تصمیم‌گیری‌های مرتبط را تأمین کنند.

بنابراین، ارزیابی دقیق فرسایش خاک باید بر اساس تحقیقات میدانی، سنجش از دور با وضوح بالا و داده‌های نقشه‌برداری دقیق، و اطلاعات زمینی مربوط به فرسایش خاک انجام شود. این اطلاعات برای برنامه‌ریزی و اتخاذ اقدامات مناسب در زمینه حفاظت خاک و آب در سطح مزرعه مفید خواهند بود (Borrelli و همکاران ۲۰۱۷، ۲۰۲۱؛ Crosson و همکاران، ۱۹۹۵؛ FAO، ۲۰۱۹؛ Oldeman و همکاران، ۱۹۹۱، ۱۹۹۴؛ Teng و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yang و همکاران ۲۰۲۰).

منابع مورد استفاده

1. Akhtar-Schuster, M., Stringer, L. C., Erlewein, A., Metternicht, G., Minelli, S., Safriel, U., & Sommer, S. (2017). Unpacking the concept of land degradation neutrality and addressing its operation through the Rio conventions. *Journal of Environmental Management*, 195(1), 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.044>
2. Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071–1261071e1261071–1261076.
3. Anderson, H. W. (1954). Suspended sediment discharge as related to stream flow topography, soil, and land use. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35, 268–281.
4. Baver, L. D. (1935). Factors contributing to the genesis of soil micro-structure. *American Soil Survey Association Bulletin*, 18, 55–56.
5. Bennett, H. H. (1939). *Soil Conservation*. McGraw-Hill.
6. Biswas, T. D., & Mukherjee, S. (1987). *Textbook of Soil Science*. Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi.
7. Biswas, T. D., & Nath, J. (1982). Clay mineralogy and soil physical behavior. In: *Review of Soil Research in India, Part II, Transactions XII International Congress Soil Science*, pp. 740–745.
8. Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer, New York.
9. Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st-century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 1–13.
10. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: a global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
11. Bouyoucos, G. J. (1935). The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, 27(9), 738–741.
12. Briggs, L. J., & McLane, J. W. (1907). The moisture equivalents of soils. *USDA Bureau Soils Bulletin* 45:1907.
13. Briggs, L. J., & Shantz, H. L. (1912). The coefficient for different plants and its indirect determination. *USDA Bureau of Plant Industry Bulletin* 230:1–82.
14. Chepil, W. S., & Woodruff, N. P. (1963). The physics of wind erosion. *Advances in Agronomy*, 15, 211–302.
15. Chorley, R. J. (1959). The geomorphic significance of some Oxford soils. *American Journal of Science*, 257, 503–515.
16. Ciric, V., Manojlovic, M., Nesic, L., & Belic, M. (2012). Soil dry aggregate size distribution: effects of soil type and land use. *Journal of Soil Science and*

- Plant Nutrition, 12, 689–703. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000025>
17. Crosson, P., Pimentel, D., Harvey, C., et al. (1995). Soil erosion estimates and costs. *Science*, 269(5223), 461–465.
18. Cruse, R. M., Hajek, B. F., Karlen, D. L., et al. (1990). Erosion and soil properties. In: *Soil erosion and soil productivity*, pp. 23–39. Available https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/89-421-A.pdf. Accessed 18 June 2022.
19. Dakshinamurti, C., & Gupta, R. P. (1968). *Practicals in soil physics*. Indian Agricultural Research Institute, 29, 60.
20. dos Santos, T. B., Ribas, A. F., de Souza, S. G. H., Budzinski, I. G. F., & Domingues, D. S. (2022). Physiological responses to drought, salinity, and heat stress in plants: a review. *Stresses*, 2, 113–135. <https://doi.org/10.3390/stresses2010009>
21. Einstein, H. A., & El-Samni, E. A. (1949). Hydrodynamic forces on rough wall. *Reviews of Modern Physics*, 21(3), 520–524.
22. European Union. (2014). *Study on soil and water in a changing environment*. Final Report, Annex 3, Table 5, p. 62. <https://doi.org/10.2779/20608>
23. Evans, S., Dieckmann, U., Franklin, O., & Kaiser, C. (2016). Synergistic effects of diffusion and microbial physiology reproduce the birch effect in a micro-scale model. *Soil Biology and Biochemistry*, 93, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.020>
24. FAO. (2000). *Land resource potential and constraints at regional and country levels*. World soil resources report 90. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
25. FAO. (2019a). *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
26. FAO. (2019b). *Outcome document of the global symposium on soil erosion*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
27. Flanagan, D. C., Ascough, J. C. II, Nieber, J. L., Misra, D., & Douglas-Mankin, K. R. (2013). Advances in soil erosion research: processes, measurement, and modelling. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 56(2), 455–463.
28. Gao, B., Walter, M. T., Steenhuis, T. S., Parlange, J. Y., Richards, B. K., Hogarth, W. L., & Rose, C. W. (2005). Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff. *Journal of Hydrology*, 308, 313–320.
29. Glinski, J., Horabik, J., & Lipiec, J. (2011). *Encyclopedia of Agrophysics*. Springer, Dordrecht.

30. Golosov, V., Walling, D. E., & Mishra, A. (2019). Erosion and sediment problems: global hotspots. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, pp. 8–14.
31. Guerra, C., Maes, J., Geijzendorffer, I., & Metzger, M. J. (2016). An assessment of soil erosion prevention by vegetation in Mediterranean Europe: current trends of ecosystem service provision. *Ecological Indicators*, 60, 213–222.
32. Guerra, C. A., Rosa, I. M. D., Valentini, E., Wolf, F., Filipponi, F., Karger, D. N., Xuan, A. N., Mathieu, J., Lavelle, P., & Eisenhauer, N. (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, 35, 823–842. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00984-z>
33. Hénin, S., Monnier, G., & Combeau, A. (1958). Methode pour l'étude de la stabilite structural des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73–92.
34. Howard, A. (1943). *An Agricultural Testament*. Oxford University Press, New York.
35. Hudson, N. (1981). *Soil Conservation*, 2nd edn. Cornell State University, New York.
36. Igwe, C. A. (2005). Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria. *Land Degradation & Development*, 16, 87–96.
37. Ippen, A. T., & Verma, R. P. (1953). Reprinted from processing Minnesota intern hydraulic conversion, Hydrodynamics Lab, Massachusetts Institute Technicle, Cambridge.
38. Kay, B. D., Angers, D. A., Groenovelt, P. H., & Baldock, J. A. (1988). Quantifying the influence of cropping history on soil structure. *Canadian Journal of Soil Science*, 68, 359–368.
39. Kirwan, M. L., & Megonigal, J. P. (2013). Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea level rise. *Nature*, 504, 53–60.
40. Lal, R. (2019). Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil & Tillage Research*, 188, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001>
41. Lal, B., Biswas, H., & Raj, S. (2006). Soil erodibility characteristics under different land uses in Bundelkhand. *Indian Journal of Agroforestry*, 8(1), 69–73.
42. Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 121–125.
43. Lerman, A., & Meybeck, M. (Eds.). (1988). *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*. Springer, Netherlands.
44. Lu, J., Zheng, F., Li, G., Bian, F., & An, J. (2016). The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil & Tillage Research*, 161, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.002>

45. Ludwig, W., Probst, J.-L., & Kempe, S. (1996). Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 23–41.
46. Ma, R. M., Li, Z. X., Cai, C. F., & Wang, J. G. (2014). The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (Subtropical China). *CATENA*, 121, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.028>
47. Middleton, H. E., Slater, C. S., & Byres, H. G. (1932). Physical and chemical characteristics of the soils from the erosion experiment stations. USDA Technical Bulletin, 316.
48. Middleton, H. E., Slater, C. S., & Byres, H. G. (1934). The physical and chemical characteristics of the soils from the erosion experiment stations—second report. USDA Technical Bulletin, 430.
49. Middleton, H. E. (1930). Properties of soil which influence soil erosion. United States Department of Agriculture (USDA) Tech Bulletin, 178.
50. Monrozier, L. J., Ladd, J. N., Fitzpatrick, R. W., Foster, R. C., & Raupach, M. (1991). Components and microbial biomass content of size fractions in soils of contrasting aggregation. *Geoderma*, 50, 37–62. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90025-O](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90025-O)
51. Montanarella, L. (2015). Govern our soils. *Nature*, 287(7580), 32–33.
52. Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*, 3rd edn. Blackwell Science Ltd, Malden.
53. Myers, N. (1993). *Gaia: An Atlas of Planet Management*. Anchor/Doubleday, Garden City, New York.
54. O'Donnell, A. G., Young, I. M., Rushton, S. P., Shirley, M. D., & Crawford, J. W. (2007). Visualization, modeling and prediction in soil microbiology. *Nature Reviews Microbiology*, 5, 689–699. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1714>
55. Oldeman, L. R., Hakkeling, T. T. A., & Sombroek, W. G. (1994). The global extent of soil degradation. In: Green, D., Szabolcs, J. (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB International, Wallingford, pp. 99–118.
56. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note, 2nd revised edition. Global assessment of soils degradation, The map sheets. World Soil Information (ISRIC), Wageningen.
57. Pal, D. K., & Durge, S. L. (1989). Release and adsorption of potassium in some benchmark alluvial soils of India in relation to their mineralogy. *Pedology*, 39, 235–248.
58. Pal, D. K., & Durge, S. L. (1993). Potassium release from clay micas. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 41, 67–69.

59. Pal, D. K., Bhattacharyya, T., Deshpande, S. B., Sarma, V. A. K., & Velayutham, M. (2000). Significance of minerals in soil environment of India. NBSS Review Series 1, NBSS & LUP, Nagpur, India, pp. 19–48.
60. Pieri, C. (1991). Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah. Springer, Berlin.
61. Pimental, D., Terhune, E. C., Dyson-Hudson, R., & Rocherau, S. (1976). Land degradation: Effects on food and energy resources. *Science*, 94, 149–155.
62. Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Soil erosion estimates and costs. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>
63. Pinter, N., & Brandon, M. J. (2005). Erosion builds mountains. *Scientific American*, 15, 74–81.
64. Raynaud, X., & Nunan, N. (2014). Spatial ecology of bacteria at the microscale in soil. *PLoS ONE*, 9(1), e87217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087217>
65. Robinson, D. A., Panagos, P., & Borrelli, P. (2017). Soil natural capital in Europe: a framework for state and change assessment. *Scientific Reports*, 7(1), 6706.
66. Schimel, J. P. (2018). Life in dry soils: Effects of drought on soil microbial communities and processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49, 409–432. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062614>
67. Singh, R. A. (1980). *Soil Physical Analysis*, 2nd edn. Kalyani Publishers, New Delhi, pp. 39–40.
68. Smith, A. P., Bond-Lamberty, B., Benscoter, B. W., Tfaily, M. M., Hinkle, C. R., Liu, C., & Bailey, V. L. (2017). Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. *Nature Communications*, 8, 1335. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01320-x>
69. Tan, K. H., & Troth, P. S. (1982). Silica-sesquioxide ratios as aids in characterization of some temperate region and tropical soil clays. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 1109–1114. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.0361599500460005004>
70. Teng, H., Liang, Z., Chen, S., Liu, Y., Raphael, A., Rossel, V., Chappell, A., Wu, Y., & Shi, Z. (2018). Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Science of the Total Environment*, 635, 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.146>
71. Tsybarovich, P., Kust, G., Kumani, M., Golosov, V., & Andreeva, O. (2020). Soil erosion: an important indicator for the assessment of land

- degradation neutrality in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
72. Tucker, G. E., & Hancock, G. R. (2010). Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 28–50. <https://doi.org/10.1002/esp.1952>
73. UN. (2021). The Sustainable Development Goals Report. The Sustainable Development Goals website of the United Nations, Department of Economic and Social Affairs Statistics Division, United Nations (UN), New York. Available <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/>. Accessed 18 June 2022.
74. UNCCD. (2015). ICCD/COP (12)/4. Report of the IWG on LDN. Integration of the Sustainable Development Goals and Targets into the Implementation of the UNCCD. In: Conference of the Parties, Twelfth session, Ankara, Turkey. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn.
75. UNCCD. (2016). Monitoring Land Degradation Neutrality Status. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) Knowledge Hub. UNCCD Secretariat, Bonn. Available <https://knowledge.unccd.int/knowledge-products-and-pillars/guide-scientific-conceptual-framework-ldn/key-elements-scientific-5>. Accessed 18 June 2022.
76. Van Gestel, M., Merckx, R., & Vlassak, K. (1996). Spatial distribution of microbial biomass in microaggregates of a silty-loam soil and the relation with the resistance of microorganisms to soil drying. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 503–510. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00192-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00192-1)
77. Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1931). The moisture equivalent as a measure of field capacity of soils. *Soil Science*, 33(3), 181–194. <https://doi.org/10.1097/00010694-193109000-00003>
78. Vincent, M. E., Liu, W., Haney, E. B., & Ismagilov, R. F. (2010). Microfluidic stochastic confinement enhances analysis of rare cells by isolating cells and creating high-density environments for control of diffusible signals. *Chemical Society Reviews*, 39, 974–984. <https://doi.org/10.1039/b917851a>
79. Vontobel, P., Lehmann, E., Laloui, L., Vulliet, L., & Flühler, H. (2007). Water flow between soil aggregates. *Transport in Porous Media*, 68, 219–236. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9041-z>
80. Wilpiseski, R. L., Aufrecht, J. A., Retterer, S. T., Sullivan, M. B., Graham, D. E., Pierce, E. M., Zablocki, O. D., Palumbo, A. V., Elias, D. A. (2019). Soil aggregate microbial communities: towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(14), e00324-e419. <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-19>
81. Wischmeier, W. H., & Mannering, J. V. (1969). Soil and water management and conservation. Relation of soil properties to its erodibility. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 33, 131–137. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x>

82. Wuddivira, M. N., Robinson, D. A., Lebron, I., Brèchet, L., Atwell, M., De Caires, S., Oatham, M., Jones, S. B., Abdu, H., Verma, A. K., & Tuller, M. (2012). Estimation of soil clay content from hygroscopic water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1529–1535. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0034>
83. Wuest, S. B., Williams, J. D., & Gollany, H. T. (2006). Tillage and perennial grass effects on ponded infiltration for seven semi-arid loess soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(4), 218–222.
84. Yang, Q., Zhu, M., Wang, C., Zhang, X., Liu, B., Wei, X., Pang, G., Du, C., & Yang, L. (2020). Study on a soil erosion sampling survey in the pan-third pole region based on higher-resolution images. *International Soil and Water Conservation Research*, 8, 440e451.
85. Young, I. M., Crawford, J. W., & Rappoldt, C. (2001). New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil. *Soil and Tillage Research*, 61, 33–45.
86. Zhao, C., Zhang, H., Song, C., Zhu, J.-K., & Shabala, S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *Innovations*, 1(1), 100017. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>
87. Zobeck, T. M., Baddock, M., Pelt, R. S. V., Tatarko, J., & Acosta-Martinez, V. (2013). Soil property effects on wind erosion of organic soils. *Aeolian Research*, 10, 43–51.

فصل ۳

تأثیر اقلیم، آب و عوامل بیولوژیکی بر سلامت خاک

چکیده

تأثیر تغییرات اقلیمی و مدیریت کاربری زمین بر سلامت خاک را می‌توان با شاخص‌هایی مانند پایداری خاکدانه‌ها، مواد آلی خاک، چرخه کربن و نیتروژن، زیست‌توده و فعالیت میکروبی، تنوع جانوری و گیاهی ارزیابی کرد. برای این منظور، داشتن یک مجموعه داده حداقلی برای ارزیابی کمی سلامت خاک و آغاز اقدامات مناسب برای حفاظت خاک و آب در زمین‌های کشاورزی ضروری است. این کار به‌ویژه در زمین‌های محدود و در مناطق خاص برای تضمین کشت پایدار و امنیت غذایی اهمیت دارد.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم، زمین، سلامت خاک، کربن، مدیریت، مواد آلی خاک

کلمات اختصاری

آب قابل‌دسترس	AWC
جرم مخصوص ظاهری	B _D
کربن	C
دی‌اکسیدکربن	CO ₂
کشاورزی هوشمند اقلیمی	CSA
اداره محیط‌زیست، غذا و امور روستایی	DEFRA
هدایت الکتریکی	EC
سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد	FAO

تجزیه و تحلیل دمای سطح مؤسسه گادارد برای مطالعات مکانی	GISTEMP
کربنیک اسید	H ₂ CO ₃
پروتون	H ⁺
پنل بین دولتی تغییرات اقلیمی	IPCC
پنل فنی بین دولتی در مورد خاک	ITPS
پتاسیم	K
کربن زیست توده میکروبی	MBC
منیزیم	Mg
نیتروژن	N
فسفر	P
تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی	PCA
بهره وری اولیه کارخانه	PPP
نیتروژن بالقوه معدنی	PMN
ذرات آلی	POM
نسبت جذب سدیم	SAR
مواد آلی خاک	SOM
عنصر کیفیت خاک	SQE
تولید مواد غذایی و فیبر	SQE1
فرسایش	SQE2
کیفیت آب زیرزمینی	SQE3
کیفیت آب سطحی	SQE4
کیفیت هوا	SQE5
کیفیت غذا	SQE6
شاخص کیفیت خاک	SQI

۳-۱- مقدمه

سلامت خاک به عنوان "توانایی خاک برای عمل به عنوان یک سامانه زنده و حیاتی در محدوده بوم‌سازگان و کاربری زمین، به گونه‌ای که بهره‌وری گیاهان و حیوانات را حفظ کند، کیفیت آب و هوا را بهبود بخشد و سلامت گیاهان و حیوانات را ارتقا دهد" تعریف می‌شود (Doran و Zeiss، ۲۰۰۰).

خاک بخشی از چرخه هیدرولوژیکی است که چرخه جهانی آب را مدیریت می‌کند و بر تنظیم اقلیم و چرخه مواد غذایی برای تمام شکل‌های حیات تأثیر می‌گذارد. شاخص‌های سلامت خاک شامل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مرتبط با عملکرد مناسب خاک‌های سالم هستند که تحت تأثیر مدیریت و تغییرات اقلیمی قرار دارند. سلامت خاک نشان‌دهنده تأثیرات تغییرات جهانی مانند افزایش دی‌اکسیدکربن جو (CO_2)، الگوی بارندگی غیرمعمول (یا بارش) و رسوب نیتروژن، بر عملکرد خاک در رابطه با تغییرات اقلیمی است. انسان برای تأمین غذا و سایر نیازهای اساسی به کشاورزی وابسته است که حدود ۳۸ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهد و ۹۵ درصد تولید جهانی غذا را فراهم می‌کند.

ضروری است تغییرات در ویژگی‌های سلامت یا کیفیت خاک، در ارتباط با تغییرات پیش‌بینی‌شده در اقلیم را شناسایی کرد. این کار کمک می‌کند تا این تغییرات را بهتر درک کرد و برای مدیریت مؤثر خاک اقدام شود، به طوری که در شرایط فعلی تغییرات اقلیمی، بتوان برداشت پایدار محصولات غذایی را بدون نگرانی ادامه داد (Borrelli و همکاران، ۲۰۲۰؛ French و همکاران، ۲۰۰۹؛ Montanari و همکاران ۲۰۱۳).

اصول سلامت خاک شامل موارد زیر است:

- حفاظت از سطح خاک با گیاهان زنده یا مالچ،
- کمترین برهم زدن خاک تا حد ممکن،
- افزایش تنوع گیاهی از طریق تناوب زراعی، محصولات پوششی و کشت مخلوط،
- تقویت زیواگان (بیوتای) خاک،

- افزایش مواد آلی خاک (SOM)،

- ادغام پرورش دام در سامانه‌های کشاورزی.

اجرای این اصول باعث بهبود کارکردهای اصلی خاک، مانند افزایش دسترسی و ذخیره‌سازی آب، مواد غذایی، پایداری ساختمان خاک، رشد ریشه، ذخیره کربن، حفظ تنوع زیستی و فیلتر کردن آلاینده‌ها در بوم‌سازگان‌های کشاورزی می‌شود (Al-Kaisi و Lal، ۲۰۱۷؛ Keesstra و همکاران، ۲۰۱۲؛ Brussaard و همکاران، ۲۰۰۷؛ Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸؛ Mehra و همکاران ۲۰۱۸؛ Nannipieri و همکاران ۲۰۰۳).

منابع آب و خاک در شرایط بحرانی تخریب زمین و تغییرات اقلیمی قرار گرفته‌اند و اکنون از منابع طبیعی پرخطر محسوب می‌شوند. طبق آمار FAO و ITPS (۲۰۱۵)، هر سال بین ۲۰ تا ۴۰ میلیارد تن خاک حاصلخیز از بین می‌رود. به همین دلیل، نیاز به اقداماتی برای مدیریت پایدار زمین وجود دارد تا سلامت خاک بهبود یابد و از آب و خاک محافظت شود. خاک، ذخیره اصلی کربن در بوم‌سازگان‌های زمینی است و نقش مهمی در ترسیب کربن و چرخه جهانی کربن ایفا می‌کند، که بر پایداری و بهره‌وری آن تأثیرگذار است.

تغییرات اقلیمی و نوسانات آب‌وهوا، دو تهدید اصلی برای کشاورزی در سطح جهانی هستند. بر اساس گزارش پنل بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، تغییر اقلیم به معنای تغییرات طولانی‌مدت در میانگین یا تغییرپذیری ویژگی‌های اقلیمی است، در حالی که نوسانات اقلیمی به تغییرات کوتاه‌مدت دما و بارندگی اشاره دارند.

دانشمندان اکنون به این نتیجه رسیده‌اند که تغییرات محیطی مانند تغییرات اقلیمی، تخریب زمین و کاهش تنوع زیستی به‌طور جدی بر سلامت خاک و بهره‌وری کشاورزی تأثیر می‌گذارد. افزایش جمعیت جهان که تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۸/۹ میلیارد نفر خواهد رسید، همراه با افزایش ۱۲۵ درصدی ناهنجاری دمای جهانی (از ۰/۴۴ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۰ به ۰/۹۹ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۶) به دلیل گرمایش جهانی، توانایی بسیاری از کشورها را در تأمین امنیت غذایی و خودکفایی برای تولید غذا تحت تأثیر

قرار می‌دهد. از کل مساحت جهان، تنها ۱۰/۹ درصد (حدود ۱/۴ میلیارد هکتار) برای تولید مواد غذایی استفاده می‌شود و این مساله اهمیت دارد (FAO، ۲۰۱۶؛ ITPS، ۲۰۱۵؛ GISTEMP Team، ۲۰۱۸؛ IPCC، ۲۰۱۲؛ Mehra و همکاران، ۲۰۱۸؛ Potter و همکاران، ۲۰۱۷؛ Singh و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸؛ Thornton و همکاران، ۲۰۱۴؛ Titeux و همکاران، ۲۰۱۶).

حفظ آب در خاک خدمات بوم‌سازگانی مهمی را با سه کارکرد اصلی ارائه می‌دهد: (۱) تأمین، (۲) تنظیم و (۳) پشتیبانی.

خدمات تأمین شامل تولید غذا، خوراک و فیبر است. همچنین، آب آشامیدنی از طریق ذخیره‌سازی سطحی و تغذیه آب زیرزمینی تأمین می‌شود. خاک با فیلتر کردن از آلودگی آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کند.

خدمات تنظیم شامل تعدیل اقلیم از طریق تبخیر و تعرق، کنترل سیلاب و خشکسالی است.

خدمات پشتیبانی مانند کنترل فرسایش برای حفاظت بلندمدت از کارکرد خاک ضروری است و از چرخه مواد غذایی، تنوع زیستی و تصفیه آب حمایت می‌کند. این خدمات بوم‌سازگانی به تولید و حفظ منابع حیاتی برای انسان و محیط‌زیست کمک می‌کنند (Brauman و همکاران، ۲۰۰۷؛ Dominati و همکاران، ۲۰۱۰؛ European Union، ۲۰۱۴؛ MEA، ۲۰۰۵).

۳-۲- تدوین شاخص کیفیت خاک شامل کیفیت آب در چارچوب تغییرات اقلیمی
سلامت خاک، ویژگی‌های مهمی از جمله تولید اولیه خالص (NPP)، فیلتر کردن و تغییر شکل آلاینده‌ها برای تصفیه آب، بهبود کیفیت هوا از طریق حذف آلاینده‌ها و اصلاح شرایط آب‌وهوایی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی را شامل می‌شود. پارامترهای کلیدی عملکرد خاک، که به‌عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک استفاده می‌شوند، بیشتر بر کارکردهای اکولوژیکی و تنوع زیستی خاک متمرکز دارند.

این دیدگاه‌ها خاک را به‌عنوان یک منبع زنده و پویا می‌بینند که توانایی خودسازماندهی و مقاومت در برابر تخریب را دارد و می‌تواند به‌دلیل انعطاف‌پذیری ذاتی خود بازیابی شود (Allen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Herrick و همکاران، ۱۹۹۹؛ Karlen و همکاران، ۲۰۰۳؛ Lal، ۲۰۱۱؛ Magdoff، ۲۰۰۱).

نظارت بر تغییرات مرتبط با تغییرات اقلیمی در عملکردهای سلامت خاک به‌دلیل کمبود داده‌ها و نیاز به یکپارچه‌سازی بیشتر در آزمایش‌های سلامت خاک، دشوار است. برای این منظور، معمولاً از سطح آستانه شاخص‌های کارکرد خاک استفاده می‌شود تا به‌طور غیرمستقیم کارکرد خاک را تخمین بزنند و روند فعلی سلامت خاک را پیگیری کنند.

این روش به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تغییرات ویژگی‌های خاک کمک می‌کند و با در نظر گرفتن همه روابط متقابل بین ویژگی‌های سلامت خاک، به مدیریت پایدار زمین منجر می‌شود.

فرایند ارزیابی سلامت خاک شامل مراحل زیر است:

- انتخاب شاخص‌های سلامت خاک
- تأیید حداقل مجموعه داده‌ها
- تفسیر شاخص‌ها
- اعتبارسنجی از طریق ارزیابی در مزرعه.

تولید پایدار کشاورزی و کارکرد بوم‌سازگان، به‌طور کلی، تحت تأثیر افزایش غلظت CO_2 اتمسفر، افزایش دمای اتمسفر، رسوب نیتروژن اتمسفر، نوسان در الگوی بارندگی کل و فصلی و وقوع رویدادهای اقلیمی شدید مانند خشکسالی، سیل و غیره است. از سوی دیگر، این عوامل بر فرایندهای بیولوژیکی خاک و چرخه C و N با پیامدهایی بر ساختمان خاک، فرسایش، در دسترس بودن مواد غذایی گیاه و بیماری‌های گیاهی تأثیر می‌گذارند که تأثیر مستقیمی بر پایداری در تولید مواد غذایی دارند (Allen و همکاران،

۲۰۱۱؛ Dalal و همکاران، ۲۰۰۳؛ Doran a,b، ۲۰۰۲؛ Doran و Zeiss، ۲۰۰۰؛ Idowu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Kinyangi، ۲۰۰۷؛ Riley، ۲۰۰۱).

Doran و Parkin یک استراتژی برای ارزیابی کیفیت خاک (SQ) ارائه کردند که در معادله (۱-۳) نشان داده شده است (Doran و Parkin، ۱۹۹۴).

$$SQ = f(SQE1, SQE2, SQE3, SQE4, SQE5, SQE6) \quad (1-3)$$

که در آن عوامل مهم و مؤثر بر کیفیت خاک (SQEi) به صورت زیر تعریف می شوند:

(الف) تولید مواد غذایی و فیبر = SQE1

(ب) فرسایش = SQE2

(ج) کیفیت آب زیرزمینی = SQE3

(د) کیفیت آب سطحی = SQE4

(ه) کیفیت هوا = SQE5

(و) کیفیت غذا = SQE6

برای پایش کیفیت خاک، استفاده از رویکرد شاخص کیفیت خاک (SQI) در بازه های زمانی مختلف، به جای تفسیر داده های لحظه ای، مفیدتر است. با این حال، نمی توان این شاخص را به طور مستقیم به یک عملکرد یا شاخص خاص برای تعیین کیفیت بالا یا پایین مرتبط کرد، زیرا همه ویژگی ها و نشانگرها در فرایند ایجاد شاخص، گروه بندی می شوند. اگرچه این رویکرد در تمام مناطقی که فرسایش خاک مشکل اصلی است، مؤثر نیست، اما اقدام فوری برای کاهش فرسایش خاک همچنان ضروری است.

با این حال، اثرات منفی فشرده گی خاک و شستشوی مواد غذایی باعث شده است که جوامع کشاورزی برای حفظ پایداری در تولید مواد غذایی تلاش کنند. تلاش های متعددی برای ساده سازی و کاهش پیچیدگی های مربوط به تفسیر رویکردهای ساختاری-کارکردی از طریق استفاده از ابزارهای چندمتغیره مانند تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و تحلیل عاملی انجام شده است. این تکنیک ها به دنبال کاهش متغیرها و یافتن ارتباط قوی بین یک شاخص خاص و یک مؤلفه هستند تا اثر دقیق یک ویژگی را بهتر نشان دهند.

با این حال، چنین رویکردی نمی‌تواند تناقض بین دو کارکرد مختلف خاک را حل کند. برای مثال، باروری بالا نیاز به نرخ بالای معدنی‌شدن نیتروژن دارد که ممکن است باعث آلودگی محیط زیست و شستشوی مواد غذایی شود. در حالی که لایه سخت رسی ممکن است از این شستشو جلوگیری کند، اما رشد ریشه و تولید غذا را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، میکروارگانیسم‌ها که به‌طور فعال با خاک در تماس هستند، به‌عنوان شاخص‌های بالقوه کیفیت خاک و تنظیم‌کننده تغییرات آن محسوب می‌شوند.

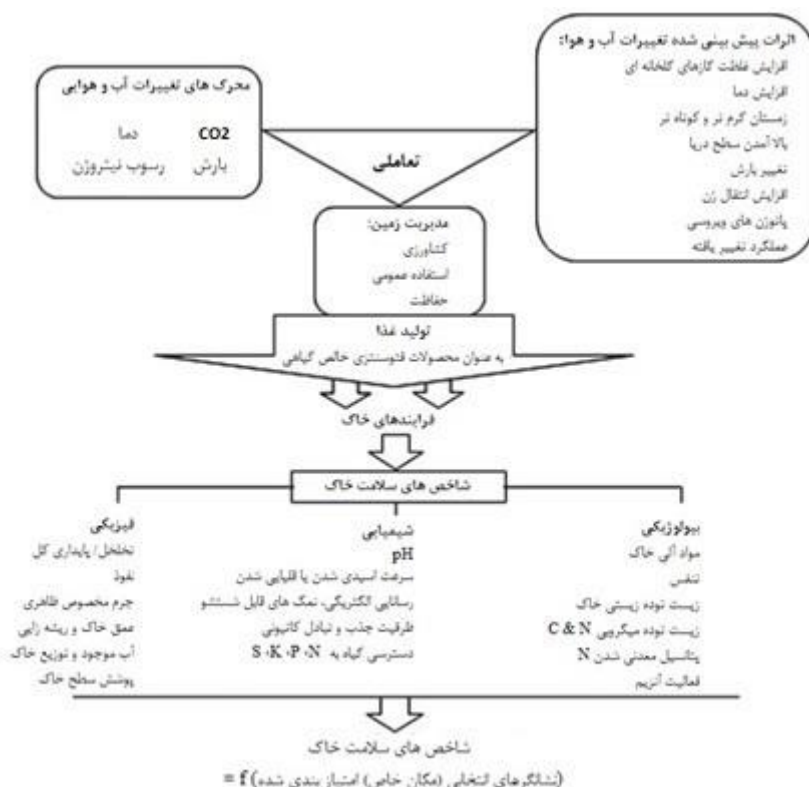
زیست‌توده میکروبی خاک بخشی از مواد فعال در خاک است که به چرخه مواد غذایی، تجزیه آلاینده‌های آلی و کاهش سرعت انحلال آلاینده‌ها در آب از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلاینده‌های ارگانیک کمک می‌کند (Doran و همکاران، ۱۹۹۶؛ Gonzales-Prieto و همکاران، ۱۹۹۲؛ Nolin و همکاران ۱۹۸۹؛ Stenberg، ۱۹۹۹؛ Stenberg و همکاران، ۱۹۹۸). در بررسی چارچوب‌های مختلف برای شناسایی شاخص‌های سلامت خاک (Dalal و Moloney، ۲۰۰۰؛ Dalal و همکاران، ۱۹۹۹؛ Doran، ۲۰۰۲؛ Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸؛ Lal، ۱۹۹۹؛ Nuttall، ۲۰۰۷؛ Schjønning و همکاران، ۲۰۱۹؛ Stenberg، ۲۰۰۴)، Allen و همکارانش شاخص‌های عملکرد سلامت خاک را به سه دسته اصلی شامل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تقسیم کرده‌اند (شکل ۱-۳) (Allen و همکاران، ۲۰۱۱).

برای تدوین شاخص‌های سلامت خاک، باید مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفیت خاک ارزیابی شود تا بتوان شاخص‌های مفیدی برای شناسایی خاک‌های مشکل‌دار، ارزیابی ارزش زمین، و نظارت بر تأثیر مدیریت کشاورزی ارائه داد، که در نهایت به تضمین تولید پایدار مواد غذایی کمک می‌کند.

۳-۳- تأثیر آب بر سلامت خاک در زمینه تغییرات اقلیمی

دردسترس بودن و ذخیره آب، یکی از وظایف مهم خاک در بوم‌سازگان‌های کشاورزی است. خاک‌ها با ذخیره آب سطحی، تغذیه آب زیرزمینی و تسهیل رشد ریشه، به افزایش

تنوع زیستی خاک کمک می‌کنند که برای تولید پایدار مواد غذایی ضروری است. همچنین، دردسترس بودن و ذخیره‌سازی آب به کاهش آلودگی آب، تأمین آب شیرین و مقاومت در برابر تخریب محیط‌زیست کمک می‌کند.



شکل ۳-۱- برآورد شاخص سلامت خاک شامل محرک‌های تغییرات اقلیم، اثرات پیش‌بینی شده تغییرات اقلیم و مدیریت زمین، تولید مواد غذایی، فرایندهای خاک و شاخص‌های سلامت خاک با شاخص مکانی خاص سلامت خاک (بر اساس Allen و همکاران، ۲۰۱۱)

سلامت فیزیکی خاک به مدیریت عوامل محیطی مانند ماده آلی، ساختمان خاک، جرم مخصوص ظاهری و حرکت هوا و آب در نیمرخ خاک بستگی دارد. حرکت و مدیریت آب، اکسیژن و مواد غذایی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک سالم هستند که بر پایداری

ساختمان خاک تأثیر می‌گذارند. عدم تعادل در ساختمان و ماده آلی خاک می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر حفظ آب و حساسیت خاک به فرسایش اثر بگذارد. حرکت گاز و آب در خاک نیز بر تبخیر، هدایت گرما و انتقال تأثیر دارد که در نهایت رژیم حرارتی خاک را کنترل می‌کند. افزایش دمای هوا و خاک می‌تواند باعث عدم تعادل در خاک و تجزیه سریع مواد آلی شود (Basher و Ross، ۲۰۰۲؛ Christensen و همکاران، ۱۹۹۶؛ Datiri و Lowery، ۱۹۹۱؛ DEFRA، ۲۰۰۵؛ Kulig و Głab، ۲۰۰۸؛ Keesstra و همکاران، ۲۰۱۲؛ Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸؛ Kladvko، ۲۰۰۱؛ Lal، ۲۰۰۳؛ Luo و همکاران، ۲۰۱۷؛ Mehra و همکاران، ۲۰۱۸؛ Nannipieri و همکاران، ۲۰۰۳؛ Qian و همکاران، ۲۰۱۱؛ Rogers و McCarty، ۲۰۰۰؛ Salem و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sojka و همکاران، ۲۰۰۷؛ Ussiri و همکاران، ۲۰۰۹).

پس از دوره خشکسالی‌های شدید و دوره بحران خاک در دهه ۱۹۳۰، مطالعات نشان دادند که نادیده‌گرفتن خاک‌ورزی باعث بهبود حفظ آب می‌شود و رژیم حرارتی خاک در لایه سطحی را بهتر می‌کند است (Blevins و همکاران، ۱۹۸۳؛ Ehlers و Claupein، ۱۹۹۴؛ Merrill و همکاران، ۱۹۹۶). پیشرفت‌های اخیر در روش‌های خاک‌ورزی مانند خاک‌ورزی دقیق و استراتژیک، شرایط خاک از جمله آب و دمای خاک، تخلخل، هوا، تماس بذر با خاک و در دسترس بودن مواد غذایی را بهینه می‌کند. همچنین، تغییرات اقلیمی بر سلامت شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد؛ به‌عنوان مثال، تغییرات در بارش ممکن است بر میزان اسیدی شدن خاک تأثیر بگذارد (Charman و Murphy، ۲۰۰۷؛ Wild، ۱۹۹۳).

آب باران که معمولاً کمی اسیدی است (pH: 5-5.6)، ممکن است به‌دلیل حل شدن CO₂ و تشکیل اسید کربنیک (H₂CO₃)، پروتون‌ها (H⁺) را آزاد کند، اما این فرایند به‌تنهایی تأثیر زیادی بر pH خاک ندارد، زیرا H₂CO₃ یک اسید ضعیف است. در مناطق استوایی مرطوب، خاک‌های اسیدی رایج هستند زیرا آبشویی کاتیون‌های اساسی به لایه‌های زیرین، اسیدی شدن خاک را تسریع می‌کند (Rengel، ۲۰۱۱). هرچند اسیدی شدن خاک

به طور طبیعی رخ می دهد، اما نیترات شویی در مناطق با بارندگی زیاد، عامل اصلی این پدیده است (Bolan و همکاران، ۱۹۹۱).

علاوه بر بارندگی، رطوبت خاک تحت تأثیر عوامل دیگری مانند گرمای ویژه و قابلیت انتشار آب خاک، رس و ماده آلی قرار می گیرد. جذب مواد غذایی توسط ریشه گیاه از طریق آب خاک انجام می شود که در خاک خشک، جذب فسفات و روی کاهش می یابد و انتقال مواد محلول در آب مانند نیترات، کلسیم و منیزیم نیز کم می شود (Barber، ۱۹۹۶؛ Mackay و Barber، ۱۹۸۵؛ Monteith و Unsworth، ۲۰۱۳).

Lal گزارش داد که با افزایش خشکی، عملکرد محصول به طور تصاعدی کاهش می یابد؛ زیرا کمبود رطوبت خاک موجود نیز می تواند بر در دسترس بودن و انتقال مواد غذایی خاک به گیاه تأثیر بگذارد (Lal، ۲۰۰۰). در شرایط رطوبتی بهینه، افزایش دمای ناحیه ریشه از ۱۵-۱۸ درجه سانتیگراد به ۲۹-۲۵ درجه سانتیگراد باعث افزایش جذب مواد غذایی (مانند K و P) تا ۳۰۰-۱۰۰ درصد باعث افزایش سطح ریشه و به تبع آن باعث افزایش در میزان انتشار مواد غذایی و جریان آب می شود (Brouder و Volenec، ۲۰۰۸؛ Ching و Barber، ۱۹۷۹؛ Mackay و Barber، ۱۹۸۴). همچنین لازم به ذکر است که ترکیب جانوران خاک با ذرات خاک، باعث می شود منافذ، تونل ها و دیگر بخش های بیولوژیکی، هوا و آب در خاک جریان داشته باشند و در نتیجه فعالیت میکروبی خاک را بیشتر کند (Lavelle و همکاران، ۲۰۰۶؛ Mehra و همکاران، ۲۰۱۸).

گنجاندن تناوب زراعی متنوع و مخلوط های گیاهی پوششی در سامانه های کشاورزی می تواند پوشش خاک، تنوع زیستی و کارکردهای بوم سازگان مانند مواد غذایی در دسترس گیاه، ذخیره آب، کارایی مصرف مواد غذایی و کارکرد محصول را بهبود بخشد (Lorenz و Lal، ۲۰۱۴؛ Poeplau و Don، ۲۰۱۵؛ Sarker و همکاران، ۲۰۱۸، a, b).

در حالی که جنگل زدایی، محصولات چوبی را برای رفع نیازهای جمعیت روبه رشد فراهم می کند، اثرات منفی این تغییر کاربری زمین بر خدمات بوم سازگان مانند افزایش فرسایش خاک (بادی و آبی)، کاهش اثر تنظیم کنندگی کاربری در برابر سیلاب و رانش

زمین، از بین رفتن تنوع زیستی گیاهان و کاهش ارزش‌های زیبایی‌شناختی و تفریحی، وجود دارد.

به دلیل استفاده ناپایدار و مدیریت نادرست زمین، حدود ۲۴ درصد از زمین‌های جهان در ۲۵ سال گذشته دچار افت سلامت خاک و کاهش بهره‌وری گیاهان شده‌اند (Rhodes, ۲۰۱۴). گزارش‌ها نشان می‌دهد که روش‌های کشاورزی حفاظتی (Mangalassery و همکاران، ۲۰۱۴؛ Petersen و همکاران، ۲۰۰۸)، به‌ویژه وقتی با نگهداری بقایای گیاهی همراه می‌شود، می‌تواند میزان کربن آلی خاک (Petersen و همکاران، ۲۰۰۸؛ Mangalassery و همکاران، ۲۰۱۴)، نگهداری آب (از طریق افزایش نفوذ و کاهش رواناب)، راندمان استفاده از مواد غذایی (Triplett و Dick، ۲۰۰۸) و اثربخشی علف‌کش‌ها (Bajwa و همکاران، ۲۰۱۷) را بهبود بخشد.

Mehra و همکاران اشاره کرده‌اند که روش بدون خاک‌ورزی علاوه بر مزایای زیاد برای سلامت خاک، می‌تواند با کاهش اکسیداسیون مواد آلی خاک و مصرف سوخت در هر هکتار، به کاهش تغییرات اقلیمی کمک کند (Mehra و همکاران، ۲۰۱۸). به همین دلیل، این روش توجه کشاورزان را به خود جلب کرده و به یکی از رویکردهای اصلی در کشاورزی در سطح جهان تبدیل شده است (Lal، ۲۰۰۴؛ Singh و همکاران، ۲۰۱۸). بر اساس مطالعات تجربی، چهار حوزه اصلی وجود دارد که برای پذیرش کشاورزی هوشمند اقلیمی (CSA) نیاز به حمایت دارند: (۱) انتشار و توسعه اطلاعات، به‌ویژه برای تطبیق روش‌ها با شرایط محلی، (۲) هماهنگی تلاش‌ها در مدیریت مسائلی مانند کاهش خطر سیل، مدیریت آفات یا حفظ تنوع زیستی، (۳) ایجاد استراتژی‌های ارزیابی ریسک جامع برای افزایش مقاومت در برابر تغییرات اقلیمی، و (۴) دسترسی به موقع و مطمئن به ورودی‌های خاص در سامانه‌های کشاورزی برای افزایش بهره‌وری.

با توجه به ماهیت چندگانه این نیازها، باید تمرکز بیشتری بر ارتباط بین سلامت خاک و تغییرات اقلیمی باشد تا بتوان به چالش‌های جهانی مربوط به تأمین غذا، آب شیرین و محصولات زیست‌توده رسید. این انقلاب باید بر بهبود سلامت خاک و کاهش اثرات

اقلیمی از طریق کشاورزی هوشمند (CSA) تمرکز کند، که یکی از پایه‌های اصلی برای مواجهه با چالش‌های اقلیم، غذا و آب است.

پیشرفت‌های جدید در اصلاح نباتات باعث شده که واریته‌های کشاورزی مقاومت بیشتری در برابر خشکسالی و شرایط شدید اقلیمی مانند دمای بالا و غرقابی پیدا کنند. استفاده از کشت مخلوط، که در آن چند محصول به‌طور هم‌زمان رشد می‌کنند، می‌تواند در زمان تنش آبی یا گرمایی انعطاف‌پذیری را افزایش دهد. در این زمینه، سامانه‌های موفق شامل مدیریت یکپارچه منابع طبیعی است که شامل مدیریت زمین، آب و منابع زیستی می‌شود (Kole و همکاران، ۲۰۱۵؛ Misra، ۲۰۱۴؛ Mehra و همکاران، ۲۰۱۸).

"ظرفیت خاک برای عملکرد" را می‌توان با شش کارکرد اصلی خاک تعریف کرد: (۱) جریان و حفظ آب، (۲) انتقال و نگهداری املاح، (۳) پشتیبانی فیزیکی، (۴) حفظ و چرخه مواد غذایی، (۵) بافر و فیلتر مواد سمی، و (۶) نگهداری از تنوع زیستی و زیستگاه‌ها (Daily و همکاران، ۱۹۹۷؛ Karlen و همکاران، ۱۹۹۷).

بر اساس یک رویکرد اکولوژیک جامع‌تر، Doran و همکارانش سلامت خاک را به‌عنوان "توانایی مداوم خاک برای عملکرد به‌عنوان یک سامانه زنده حیاتی، در چارچوب بوم‌سازگان و کاربری زمین، برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، حفظ کیفیت هوا و آب، و ارتقای سلامت گیاه، حیوان و انسان" تعریف کرده‌اند (Doran و همکاران، ۱۹۹۶). شاخص‌های کیفیت خاک که اغلب توصیه می‌شوند شامل ظرفیت نگهداری آب (AWC) و میزان نفوذ است (Doran و Parkin، ۱۹۹۶؛ Karlen و همکاران، ۱۹۹۷؛ Wienhold و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین، دوازده شاخص دیگر کیفیت خاک شامل ماده آلی خاک (SOM)، ذرات آلی خاک (POM)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، نیتروژن بالقوه معدنی (PMN)، پایداری خاکدانه، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، pH، نیتروژن، فسفر، پتاسیم (K)، منیزیم (Mg)، جرم مخصوص ظاهری (BD) و عمق خاک سطحی هستند.

فضای پر از آب در منافذ خاک و فعالیت‌های آنزیمی، به‌ویژه فعالیت β گلوکوزیداز که در تخریب بقایای گیاهی نقش دارد، به لیست شاخص‌های مهم کیفیت خاک اضافه شده است. این شاخص‌ها با ویژگی‌ها و فرایندهای بیولوژیکی خاک مرتبط هستند (Stott و همکاران، ۲۰۱۰). عوامل خاک‌ورزی می‌توانند به‌طور غیرمستقیم فرایندهای تجزیه بقایا را تحت تأثیر قرار دهند، زیرا این عوامل می‌توانند بر تهویه خاک، مقدار آب، دمای خاک و به‌ویژه ویژگی‌های خاکدانه‌ها تأثیر بگذارند.

Doran و Parkin ویژگی‌های مطلوب خاک را برای جذب، نگهداری و آزاد کردن آب به سمت گیاهان، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی به همراه پنج ویژگی دیگر شناسایی کرده‌اند: (۱) جذب، نگهداری و آزاد کردن مواد غذایی و سایر ترکیبات شیمیایی، (۲) ارتقاء و حفظ رشد ریشه، (۳) حفظ زیستگاه مناسب زیستی خاک، (۴) پاسخ به مدیریت و (۵) مقاومت در برابر تخریب (Doran و Parkin، ۱۹۹۴).

این ویژگی‌ها می‌توانند شیمی آب، ترکیب اتمسفر و فراهمی زیستی عناصر در خاک را تعدیل کنند. ویژگی‌های خاک مانند بافت، تخلخل و رطوبت، همراه با حاصلخیزی خاک، می‌توانند تولید کشاورزی پایدار را تضمین کنند. این پایداری به میزان زیست‌توده، متابولیت‌ها و فعالیت‌های میکروبی خاک در شرایط مناسب رطوبتی بستگی دارد (Lehman و همکاران، ۲۰۱۵).

۳-۴- بیومس میکروبی خاک-ابزاری برای ارزیابی سلامت خاک در زمینه تغییرات

اقلیمی

به گفته Doran و همکارانش، زیست‌توده میکروبی خاک شامل تجزیه‌کننده‌های اولیه و ثانویه، هضم‌کننده‌های هوازی، بی‌هوازی و هضم‌کننده‌های هم‌هوازی و بی‌هوازی است. میکروب‌های خاک به سرعت به شرایط مساعد واکنش نشان می‌دهند، تولیدمثل کرده و مواد غذایی را مصرف می‌کنند تا زمانی که محدودیت‌های محیطی جمعیت آن‌ها را کاهش دهد. این میکروب‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط آینده عمل می‌کنند.

خاک را می‌توان به‌عنوان یک سامانه پیچیده چندجزئی و چندمنظوره تعریف کرد که دارای محدودیت‌های عملیاتی مشخص و یک پیکربندی مکانی خاص است. انواع خاک بسته به تغییرات عوامل تشکیل خاک، از جمله سنگ مادر، اقلیم و توپوگرافی، که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارند، قابل تشخیص هستند. این ویژگی‌ها معمولاً با مداخلات کشاورزی مانند زهکشی، آبیاری، استفاده از آهک (برای بهبود واکنش خاک) و افزودن مواد غذایی گیاه تغییر می‌کنند.

میکروب‌های خاک با تولید ترکیبات چسبنده خارج‌سلولی، ساختمان خاک را در مقیاس نانو با تجمع مواد معدنی و آلی اصلاح می‌کنند. باکتری‌ها و قارچ‌ها با مکانیسم‌های تغذیه‌ای خود این ترکیبات چسبنده را تولید می‌کنند. این ترکیبات به ادغام کلنی‌ها، حفاظت در برابر خشک شدن خاک و چسبیدن به سطوح دیگر ذرات برای تشکیل خاکدانه کمک می‌کنند.

این فرایندهای خاک باعث تغییر در ساختمان خاک و شبکه منافذ می‌شوند، که خود به‌عنوان زیستگاه میکروب‌ها عمل می‌کنند. این تغییرات بر توزیع و دسترسی به آب، انتقال مواد غذایی و گازها به موجودات خاک و حذف محصولات متابولیک تأثیر می‌گذارند. عملکرد میکروبی خاک عمدتاً به میزان کربن تثبیت شده در خاک بستگی دارد. این کربن تثبیت شده به‌عنوان منبع اصلی انرژی و مواد غذایی در سامانه خاک شناخته می‌شود. مقدار کربن تثبیت شده در خاک می‌تواند با تغییراتی در مدیریت زراعی مانند نوع محصول، باقی‌مانده‌های گیاهی و سایر پسماندهای آلی کنترل شود.

ماده آلی خاک می‌تواند به عملکردهای دیگر خاک کمک کند، از جمله با تأمین بارهای سطحی (که به‌عنوان ظرفیت تبادل کاتیونی شناخته می‌شود) و تنظیم ویژگی‌های هیدرولوژیکی مانند قابلیت جذب آب. این ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک آن را به‌عنوان سامانه‌ای منحصر به فرد تعریف می‌کند، که در آن مجموعه‌های زیستی خاک با تغییرات شرایط محیطی سازگار شده و تحت تأثیر فرایندهای انتخاب طبیعی قرار دارند،

که این ویژگی‌ها آن را از سامانه‌های غیرزنده خاک متمایز می‌کند (Fierer و همکاران، ۲۰۲۱؛ Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸).

زیواگان (بیوتا) خاک شامل سامانه‌های پیچیده‌ای هستند که با ادغام فرایندهای کلیدی خاک، شاخص‌های بیولوژیکی را به‌عنوان جزء جدایی‌ناپذیر در ارزیابی سلامت خاک در نظر می‌گیرند. Ritz و همکاران اشاره کرده‌اند که از دهه ۱۹۷۰، افزایش قابل توجهی در شاخص‌های بیولوژیکی بالقوه شناسایی شده است (Ritz و همکاران، ۲۰۰۹). کارکردهای زیست‌محیطی مانند فرایندهای میکروبی و بی‌مهرگان در بسیاری از این شاخص‌های بیولوژیکی گنجانده شده است. توضیح جامع این عوامل نشان می‌دهد که ترکیب مجموعه‌ای از شاخص‌های بیولوژیکی محدود است.

ماده آلی خاک و اجزای آن به‌طور کلی به‌عنوان شاخص‌های بیولوژیکی کلیدی در اکثر روش‌های ارزیابی سلامت خاک شناخته می‌شوند. این به‌دلیل آن است که تلفات ماده آلی خاک عمدتاً به میزان دسترسی و فراهم بودن ماده آلی برای میکروارگانیسم‌ها و تغییرات اقلیمی مانند دما بستگی دارد. بررسی‌ها نشان داده است که می‌توان برخی از عوامل بیولوژیکی را به‌عنوان شاخص‌های بیولوژیکی خاک برای ارزیابی سلامت خاک در نظر گرفت. این شاخص‌ها شامل کربن خاک، تنفس، زیست‌توده میکروبی، ضریب میکروبی و متابولیک، فعالیت آنزیم و سایر موارد هستند (Allen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Fierer و همکاران، ۲۰۲۱).

۳-۵- تنوع زیستی ژنتیکی و کارکردی خاک‌ها، سلامت خاک و تغییرات اقلیمی

تغییرات اقلیمی کنونی تأثیر زیادی بر تنوع زیستی، عملکرد بوم‌سازگان، ساختار جامعه خاک و عملکرد زیواگان (بیوتای) خاک دارد. به‌ویژه، این تغییرات منجر به از بین رفتن گروه‌های کارکردی میکروبی شده است (Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸؛ Hunt و Wall، ۲۰۰۲). مطالعات اولیه بیشتر بر تأثیرات تغییر اقلیم بر تنوع زیستی و بیوشیمی گیاهان تمرکز داشت (Hunt و Wall، ۲۰۰۲). اما مطالعات بعدی نشان دادند که تغییرات

اقلیمی، مانند گرم شدن، تأثیر زیادی بر ریزوسفر، ساختار جامعه هتروتروف خاک و فرایندهای خاک، از جمله تنفس خاک، معدنی شدن نیتروژن و عملکرد کربن بوم سازگان دارد (Bardgett و همکاران، ۲۰۰۸؛ Briones و همکاران، ۲۰۰۹).

تغییرات احتمالی تکاملی می‌توانند به ایجاد و گسترش عوامل و ژن‌های بیماری‌زا منجر شوند. این تغییرات به‌ویژه در پاسخ به تغییرات اقلیمی برای سازگاری با محیط و بقای این عوامل در نظر گرفته می‌شود (French و همکاران، ۲۰۰۹). با پیشرفت دانش در زمینه جامعه میکروبی و عوامل مؤثر بر تغییرات در تنوع و ساختار این جامعه، و همچنین با کمک تکنیک‌های مولکولی جدید (Arias و همکاران، ۲۰۰۵؛ Prosser، ۲۰۰۲)، احتمالاً شاخص‌های جدیدی برای تنوع زیستی ژنتیکی و کارکردی، به‌ویژه در زمینه شبکه غذایی و چرخه مواد غذایی، به فهرست شاخص‌های سلامت بیولوژیکی خاک اضافه خواهند شد. این کار به بهبود شفاف‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر سلامت خاک کمک خواهد کرد (Allen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Fierer و همکاران، ۲۰۲۱).

۳-۶- شاخص‌های کلیدی سلامت خاک برای ارزیابی سلامت خاک در محل تحت

تغییرات اقلیمی

با توجه به ارزیابی سلامت خاک تحت شیوه‌های مدیریت پایدار و سناریوهای تغییر اقلیم، اولویت‌بندی بین شاخص‌های مختلف سلامت خاک ضروری است. بررسی‌های اخیر بیشتر بر اندازه‌گیری شاخص‌های خاص یا مجموعه‌ای از شاخص‌ها برای ارزیابی تغییرات در سلامت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تمرکز کرده‌اند (Moebius و همکاران، ۲۰۰۷؛ Zagal و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال، Stockdale و Watson اشاره کرده‌اند که برای تدوین تصمیمات مدیریتی، باید از چارچوب‌های شاخص موجود استفاده کرد و صرفاً به مقایسه با وضعیت موجود بسنده نکرد (Stockdale و Watson، ۲۰۰۹).

عوامل مرتبط با تغییرات اقلیم جهانی شامل تغییر کاربری اراضی، افزایش دما، افزایش غلظت CO₂ در هوا، افزایش رسوبات نیتروژنی، تغییر در مقدار و شدت بارندگی و توزیع آن، وقوع شرایط اقلیمی شدید و تعاملات کلی این عوامل هستند (شکل ۳-۱).

ارتباطات بین تغییرات اقلیمی، مدیریت زمین و شاخص‌های سلامت خاک نشان داده است که اکثر این عوامل (شکل ۳-۱) بر سلامت خاک تأثیر می‌گذارند. این تأثیر از طریق تأثیر بر تولید اولیه گیاهی (PPP)، تنوع و فعالیت بیوماس میکروبی و جانوری، شامل محصولات درون‌سلولی و برون‌سلولی مانند آنزیم‌ها، و همچنین ارتباطات بین چرخه کلی کربن و نیتروژن، اعمال می‌شود (Bardgett و همکاران، ۲۰۰۸؛ Das و Varma، ۲۰۱۰؛ Kibblewhite و همکاران، ۲۰۰۸؛ Wixon و Balser، ۲۰۰۹).

در نتیجه، از اکثر مطالعات مشخص شده است که برای ارزیابی سلامت خاک، باید حداقل مجموعه داده‌ها شامل شاخص‌های کلیدی زیر باشد:

- شاخص‌هایی که با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ترکیب شوند.
- شاخص‌هایی که ارتباط مهمی با خاک داشته باشند.
- شاخص‌هایی که در شرایط مزرعه قابل اجرا باشند.
- شاخص‌هایی که به تغییرات ناشی از مدیریت کاربری زمین و تغییرات اقلیمی حساس باشند.

- شاخص‌هایی که برای بسیاری از کاربران قابل دسترسی باشند (Karlen و همکاران، ۲۰۰۳؛ Idowu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Lagomarsino و همکاران، ۲۰۰۹؛ Pattison و همکاران، ۲۰۰۸؛ Rao و Siddaramappa، ۲۰۰۸؛ Schindelbeck و همکاران، ۲۰۰۸).

در نهایت، انتخاب شاخص‌های کلیدی سلامت خاک تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی (شکل ۳-۱) باید نشان‌دهنده قابلیت کاهش، سازگاری و انعطاف‌پذیری خاک در برابر تغییرات اقلیمی، چه کوتاه‌مدت و چه بلندمدت، باشد.

۳-۷- نتیجه گیری کلی

شاخص‌های کلیدی سلامت خاک برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم و مدیریت کاربری اراضی شامل پایداری خاکدانه‌ها، ماده آلی خاک، چرخه کربن و نیتروژن، زیست‌توده میکروبی، فعالیت و تنوع میکروبی، و تنوع گیاهی است. استفاده از حداقل مجموعه داده‌ها، مانند شاخص‌های سلامت خاک، کمک می‌کند تا اثرات تغییر اقلیم بر سلامت خاک را درک و پایش کرد. این کار به ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک با کارکردهای اکولوژیکی در زمینه مدیریت پایدار زمین و تغییر اقلیم، شامل هزینه اندازه‌گیری و حساسیت سامانه خاک به تغییرات اقلیمی و مدیریت کاربری اراضی، و تاب‌آوری سامانه کمک می‌کند.

آزمایش‌های سلامت خاک برای مدیریت کشاورزی مفید هستند و می‌توانند در سازمان‌های تحقیقاتی و دولتی برای نظارت بر تلاش‌ها و توسعه سیاست‌ها استفاده شوند (Nelson و همکاران، ۲۰۰۹؛ Pattison و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ritz و همکاران، ۲۰۰۹؛ Schindelbeck و همکاران، ۲۰۰۸). به‌طور کلی، ارزیابی کیفیت خاک در مقیاس‌های بزرگ‌تر مانند مزرعه، حوزه آبخیز، شهرستان، منطقه یا مقیاس ملی دقیق‌تر و کلی‌تر از ارزیابی‌های مقیاس نقطه‌ای یا کرت است (Lehman و همکاران، ۲۰۱۵؛ Creamer و همکاران، ۲۰۲۲؛ Karlen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Coyne و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، لازم است که تلاش‌های بیشتری برای شناسایی اثرات فردی و تعاملی محرک‌های تغییرات جهانی در محیط‌های کنترل‌شده و از طریق آزمایش‌های تحقیقاتی بلندمدت انجام شود. این تلاش‌ها برای اتخاذ استراتژی‌های سازگار با تغییر اقلیم و شامل اقدامات مناسب حفاظت خاک و آب در مزرعه، به‌ویژه در زمین‌های کوچک و محدود، برای اطمینان از کشت پایدار محصول و امنیت غذایی ضروری است (Allen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Costantini و Mocali، ۲۰۲۲؛ Hassan و همکاران، ۲۰۲۲؛ Huang و همکاران، ۲۰۲۲).

منابع مورد استفاده

1. Al-Kaisi, M. M., & Lal, R. (2017). Conservation agriculture systems to mitigate climate variability effects on soil health. In M. M. Al-Kaisi & B. Lowery (Eds.), *Soil health and intensification of agroecosystems* (pp. 79–107). Elsevier Academic Press.
2. Allen, D. E., Singh, B. P., & Dalal, R. C. (2011). Soil health indicators under climate change: a review of current knowledge. In B. P. Singh, A. L. Cowie, & K. Y. Chan (Eds.), *Soil health and climate change: an overview* (pp. 25–45). Springer Heidelberg.
3. Arias, M. E., González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., & Ball, A. S. (2005). Soil health—a new challenge for microbiologists and chemists. *International Microbiology*, 8(1), 13–21.
4. Bajwa, A. A., Walsh, M., & Chauhan, B. S. (2017). Weed management using crop competition in Australia. *Crop Protection*, 95, 8–13.
5. Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *ISME Journal*, 2(8), 805–814.
6. Basher, L. R., & Ross, C. W. (2002). Soil erosion rates under intensive vegetable production on clay loam, strongly structured soils at Pukekohe, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 40(6), 947–961.
7. Blevins, R. L., Smith, M. S., Thomas, G. W., & Frye, W. W. (1983). Influence of conservation tillage on soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(3), 301–305.
8. Bolan, N. S., Hedley, M. J., & White, R. E. (1991). Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume-based pastures. *Plant and Soil*, 134(1), 53–63.
9. Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994–22001.
10. Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K. E., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67–98.
11. Briones, M. J. I., Ostle, N. J., McNamara, N. P., & Poskitt, J. (2009). Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 315–322.

12. Brouder, S. M., & Volenec, J. J. (2008). Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia Plantarum*, 133, 705–724.
13. Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(3), 233–244.
14. Charman, P. E. V., & Murphy, B. W. (2007). *Soils: Their properties and management* (3rd ed.). Oxford University Press.
15. Ching, P. C., & Barber, S. A. (1979). Evaluation of temperature effects on K uptake by corn. *Agronomy Journal*, 71(6), 1040–1044.
16. Christensen, N. L., Bartuska, A. M., Brown, J. H., Carpenter, S., D'Antonio, C., Francis, R., ... Woodmansee, R. G. (1996). The report of the ecological society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6(3), 665–691.
17. Costantini, E. A. C., & Mocali, S. (2022). Soil health, soil genetic horizons, and biodiversity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185, 24–34.
18. Coyne, M. S., Pena-Yewtukhiw, E. M., Grove, J. H., Sant'Anna, A. C., & Mata-Padrino, D. (2022). Soil health— it's not all biology. *Soil Security*, 6, 100051.
19. Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561.
20. Daily, G. C., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. In G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (pp. 365–374). Island Press.
21. Dalal, R. C., Lawrence, P., Walker, J., Shaw, R. J., Lawrence, G., Yule, D., ... Dale, A. (1999). A framework to monitor sustainability in the grains industry. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 39, 605–620.
22. Dalal, R. C., Eberhard, R., Grantham, T., & Mayer, D. G. (2003a). Application of sustainability indicators, soil organic matter and electrical conductivity, to resource management in the northern grains region. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43, 253–259.
23. Dalal, R. C., Wang, W. J., Robertson, G. P., & Parton, W. J. (2003b). Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 41, 165–195.
24. Das, S. K., & Varma, A. (2010). Role of enzymes in maintaining soil health. In G. Shukla & A. Varma (Eds.), *Soil enzymology* (pp. 23–51). *Soil Biology*, vol 22. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_2

25. Datiri, B. C., & Lowery, B. (1991). Effects of conservation tillage on hydraulic properties of a Griswold silt loam soil. *Soil and Tillage Research*, 21(3–4), 257–271.
26. DEFRA. (2005). Impact of climate change on soil functions. Final project report. Research and Development. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA), London.
27. Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868.
28. Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 119–127.
29. Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In J. W. Doran & A. D. Jones (Eds.), *Methods for assessing soil quality* (pp. 25–37). Soil Science Society of America.
30. Doran, J. W., Sarrantonio, M., & Liebig, M. A. (1996). Soil Health Sustain. *Advances in Agronomy*, 56, 1–54.
31. Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11.
32. Ehlers, W., & Claupein, W. (1994). Approaches toward conservation tillage in Germany. In M. R. Carter (Ed.), *Conservation tillage in temperate agroecosystems* (pp. 141–165). Lewis Publishers.
33. FAO and ITPS. (2015). Status of World's Soil Resources (SWSR)—Main Report. Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), and FAO, Rome. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/435200/>
34. FAO. (2016). FAO Statistical Yearbook 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
35. Fierer, N., Wood, S. A., & Bueno de Mesquita, B. P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>
36. French, S., Levy-Booth, D., Samarajeewa, A., Shannon, K. E., Smith, J., & Trevors, J. T. (2009). Elevated temperatures and carbon dioxide concentrations: effects on selected microbial activities in temperate agricultural soils. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25, 1887–1900.

37. GISTEMP Team. (2018). GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies, Washington, DC. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/Fig.A2.txt
38. Glab, T., & Kulig, B. (2008). Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 99(2), 169–178.
39. Gonzales-Prieto, S. J., Villar, M. C., Carballas, M., & Carballas, T. (1992). Nitrogen mineralization and its controlling factors in various kinds of temperate humid-zone soils. *Plant and Soil*, 144, 31–44.
40. Hassan, W., Li, Y., Saba, T., Jabbi, F., Wang, B., Cai, A., & Wu, J. (2022). Improved and sustainable agroecosystem, food security and environmental resilience through zero tillage with emphasis on soils of temperate and subtropical climate regions: a review. *International Soil and Water Conservation Research*, Press. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.005>
41. Herrick, J. E., Brown, J. R., Tugel, A. J., Dhaver, P. L., & Havstad, K. M. (1999). Application of soil quality to monitoring and management: paradigms from rangeland ecology. *Agronomy Journal*, 94(1), 3–11.
42. Huang, B., Yuan, Z., Zheng, M., Liao, Y., Nguyen, K. L., Nguyen, T. H., ... Li, D. (2022). Soil and water conservation techniques in tropical and subtropical Asia: a review. *Sustainability*, 14, 5035. <https://doi.org/10.3390/su14095035>
43. Hunt, H. W., & Wall, D. H. (2002). Modelling the effects of loss of soil biodiversity on ecosystem function. *Global Change Biology*, 8, 33–50.
44. Idowu, O. J., van Es, H. M., Abawi, G. S., Wolfe, D. W., Schindelbeck, R. R., Moebius-Clune, B. N., & Gugino, B. K. (2009). Use of an integrative soil health test for evaluation of soil management impacts. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(3), 214–224.
45. IPCC. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In T. F. Stocker, B. Field, & V. Barros (Eds.), *A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and Cambridge University Press.
46. Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4–10.
47. Karlen, D. L., Gardner, J. C., & Rosek, M. J. A. (1998). Soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, 11(1), 56–60.

48. Karlen, D. L., Ditzer, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145–156.
49. Keesstra, S. D., Geissen, V., Mosse, K., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M., & van Schaik, L. (2012). Soil as a filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 507–516.
50. Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 685–701.
51. Kinyangi, J. (2007). Soil health and soil quality: a review. Draft publication. Available at https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/66582/Soil_Health_Review.pdf. Accessed on June 20, 2022.
52. Kladvko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1-2), 61–76.
53. Kole, C., Muthamilarasan, M., Henry, R., Edwards, D., Sharma, R., Abberton, M., ... Prasad, M. (2015). Application of genomics-assisted breeding for generation of climate resilient crops: Progress and prospects. *Frontiers in Plant Science*, 6, 563. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00563>
54. Lagomarsino, A., Moscatelli, C., Tizio, A. D., Mancinelli, R., Grego, S., & Marinari, S. (2009). Soil biological indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment. *Ecological Indicators*, 9(3), 518–527.
55. Lal, R. (2000). Mulching effects on soil physical quality of an alfisol in western Nigeria. *Land Degradation & Development*, 11(4), 383–392.
56. Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environmental International*, 29(4), 437–450.
57. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
58. Lal, R. (Ed.). (1999). Soil quality and soil erosion. Soil and Water Conservation Society, Ankeny.
59. Lal, R. (2011). Soil health and climate change: an overview. In B. P. Singh, A. L. Cowie, & K. Y. Chan (Eds.), *Soil health and climate change: an overview*. Springer Heidelberg, pp. 3–24.
60. Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42(Supl.), S3–S15.

61. Lehman, R. M., Cambardella, C. A., Stott, D. E., Acosta-Martinez, V., Manter, D. K., Buyer, J. S., ... Karlen, D. L. (2015). Understanding and enhancing soil biological health: the solution for reversing soil degradation. *Sustainability*, 7, 988–1027. <https://doi.org/10.3390/su7010988>
62. Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443–454.
63. Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., & Wang, E. (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties, and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 23(10), 4430–4439.
64. Mackay, A. D., & Barber, S. A. (1984). Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 818–823.
65. Mackay, A. D., & Barber, S. A. (1985). Soil moisture effect on potassium uptake by corn. *Agronomy Journal*, 77(4), 524–527.
66. Magdoff, F. (2001). Concept, components, and strategies of soil health in agroecosystems. *Journal of Nematology*, 33, 169–172.
67. Mangalassery, S., Sjögersten, S., Sparkes, D. L., Sturrock, C. J., Craigon, J., & Mooney, S. J. (2014). To what extent can zero tillage lead to a reduction in greenhouse gas emissions from temperate soils? *Scientific Reports*, 4, 4586. <https://doi.org/10.1038/srep04586>.
68. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment (MEA), World Resources Institute, Washington, DC. Island Press.
69. Mehra, P., Singh, B. P., Kunhikrishnan, A., Cowie, A. L., & Bolan, N. (2018). Soil health and climate change: a critical nexus. In D. Reicosky (Ed.), *Managing soil health for sustainable agriculture*, Volume 1: Fundamentals. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge.
70. Merrill, S. D., Black, A. L., & Bauer, A. (1996). Conservation tillage affects root growth of dryland spring wheat under drought. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 575–583.
71. Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 153–165.
72. Moebius, B. N., van Es, H. M., Schindelbeck, R. R., Idowu, O. J., Clune, D. J., & Thies, J. E. (2007). Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality. *Soil Science*, 172, 895–912.

73. Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., ... Belyaev, V. (2013). Panta Rhei—everything flows: change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256–1275. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>.
74. Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: Plant, animals and the atmosphere*, 4th edn. Academic Press, Boston.
75. Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54, 655–670.
76. Nelson, K. L., Lynch, D. H., & Boiteau, G. (2009). Assessment of changes in soil health throughout organic potato rotation sequences. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131, 220–228.
77. Nolin, M. C., Wang, C., & Caillier, M. J. (1989). Fertility grouping of Montreal Lowlands soil mapping units based on selected soil characteristics of the plow layer. *Canadian Journal of Soil Science*, 69, 525–541.
78. Nuttall, J. G. (2007). Climate change—identifying the impacts on soil and soil health. Department of Primary Industries, Future Farming Systems Research Division, Victoria.
79. Pattison, A. B., Moody, P. W., Badcock, K. A., Smith, L. J., Armour, J. A., Rasiah, V., ... Mayer, R. (2008). Development of key soil health indicators for the Australian banana industry. *Applied Soil Ecology*, 40, 155–164.
80. Petersen, S. O., Schjønnig, P., Thomsen, I. K., & Christensen, B. T. (2008). Nitrous oxide evolution from structurally intact soil as influenced by tillage and soil water content. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(4), 967–977.
81. Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33–41.
82. Potter, S., Cabbage, M., & McCarthy, L. (2017). NASA, NOAA data show 2016 warmest year on record globally. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC. Available at <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>. Accessed 20 June 2022.
83. Prosser, J. I. (2002). Molecular and functional diversity in soil micro-organisms. *Plant and Soil*, 244, 9–17.
84. Qian, B., Gregorich, E. G., Gameda, S., Hopkins, D. W., & Wang, X. L. (2011). Observed soil temperature trends associated with climate change in

- Canada. Journal of Geophysical Research, 116, D2106.
<https://doi.org/10.1029/2010JD015012>.
85. Rao, B. K. R., & Siddaramappa, R. (2008). Evaluation of soil quality parameters in a tropical paddy soil amended with rice residues and tree litters. *European Journal of Soil Biology*, 44, 334–340.
86. Rengel, Z. (2011). Soil pH, soil health and climate change. In B. P. Singh, A. L. Cowie, & K. Y. Chan (Eds.), *Soil health and climate change (Soil Biology Series 29)*, pp. 69–85). Springer.
87. Rhodes, C. J. (2014). Soil erosion, climate change and global food security: Challenges and strategies. *Science Progress*, 97(2), 97–153.
88. Riley, J. (2001). Multidisciplinary indicators of impact and change: Key issues for identification and summary. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 87, 245–259.
89. Ritz, K., Black, H. I. J., Campbell, C. D., Harris, J. A., & Wood, C. (2009). Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecological Indicators*, 9, 1212–1221.
90. Rogers, C. E., & McCarty, J. P. (2000). Climate change and ecosystems of the mid-Atlantic region. *Climate Research*, 14(3), 235–244.
91. Salem, H. M., Valero, C., Muñoz, M. Á., Rodríguez, M. G., & Silva, L. L. (2015). Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, 237–238, 60–70.
92. Sarker, J. R., Singh, B. P., Cowie, A. L., Fang, Y., Collins, D., Dougherty, W. J., Singh, B. K. (2018a). Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 22–38.
93. Sarker, J. R., Singh, B. P., Dougherty, W. J., Fang, Y., Badgery, W., Hoyle, F. C., Dalal, R. C., Cowie, A. L. (2018b). Impact of agricultural management practices on the nutrient supply potential of soil organic matter under long-term farming systems. *Soil and Tillage Research*, 175, 71–81.
94. Schindelbeck, R. R., van Es, H. M., Abawi, G. S., Wolfe, D. W., Whitlow, T. L., Gugino, B. K., ... Moebius Clune, B. N. (2008). Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 88, 73–80.
95. Schjønning, P., Elmholt, S., & Christensen, B. T. (2004). Soil quality management—concepts and terms. In P. Schjønning, S. Elmholt, & B. T.

- Christensen (Eds.), *Managing soil quality: Challenges in modern agriculture*. CAB International.
96. Singh, B. P., Setia, R., Wiesmeier, M., & Kunhikrishnan, A. (2018a). Agricultural management practices and soil organic carbon storage. In B. Singh (Ed.), *Soil Carbon Storage: Modulators, Mechanisms and Modeling*, 1st edn (pp. 207–244). Academic Press.
 97. Singh, B. P., Cowie, A. L., & Chan, K. Y. (2011). *Soil health and climate change (Soil Biology Series 29)*. Springer.
 98. Sojka, R. E., Bjorneberg, D. L., Trout, T. J., Strelkoff, T. S., & Nearing, M. A. (2007). The importance and challenge of modelling irrigation-induced erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(3), 153–162.
 99. Stenberg, B. (1999). Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil & Plant Science*, 49, 1–24.
 100. Stenberg, B., Pell, M., & Torstensson, L. (1998). Integrated evaluation of variation in biological, chemical, and physical soil properties. *Ambio*, 27, 9–15.
 101. Stockdale, E. A., & Watson, C. A. (2009). Biological indicators of soil quality in organic farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24, 308–318.
 102. Stott, D. E., Andrews, S. S., Liebig, M. A., Wienhold, B. J., & Karlen, D. L. (2010). Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework (SMAF). *Soil Science Society of America Journal*, 74, 107–119.
 103. Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328.
 104. Titeux, N., Henle, K., Jean-Baptiste, M., Regos, A., Geijzendorffer, I. R., Cramer, W., ... Brotons, L. (2016). Biodiversity scenarios neglect future land-use changes. *Global Change Biology*, 22(7), 2505–2515.
 105. Triplett, G. B., & Dick, W. A. (2008). No-tillage crop production: A revolution in agriculture! *Agronomy Journal*, 100(S), S153–S165.
 106. Ussiri, D. A. N., Lal, R., & Jarecki, M. K. (2009). Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 247–255.

107. Wienhold, B. J., Karlen, D. L., Andrews, S. S., & Stott, D. E. (2009). Protocol for soil management assessment framework (SMAF) soil indicator scoring curve development. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24, 260–266.
108. Wild, A. (1993). Soils in relation to the environment. In A. Wild (Ed.), *Soils and the Environment* (pp. 107–108). Cambridge University Press.
109. Wixon, D. L., & Balser, T. C. (2009). Complexity, climate change and soil carbon: A systems approach to microbial temperature response. *Systems Research and Behavioral Science*, 26, 601–620.
110. Zagal, E., Muñoz, C., Quiroz, M., & Córdova, C. (2009). Sensitivity of early indicators for evaluating quality changes in soil organic matter. *Geoderma*, 151, 191–198.

فصل ۴

تأثیر خاک بر کیفیت آب

چکیده

تلفات خاک از سطوح بدون پوشش گیاهی بیشتر از سطوح دارای پوشش است. برای کاهش فرسایش خاک، ممکن است پوشش گیاهی بر اساس نیازهای محلی استفاده شود. تمامی فعالیت‌های کشاورزی و جنگل‌داری، از جمله پروژه‌های توسعه‌ای مثل راه‌سازی، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق هستند. این برنامه‌ریزی باید فرسایش و رسوب در آبراهه‌ها را به حداقل برساند و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی را مدیریت کند.

کلمات کلیدی: بوم‌سازگان آبی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، جنگل، حفاظت از آب، خاک، کاربری اراضی

کلمات اختصاری

نیاز بیولوژیکی اکسیژن	BOD
جلبک سبز آبی	BGA
شورای علوم و فناوری کشاورزی	CAST
اکسیژن محلول	DO
سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد	FAO
نیروگاه برق آبی	HEPP
پتاسیم	K
پوشش زمین/کاربری اراضی	LULC
فسفر	P
مواد آلی خاک	SOM

SWAT
ابزار ارزیابی خاک و آب
UNESCO
یونسکو، سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی سازمان ملل متحد
Zn
روی

۴-۱- مقدمه

آب، اساس زندگی و به عبارتی، حیات به وجود آب وابسته است. آب شیرین، نقش مهمی در بقای حیات روی زمین دارد. اگرچه ۷۰ درصد سطح زمین پوشیده از آب است، اما فقط حدود ۱/۷ درصد آن در قطب‌ها وجود دارد و تنها ۰/۷۷ درصد آب جهان به صورت آب‌های زیرزمینی شیرین، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و رطوبت خاک در دسترس است (Baker و همکاران، ۲۰۱۶؛ Chang، ۲۰۱۳؛ Shiklomanov، ۱۹۹۸؛ Subramanya، ۲۰۰۸؛ UNESCO، ۱۹۷۱).

زندگی روزمره انسان و کشاورزی به آب، که منبعی محدود است، وابسته است و کیفیت آب همیشه یکی از نگرانی‌های اصلی بوده است. از طرف دیگر، استفاده از اراضی کشاورزی تأثیر زیادی بر کیفیت آب دارد، و در این میان، خاک نقش مهمی در فیلتر طبیعی و تنظیم‌کننده مهم در حفظ و بهبود کیفیت منابع آب عمل می‌کند.

مقدار و کیفیت آب در یک منطقه تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند (۱) نوع کاربری اراضی، مثلاً مسکونی، کشاورزی، مرتع یا جنگل، (۲) پوشش گیاهی مانند درختان، علف‌ها و بوته‌ها، (۳) اقلیم، (۴) زمین‌شناسی، (۵) توپوگرافی، و (۶) ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک قرار دارد. این عوامل همگی بر جریان و کیفیت آب رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارند (Ballantine و همکاران، ۲۰۰۹؛ Flood و همکاران، ۲۰۲۲؛ Hawthorne و همکاران، ۲۰۱۳؛ Johnson و همکاران، ۱۹۹۷؛ Koralay و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rehman و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sensoy و Kara، ۲۰۱۳؛ Sthiannopkao و همکاران، ۲۰۰۶).

کیفیت آب، ارتباط مستقیمی با سلامت بوم‌سازگان‌های آبی دارد. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب به میزان بارندگی، فرسایش خاک و نوع کاربری زمین بستگی دارد. این عوامل بر دما، میزان اکسیژن محلول، مواد غذایی و رسوبات معلق در آب تأثیر و در نتیجه بر بوم‌سازگان آبی و هیدرولوژی منطقه اثر می‌گذارند (Ashraf و Issaka, ۲۰۱۷؛ Osterholz و همکاران, ۲۰۲۱؛ Sthiannopkao و همکاران, ۲۰۰۶؛ Welde و Gebremariam, ۲۰۱۷؛ Zimnicki و همکاران, ۲۰۲۰).

شاخص کیفیت آب خاک که توسط Doran و Parkin ایجاد شده، کیفیت آب سطحی و زیرزمینی را در نظر می‌گیرد. همچنین، شیوه‌های مدیریت خاک مانند استفاده از آفت‌کش‌ها و کودها می‌تواند با تولید یا مصرف گازهایی مانند دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن، بر کیفیت هوا تأثیر بگذارد (Doran و Parkin, ۱۹۹۴). تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش کربن آلی در خاک تأثیر کمی بر حفظ رطوبت دارد و این تأثیر در خاک‌های شنی بیشتر و در خاک‌های رسی کمتر است (CAST, ۱۹۹۲؛ Doran و Safley, ۱۹۹۷؛ Minasny و Mcbratney, ۲۰۱۷؛ Rolston و همکاران, ۱۹۹۳).

۲-۴- تأثیر زمین‌شناسی بر کیفیت آب

نوع و ساختار سنگ‌های تشکیل‌دهنده زمین در یک حوضه بر نوع خاک آن تأثیر می‌گذارد. میزان فرسایش خاک در مزرعه به نوع خاک بستگی دارد و فرسایش سنگ بستر نیز به نوع خاکی که روی آن قرار دارد بستگی دارد؛ برای مثال، اگر خاک روی سنگ بستر شنی باشد، فرسایش بیشتری نسبت به خاک رسی رخ می‌دهد.

ساختارهای زمین‌شناسی همچنین باعث تفاوت در مقدار مواد غذایی مانند فسفر می‌شوند که همراه با رسوبات از بخش‌های مختلف زمین خارج می‌شوند. این تغییرات تحت تأثیر شرایط اقلیمی و نوع کاربری زمین نیز قرار دارند (Ballantine و همکاران, ۲۰۰۹). ترکیب شیمیایی و چگالی رسوبات به نوع سنگ‌های زیرین، مواد معدنی موجود

در رس‌ها، ساختار خاک، تخریب جنگل‌ها و فعالیت‌های کشاورزی در حوزه آبخیز بستگی دارد (Duarte و Gioda، ۲۰۱۴).

۴-۳- تأثیر توپوگرافی بر کیفیت آب

فرسایش خاک به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی قرار دارد، که در این میان شیب و طول زمین اهمیت بیشتری دارند. این دو عامل نقش اصلی در ایجاد رواناب سطحی و فرسایش خاک دارند. نرخ فرسایش و رواناب با تغییرات بارندگی و ویژگی‌های زمین متفاوت است (Rehman و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sensoy و Kara، ۲۰۱۳).

۴-۴- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب تحت تأثیر اقلیم

بارندگی‌های شدید یا تندبادها باعث فرسایش خاک زیاد از زمین‌های آیش بدون پوشش گیاهی می‌شوند. ناپایداری در الگوی اقلیمی نیز به فرسایش خاک کمک می‌کند، هرچند که این فرایند در فصل‌های مختلف تغییر می‌کند. در دوره‌های مرطوب، مقدار خاک‌های آماده فرسایش بیشتر از دوره‌های خشک است. بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی خاک‌های فرسایش‌پذیر نشان می‌دهد که عناصری مانند پتاسیم (K)، فسفر (P) و روی (Zn) در آن‌ها وجود دارند و مقدار فسفر (P) در دوره‌های مرطوب در آن‌ها بیشتر است (Duarte و Gioda، ۲۰۱۴).

۴-۵- تأثیر ویژگی‌های خاک بر کیفیت آب

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مانند بافت، ساختمان، تخلخل، عمق، میزان مواد آلی، شوری و پوشش گیاهی در فرسایش خاک نقش مهمی دارند. مواد آلی خاک (SOM) یکی از عوامل اصلی در تعیین میزان حساسیت خاک به فرسایش است.

هرچه مقدار مواد آلی خاک بیشتر باشد، فرسایش خاک کمتر می‌شود. از طرفی، مواد آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب، ساختمان، نفوذپذیری و تخلخل خاک را بهبود می‌بخشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که آب بیشتری وارد خاک شود و پس از نفوذ، آب اضافی به‌طور ایمن به رودخانه‌ها برسد (Chang, ۲۰۱۳؛ Koralay و همکاران، ۲۰۱۸).

۴-۶- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب تحت تأثیر پوشش گیاهی

پوشش گیاهی نقش مهمی در کاهش فرسایش خاک دارد. درختان، درختچه‌ها و گیاهان دیگر می‌توانند با کاهش اثرات آب‌وهوا و ایجاد پوششی روی خاک، از آن در برابر بارندگی و رواناب محافظت کنند. این پوشش گیاهی باعث افزایش نفوذ و ذخیره آب در خاک، کاهش فرسایش و حفظ رطوبت خاک می‌شود (Fen-Li, ۲۰۰۶؛ García-Ruiz, ۲۰۱۰؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۵). به همین دلیل، گیاهان جنگلی با کاهش تأثیر بارش بر خاک، افزایش ذخایر آب زیرزمینی و کنترل جریان سطحی و زهکشی آب به رودخانه، از فرسایش خاک جلوگیری می‌کنند (Biddoccu و همکاران، ۲۰۲۰؛ Guerra و همکاران، ۲۰۲۰؛ Miyata و همکاران، ۲۰۰۹).

۴-۷- تأثیر حوزه آبخیز بر کیفیت آب

حوضه یک ساختار توپوگرافی است که با خط‌الرأس از حوضه‌های مجاور جدا می‌شود و آب بارندگی اضافی را از طریق یک خروجی تخلیه می‌کند. مدیریت آبخیزداری با هدف کنترل فرسایش، مدیریت سیلاب‌ها و تولید آب با کیفیت و کمیت بالا انجام می‌شود. این کار با در نظر گرفتن شرایط اجتماعی-اقتصادی و منابع طبیعی حوضه صورت می‌گیرد.

انواع کاربری زمین مانند جنگل، کشاورزی و مرتع هیدرولوژی حوزه آبخیز را تعیین می‌کنند. این الگوهای کاربری زمین به شدت بر فرسایش خاک و کیفیت آب تأثیر دارند.

همچنین، فرسایش خاک و کیفیت آب با ویژگی‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی حوضه، مانند نیروگاه‌های برق‌آبی (HEPP) و الگوهای کاربری زمین، ارتباط دارند. ویژگی‌های خاک و کیفیت و کمیت آب تحت تأثیر مناطقی مانند مزارع، مناطق روستایی و شهری، اراضی تغییر یافته از جنگل و مرتع، و مناطق تحت تأثیر ساخت‌وسازهای شهری، صنعتی و نیروگاه‌های برق‌آبی قرار می‌گیرند. تغییرات اراضی و ساخت‌وسازهای مربوط به توسعه اجتماعی ممکن است مقاومت خاک را در برابر عوامل خارجی کاهش دهد و به این ترتیب، فرسایش خاک را افزایش دهد. این فرایندها می‌توانند باعث افزایش رسوب در آبراهه‌ها و تأثیر منفی بر کیفیت آب شوند که برای همه موجودات زنده، چه در بوم‌سازگان‌های خشکی و آبی، مهم است. به همین دلیل، کنترل رسوب باید در برنامه‌ریزی حوضه‌ای به شدت مورد توجه قرار گیرد (Ashraf و Issaka, ۲۰۱۷؛ Koralay و همکاران, ۲۰۱۸).

۴-۷-۱- اثر فرسایش خاک بر کیفیت آب بوم‌سازگان آبریان و هیدرولوژی حوضه

فرسایش خاک می‌تواند بر تراکم خاک، نفوذ، ظرفیت نگهداری آب، پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق تأثیر بگذارد و به این ترتیب، چرخه هیدرولوژیکی یک حوضه را تغییر دهد. مواد معدنی و اکسیژن از طریق جریان آب به رودخانه‌ها و آبراهه‌ها وارد آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌شوند. اکسیژن محلول و مواد غذایی معدنی آزاد شده از فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی در آب، برای ادامه حیات در بوم‌سازگان‌های زمینی، آبی و خاکی ضروری هستند.

افزایش فرسایش خاک باعث افزایش رسوبات و مواد جامد معلق در رودخانه‌ها می‌شود که می‌تواند مشکلات زیادی در محیط رودخانه ایجاد کند و تراکم ماهیان و بی‌مهرگان را کاهش دهد. این مشکل برای تالاب‌ها و سایر محیط‌های آبی داخلی نیز وجود دارد. سطح مطلوب مواد جامد معلق برای ماهی‌ها حدود ۲۵ میلی‌گرم در لیتر است، در حالی که شرایط نامطلوب به بالای ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد. علاوه بر

غلظت، جریان و غلظت مواد جامد معلق نیز برای تخم‌ریزی و بقای ماهی‌ها اهمیت دارد (شکل ۴-۱).

رسوب مواد جامد معلق بر روی سنگ‌ها، محل‌های تخم‌گذاری و زیستگاه‌ها، شامل فضاها، تخم‌ریزی و حفره‌های حفاظتی برای مراحل مختلف رشد ماهی و سایر جانوران آبی، تأثیر می‌گذارد. این رسوبات می‌توانند آبشش‌ها و اندام‌های تنفسی ماهی‌ها و سایر جانوران آبی را مسدود کرده و زندگی آن‌ها را دشوار کنند. همچنین، افزایش کدورت ناشی از مواد جامد معلق می‌تواند ورودی نور مورد نیاز برای فتوسنتز گیاهان آبی را کاهش دهد، که منجر به کاهش مواد غذایی برای جانوران آبی می‌شود.

افزایش غلظت جامدات معلق باعث افزایش کدورت و کاهش شفافیت و شدت نور در آب می‌شود. این شرایط مانع از تولید گیاهان سبز آبی از طریق فتوسنتز و بر عرضه طبیعی غذا برای جانوران و ماهیان آبی تأثیر می‌گذارد. مسمومیت جانوران اعماق دریا نیز به دلیل ورود مقادیر زیاد مواد جامد معلق از آبراهه‌ها و کانال‌های آبیاری ایجاد می‌شود. علاوه بر این مشکلات، تجمع مواد معلق در نه‌رها، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دیگر زیستگاه‌های آبی باعث کاهش سطح اکسیژن می‌شود. این عوامل بر بقای ماهی‌ها، گیاهان آبی و دیگر جانوران تأثیر می‌گذارد (Belal و همکاران، ۲۰۱۶؛ Bregnalle، ۲۰۱۵؛ Chang، ۲۰۱۳؛ Pfeifer و همکاران، ۲۰۰۰؛ Reynolds و همکاران، ۱۹۸۹؛ Townsend و همکاران، ۲۰۰۹).

استفاده از گیاهان پوششی در زمین‌های کشاورزی به عنوان روشی مؤثر برای حفاظت از خاک و آب شناخته می‌شود. این گیاهان می‌توانند خدمات بوم‌سازگانی زیادی از جمله کاهش رواناب و فرسایش، افزایش مواد آلی خاک، بهبود تردد در مزرعه، تصفیه آب، تأمین آب، حفاظت از تنوع زیستی و کنترل علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها ارائه دهند (Garcia و همکاران، ۲۰۱۸؛ Hall و همکاران، ۲۰۲۰؛ Winter و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که با افزایش پوشش گیاهی در زمین‌های کشاورزی، نرخ فرسایش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل ۴-۲).

یک آزمایش نظارتی ۱۴ ساله در ایتالیا نشان داده است که میانگین تلفات خاک از ۱۳/۸۵ تن در هکتار به ۱/۸ تن در هکتار در سال کاهش یافته است. نتایج مشابهی در پرتغال و فرانسه نیز مشاهده شده است، جایی که در آزمایش‌های سه ساله، تلفات خاک از ۴۸/۱ تن در هکتار به ۲۷/۹ تن در هکتار کاهش یافته است (Biddoccu و همکاران، ۲۰۱۶؛ Gomez و همکاران، ۲۰۱۱).

گاهی احیای گیاهان پوششی به دلیل بارندگی‌های شدید که ممکن است باعث تلفات زیادی در خاک شود، با شکست مواجه می‌شود (Gomez و همکاران، ۲۰۱۱). نیازهای اجتماعی محلی نیز می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای برای موفقیت حفاظت با استفاده از محصولات پوششی در طول فصل بارانی، مانند رشد موفق تاک انگور، باشد.

در مناطق خشک مدیترانه‌ای، استفاده از گیاهان پوششی دائمی برای جلوگیری از رقابت بر سر آب خاک میان دو محصول به‌طور معمول دنبال نمی‌شود (Celette و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ruiz-Colmenero و همکاران، ۲۰۱۱). کشاورزان در این مناطق عادت دارند که باغ‌های میوه را با خاک بدون پوشش یا گیاهان پوششی موقت برای چهار تا هفت ماه در سال آماده کنند (Salome و همکاران، ۲۰۱۶). اما در شرایط مرطوب‌تر اروپای مرکزی، معمولاً محصولات پوششی دائمی کشت می‌شود (Biddoccu و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lefèvre و همکاران، ۲۰۲۰).

تبدیل زمین‌های کشاورزی به سکونتگاه‌ها، پاک‌سازی مناطق ساحلی، و تبدیل اراضی جنگلی و مرتعی به مناطق کشاورزی و ساخت جاده‌ها باعث افزایش فرسایش خاک و در نتیجه کاهش کیفیت آب می‌شود (Morris و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rice و Wallis، ۱۹۶۲). این تغییرات موجب کاهش تعداد گیاهان و جانوران کوچک و بزرگ، و پوشش گیاهی در آبراهه‌ها و دیگر زیستگاه‌های آبی و خشکی می‌شود.



شکل ۴-۱- رسوب گذاری بستر رودخانه



شکل ۴-۲- محصول پوششی نخود سیاه

۴-۷-۱-۱- اثر فرسایش خاک بر دمای آب

تاج پوشش و پوشش کف جنگل با ریشه‌ها و مواد آلی می‌تواند آب را بهتر نگهداری کند و نفوذ و انتقال آب در خاک را افزایش دهد، که به کاهش رواناب سطحی و فرسایش خاک کمک می‌کند. به دلیل تأثیر گیاهان جنگلی بر کاهش دبی حداکثر در هیدروگراف جریان، زمان وقوع اوج دبی به تأخیر می‌افتد. این تأخیر باعث کاهش بار معلق رسوب در جریان می‌شود (Li و همکاران، ۲۰۱۴).

خاک فرسایش یافته که از زمین اولیه جدا شده، به آب‌ها و رودخانه‌ها حمل می‌شود و مقدار مواد جامد معلق در آب را افزایش می‌دهد. این افزایش مواد جامد معلق باعث افزایش دمای آب سطحی می‌شود. دمای بالاتر آب، تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب و خاک ایجاد می‌کند. به‌طور مثال، ذرات جامد به‌دلیل تغییرات دمایی، کمتر و آهسته‌تر ته‌نشین می‌شوند و بیشتر در آب باقی می‌مانند. همچنین، فرایند شسته شدن و انتقال مواد محلول در آب از خاک کاهش می‌یابد.

با افزایش دمای آب، غلظت اکسیژن محلول کاهش می‌یابد و تبخیر آب بیشتر می‌شود. این شرایط برای تکثیر جلبک‌های سبزآبی (BGA) و سایر میکروارگانیسم‌های مخرب مناسب است و کیفیت آب را بیشتر کاهش می‌دهد. با این حال، زیست‌توده جلبک‌ها می‌تواند به‌عنوان مالچ برای حفظ رطوبت خاک در مزارع کشاورزی استفاده شود.

معمولاً موجودات آبی می‌توانند با تغییرات فصلی دمای آب سازگار شوند، اما افزایش خارج از فصلی دما می‌تواند بر رشد ماهی‌ها و بی‌مهرگان تأثیر بگذارد. افزایش یک یا دو درجه‌ای دما می‌تواند بر زندگی ماهی‌ها از جمله رشد، مهاجرت، حرکت، تولیدمثل و تخم‌گذاری تأثیر منفی بگذارد. همچنین، افزایش دما ممکن است باعث بروز بیماری‌های ماهی شود که می‌تواند به‌اپیدمی تبدیل شده و منجر به مرگ ماهی‌های متعدد شود (MacDonald و همکاران، ۱۹۹۱؛ Gyawali و همکاران، ۲۰۱۳؛ Li و Migliaccio، ۲۰۱۱).

۴-۷-۱-۲- اثر فرسایش خاک بر اکسیژن محلول در آب

زندگی آبزیان به غلظت اکسیژن محلول (DO) در محیط وابسته است و این غلظت باید بیشتر از پنج میلی‌گرم در لیتر باشد. در شرایط با DO پایین، بقایای حشرات آبی و تخم‌های ماهی کاهش می‌یابد. انباشت رسوبات می‌تواند باعث کمبود اکسیژن، به‌ویژه در جریان‌های آبی با واریزه در رودخانه‌ها شود. این کمبود اکسیژن بر متابولیسم موجودات

آبزی تأثیر می‌گذارد و منجر به انتشار آمونیاک و ترکیبات کربنی سمی می‌شود (Chang, ۲۰۱۳).

۴-۸- تأثیر پوشش اراضی / کاربری اراضی بر کیفیت آب

طبقه‌بندی کاربری و پوشش اراضی، یکی از عوامل مهم در تعیین فرسایش خاک است. بیشترین فرسایش در شالیزارها و کمترین آن در مناطق جنگلی مشاهده می‌شود. مهم‌ترین اثر جنگل بر رسوب‌دهی به دلیل نحوه و آثار استفاده از ماشین‌آلات در عملیات‌های جنگلی و قطع درختان است. همچنین، کیفیت آب زمانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که فعالیت‌های جنگل‌داری بدون رعایت قوانین مربوطه انجام شود (Brown و Binkley, ۱۹۹۴).

یک مطالعه با استفاده از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) انجام شد که نتایج آن نشان داد که افزایش زمین‌های بدون پوشش و مناطق کشاورزی با افزایش میانگین سالانه جریان آب و میزان رسوب رابطه مستقیم دارد (Welde و Gebremariam, ۲۰۱۷). فرایندهای اکولوژیکی در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها تحت تأثیر سطوح نیتروژن و فسفر در آب قرار می‌گیرند. این افزایش مواد غذایی می‌تواند سطح باروری آب را بالا ببرد و در نتیجه باعث کاهش سطح اکسیژن محلول (DO) و کاهش تنوع گونه‌ها شود.

افزودن مواد غذایی زیاد، به‌ویژه نیترات‌ها و فسفات‌ها، باعث شکوفایی جلبک‌ها و علف‌های هرز آبزی می‌شود. این موضوع ورود نور خورشید را محدود می‌کند و کدورت آب و نیاز بیولوژیکی به اکسیژن (BOD) را افزایش می‌دهد، که در نتیجه سطح اکسیژن محلول (DO) کاهش می‌یابد. گزارش‌ها نشان می‌دهند که افزایش میزان فسفر در رسوبات رودخانه‌ای از نواحی تحت تأثیر جامعه روستایی و شهرک‌های صنعتی مشاهده شده است (Walling و Owens, ۲۰۰۲).

فرسایش خاک به کاهش حاصلخیزی خاک منجر می‌شود و رسوب معلق همراه با مواد غذایی و شیمیایی کشاورزی را افزایش می‌دهد. این امر به کاهش کیفیت آب و

شاخص‌های محیط‌زیست منجر می‌شود (Brown، ۱۹۸۵؛ Sthiannopkao و همکاران، ۲۰۰۶).

کاهش مقاومت خاک به دلیل تغییرات کاربری زمین باعث افزایش تمایل آن به فرسایش می‌شود. فعالیت‌های مربوط به تغییر کاربری اراضی به افزایش میزان رسوب در نهرها منجر می‌شود. همچنین، پوشش زمین، اقلیم، زمین‌شناسی، توپوگرافی و ویژگی‌های مختلف خاک بر فرسایش خاک در یک حوزه آبخیز تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، افزایش جمعیت جلبکی و همچنین افزایش رسوبات و مواد آلی منتقل شده به رودخانه اصلی به دلیل کاهش پوشش گیاهی است (Molina و Campo، ۲۰۱۲).

با توجه به مشکلاتی مانند کاهش کیفیت آب و کاهش جمعیت بی‌مهرگان، ماهیان و دیگر موجودات آبی، بوم‌سازگان‌های آبی باید بخشی از برنامه‌ریزی مکان‌محور در حوضه باشند. این برنامه‌ریزی باید بر ارزش منابع آب و کیفیت آن تأکید کرده و فرسایش خاک را کاهش دهد.

برای مثال، مناطق ساحلی می‌توانند با ایجاد سایه، دمای آب را کاهش دهند و با کاهش تولید رسوب و فیلتر کردن کود و مواد شیمیایی، کیفیت آب را بهبود بخشند. بنابراین، این مناطق در کناره‌های رودخانه، تأثیر زیادی بر کیفیت آب و فرسایش خاک دارند. نیاز است که این مناطق به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند تا از مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی آن‌ها استفاده شود (Gyawali و همکاران، ۲۰۱۳؛ Johnson و همکاران، ۱۹۹۷؛ Mello و همکاران، ۲۰۱۷؛ Sthiannopkao و همکاران، ۲۰۰۷؛ Wear و Greis، ۲۰۰۲).

۴-۹- نتیجه‌گیری کلی

فرسایش خاک نقش مهمی در کاهش کیفیت پایدار آب دارد. تلفات خاک از سطح‌های بدون پوشش گیاهی بیشتر از سطح‌های دارای پوشش است. پوشش‌های گیاهی می‌توانند در جلوگیری از فرسایش خاک مفید باشند، اما این به نیازهای جامعه محلی بستگی دارد.

عملیات جنگل‌داری مانند قطع درختان، حمل و نقل و ساخت جاده‌ها باید با دقت انجام شود و کمترین آسیب به محیط را به همراه داشته باشد.

در مزارع کشاورزی، پوشش‌های گیاهی که کشاورزان از آن‌ها استفاده می‌کنند، می‌توانند در حفظ خاک و کاهش تلفات فرسایش مؤثر باشند. زمین‌های کشاورزی که دچار فرسایش می‌شوند، مواد غذایی خود را از دست می‌دهند. حفظ خاک در نواحی خاص به حفظ کیفیت آب و محیط سالم کمک می‌کند.

منابع مورد استفاده

1. Baker, B., Aldridge, C., & Ome, A. (2016). Water: availability and use. Mississippi State University Extension, Publication 3011 (POD-11-16). Mississippi State University, Mississippi State.
2. Ballantine, D. J., Walling, D. E., Collins, A. L., & Leeks, G. J. L. (2009). The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment in contrasting lowland agricultural catchments in the UK. *Geoderma*, 151, 141–149.
3. Belal, A. A., El-Sawy, M. A., & Dar, M. A. (2016). The effect of water quality on the distribution of macrobenthic fauna in Western Lagoon and Timsah Lake, Egypt. I. *Egypt Journal of Aquatic Research*, 42, 437–448.
4. Biddoccu, M., Ferraris, S., Opsi, F., & Cavallo, E. (2016). Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North-West Italy). *Soil and Tillage Research*, 155, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.005>
5. Biddoccu, M., Guzman, G., Capello, G., Thielke, T., Strauss, P., Winter, S., ... & Cavallo, E. (2020). Evaluation of soil erosion risk and identification of soil cover and management factor (C) for RUSLE in European vineyards with different soil management. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.07.003>
6. Bregnballe, J. (2015). A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, and EUROFISH International Organisation, Copenhagen, p. 56. Available at <https://www.fao.org/3/i4626e/i4626e.pdf>. Accessed 21 June 2022.

7. Brown, T. C., & Binkley, D. (1994). Effect of management on water quality in North American forests. General Technical Report RM-248. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, Fort Collins, CO.
8. Brown, G. W. (1985). Controlling nonpoint source pollution from silvicultural operations: what we know and don't know. In: Proceedings of a national conference: perspectives on nonpoint source pollution. Environmental Protection Agency, Washington, DC, pp. 332-333.
9. CAST. (1992). Preparing US agriculture for global climate change. Task force report no. 119. Council for Agricultural Science and Technology (CAST), Ames.
10. Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 29, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007>
11. Chang, M. (2013). Forest hydrology: an introduction to water and forests, 3rd edn. CRC Press, Boca Raton, p. 72.
12. Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA (eds) Defining soil quality for a sustainable environment, vol 35. American Society of Agronomy Special Publication, Madison, pp. 3-21. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
13. Doran, J. W., & Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: Pankhurst C, Doube BM, Gupta V (eds) Biological indicators of soil health. CABI Publishing, Wallingford, pp. 1-28.
14. Duarte, A. F., & Gioda, A. (2014). Inorganic composition of suspended sediments in the Acre River, Amazon Basin, Brazil. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(1), 3-15.
15. Fen-Li, Z. (2006). Effect of vegetation changes on soil erosion on the loess plateau. *Pedosphere*, 16(4), 420-427.
16. Flood, M. T., Hernandez-Suarez, J. S., Nejadhashemi, A. P., Martin, S. L., Hyndman, D., & Rose, J. B. (2022). Connecting microbial, nutrient, physiochemical, and land use variables for the evaluation of water quality within mixed-use watersheds. *Water Research*, 219, 118526. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118526>

17. Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., & Metay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>
18. García-Ruiz, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. *CATENA*, 81, 1–11.
19. Gomez, J. A., Llewellyn, C., Basch, G., Sutton, P. B., Dyson, J. S., & Jones, C. A. (2011). The effects of cover crops and conventional tillage on soil and runoff loss in vineyards and olive groves in several Mediterranean countries. *Soil Use and Management*, 27, 502–514. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00367.x>
20. Guerra, C. A., Rosa, I. M. D., Valentini, E., Wolf, F., Filipponi, F., Karger, D. N., ... & Eisenhauer, N. (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, 35, 823–842. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00984-z>
21. Gyawali, S., Techato, K., Yuangyai, C., & Musikavong, C. (2013). Assessment of relationship between land uses of riparian zone and water quality of river for sustainable development of river basin—a case study of U-Taoao river basin, Thailand. *Procedia Environmental Science*, 17, 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.041>
22. Hall, R. M., Penke, N., Kriechbaum, M., Kratschmer, S., Jung, V., Chollet, S., ... & Winter, S. (2020). Vegetation management intensity and landscape diversity alter plant species richness, functional traits and community composition across European vineyards. *Agricultural Systems*, 177, 102706. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102706>
23. Hawthorne, S. N. D., Lane, P. N. J., Bren, L. J., & Sims, N. C. (2013). The long-term effects of thinning treatments on vegetation structure and water yield. *Forest Ecology and Management*, 310, 983–993.
24. Issaka, S., & Ashraf, M. A. (2017). Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>
25. Johnson, L. B., Richards, C., Host, G. E., & Arthur, J. W. (1997). Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems. *Freshwater Biology*, 37, 193–208.
26. Koralay, N., Kara, O., & Kezik, U. (2018). Effects of run-of-the-river hydropower plants on the surface water quality in the Solakli stream watershed, Northeastern Turkey. *Water and Environment Journal*, 32, 412–421. <https://doi.org/10.1111/wej.12338>
27. Lefèvre, C., Cruse, R. M., Cunha dos Anjos, L. H., Calzolari, C., & Haregeweyn, N. (2020). Guest editorial – soil erosion assessment, tools

- and data: A special issue from the Global Symposium on Soil Erosion 2019. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2020), 333–336. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.004>
28. Li, Y., & Migliaccio, K. (2011). *Water quality concepts, sampling, and analyses*. CRC Press, LLC, Boca Raton, Taylor and Francis Group.
29. Li, X., Niu, J., & Xie, B. (2014). The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in Northern China. *PLoS ONE*, 9(9), e107789. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107789>
30. MacDonald, L. H., Smart, A. W., & Wissmar, R. C. (1991). *Monitoring guidelines to evaluate effects of forestry activities on streams in the Pacific Northwest and Alaska*. EPA 910/9–91–001. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
31. Mello, K. D., Randhir, T. O., Valente, R. A., & Vettorazzi, C. A. (2017). Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 108(Part B), 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>
32. Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
33. Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., & Mizuyama, T. (2009). Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests. *Water Resources Research*, 45, 1–17.
34. Molina, A. J., & Campo, A. D. D. (2012). The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: a contribution towards hydrology oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 269, 206–213.
35. Morris, B. C., Bolding, M. C., Aust, W. M., McGuire, K. J., Schilling, E. B., & Sullivan, J. (2016). Differing levels of forestry best management practices at stream crossing structures affect sediment delivery and installation costs. *Water*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/w8030092>
36. Osterholz, W. R., Schwab, E. R., Duncan, E. W., Smith, D. R., & King, K. W. (2021). Connecting soil characteristics to edge-of-field water quality in Ohio. *Journal of Environmental Quality*, 1–16. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20308>
37. Owens, P. N., & Walling, D. E. (2002). The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins. *Water*

- Research, 36, 685–701. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00247-0)
38. Pfeifer, H.-R., Derron, M.-H., Rey, D., Schlegel, C., Atteia, O., Dalla Piazza, R., ... & Mandia, Y. (2000). Natural trace element input to the soil-sediment-water-plant system: examples of background and contaminated situations in Switzerland, Eastern France and Northern Italy. In: Markert B, Friese K (eds) Trace elements—their distribution and effects in the environment, vol 4. Elsevier Science B.V, Amsterdam, pp 33–86
39. Rehman, O. U., Rashid, M., Kausar, R., Alvi, S., & Hussain, R. (2015). Slope gradient and vegetation cover effects on the runoff and sediment yield in hillslope agriculture. *Turkish Journal of Agriculture and Food Science*, 3(6), 478–483.
40. Reynolds, J. B., Simmons, R. C., & Burkholder, A. R. (1989). Effects of placer mining discharge on health and food of Arctic grayling. *Water Resources Bulletin*, 25, 625–635.
41. Rice, R. M., & Wallis, J. R. (1962). How a logging operation can affect streamflow. *Forest Industries*, 89(11), 38–40.
42. Rolston, D. E., Harper, L. A., Mosier, A. R., & Duxbury, A. R. (1993). Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. *American Agronomy Society Special Publication*, Madison, p 55.
43. Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marques, M. J. (2011). Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. *Soil and Tillage Research*, 117, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.004>
44. Salome, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Marsden, C., ... & Le Cadre, E. (2016). The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: a case study in Mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*, 61, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.047>
45. Sensoy, H., & Kara, O. (2013). Determination of the runoff and suspended sediment from two different slope length using field plots. *Artvin Coruh University Journal of Forest Faculty*, 14(2), 216–224.

46. Shiklomanov, I. A. (1998). World water resources—a new appraisal and assessment for the 21st century. A summary of the monograph world water resources. International Hydrological Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris.
47. Sthiannopkao, S., Takizawa, S., & Wirojanagud, W. (2006). Effects of soil erosion on water quality and water uses in the upper Phong watershed. *Water Science and Technology*, 53(2), 45–52.
48. Sthiannopkao, S., Takizawa, S., Homewong, J., & Wirojanagud, W. (2007). Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern 29 provinces of Thailand. *Environment International*, 33, 706–711. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.12.007>
49. Subramanya, K. (2008). *Engineering hydrology*, 3rd edn. Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, p 6.
50. Townsend, K. R., Pettigrove, V. J., Carew, M. W. E., & Hoffmann, A. A. (2009). The effects of sediment quality on benthic macroinvertebrates in the river Murray, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 60(1), 70–82.
51. UNESCO. (1971). Scientific framework of world water balance. International hydrological decade, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris.
52. Wear, D. N., & Greis, J. G. (2002). Southern forest resource assessment. Gen. Tech. Rep. SRS-53. Southern Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, Asheville, pp 635.
53. Welde, K., & Gebremariam, B. (2017). Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5, 1–16.
54. Winter, S., Bauer, T., Strauss, P., Kratschmer, S., Paredes, D., Popescu, D., ... & Batáry, P. (2018). Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2484–2495. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13124>

55. Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., & Lv, C. (2015). Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. CATENA, 128, 44–53.
56. Zimnicki, T., Boring, T., Evenson, G., Kalcic, M., Karlen, D. L., Wilson, R. S., ... & Blesh, J. (2020). On quantifying water quality benefits of healthy soils. Bioscience, 70, 343–352. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa011>

فصل ۵

کیفیت خاک و آب مورد نیاز برای آبیاری

چکیده

برای دستیابی به تولید پایدار مواد غذایی، باید به خاک و آب آبیاری با کیفیت توجه کرد. هدف از آبیاری، افزایش و بهبود انعطاف‌پذیری و پایداری خدمات بوم‌سازگانی خاک است. زمان‌بندی و برنامه‌ریزی مناسب در آبیاری بسیار مهم است تا نیازهای آبی گیاهان، حتی در خاک‌های شور، برآورده شود. این کار نه تنها برای حفظ کیفیت خاک و آب، سلامت محیط زیست و پایداری تولید محصولات غذایی اهمیت دارد، بلکه به تولید همزمان محصولات گیاهی و آبزیان از منابع آبی نیز کمک می‌کند. همچنین، کنترل و جداسازی آلودگی آب از مزارع کشاورزی باید در هر مزرعه مدنظر قرار گیرد تا سلامت انسان بهتر تأمین شود.

کلمات کلیدی: آب آبیاری، آلودگی، تولید محصول، تولید مواد غذایی، خاک، زهکشی، نسبت جذب سدیم

کلمات اختصاری

گروه صنایع اولیه و توسعه منطقه‌ای	DPIRD
عمق آب زهکشی	Ddw
عمق آب آبیاری	Diw
هدایت الکتریکی	EC
سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد	FAO
آب آبیاری / تبخیر تجمعی تشت تبخیر	IW/CPE
نیاز آبخویی	LR

PWP	نقطه پژمردگی دائم
SP	درصد اشباع خاک
SAR	نسبت جذب سدیم
SDG	هدف توسعه پایدار
UNESCO	یونسکو، سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد
USSLS	کارکنان آزمایشگاه شوری ایالات متحده

۵-۱- مقدمه

کیفیت آب آبیاری، یکی از جنبه‌های حیاتی در کشاورزی است. عوامل زیادی بر کیفیت مناسب آب آبیاری تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین این عوامل شامل نمک‌های محلول، pH و قلیائیت هستند. علاوه بر این‌ها، عواملی مثل سختی آب ناشی از کربنات‌های کلسیم و منیزیم و گرفتگی سامانه‌های تأمین آب نیز اهمیت دارند.

مسدودکننده‌های آب معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. مواد جامد معلق غیرآلی و آلی

۲. رسوب شیمیایی نمک‌های کلسیم، منیزیم، فلزات سنگین و کودها

۳. رسوب‌ها و رشد باکتری‌ها و لایه‌های زیستی

کیفیت پایین آب می‌تواند منجر به رشد نامناسب و کیفیت بد محصولات شود و حتی ممکن است به مرگ گیاهان منجر شود. نمک‌های محلول می‌توانند به ریشه‌ها آسیب بزنند و در جذب آب و مواد غذایی اختلال ایجاد کنند. تجمع نمک‌ها در لبه‌های برگ گیاهان باعث سوختن حاشیه برگ‌ها و در نتیجه تأثیر بر سلامت محصولات می‌شود.

pH خاک ممکن است تحت تأثیر قلیائیت بالای آب آبیاری قرار گیرد. این وضعیت می‌تواند جذب مواد غذایی را مختل کند و کمبود عناصر غذایی در محصولات ایجاد کند، که در نتیجه سلامت گیاه را به خطر می‌اندازد. برای استفاده از رواناب، آب بازیافتی یا آب بازچرخانی، لازم است کیفیت آن از طریق آزمایش بررسی شود.

تجزیه و تحلیل کیفیت آب ضروری است تا اطمینان حاصل شود که آب برای رشد گیاه مناسب است و خطر آلاینده‌ها به حداقل برسد. درک درست روابط خاک، گیاه و آب برای مدیریت مؤثر کشت محصولات و سامانه‌های آبیاری بسیار مهم است. بنابراین، تأمین آب نیازمند ارزیابی دقیق توپوگرافی زمین و کیفیت آب مورد استفاده برای آبیاری است (Goyal و همکاران، ۲۰۱۶؛ Ayers و Westcot، ۱۹۹۴).

۵-۲- ویژگی‌های ضروری زمین برای آبیاری

توپوگرافی یا "شکل زمین" یکی از نگرانی‌های اصلی برای امکان آبیاری زمین است. برجستگی، بخشی از توپوگرافی است که به تفاوت ارتفاع بین نقاط بالاتر و فرورفتگی‌های مزرعه اشاره دارد. ویژگی‌های توپوگرافی زمین بر انتخاب سامانه‌های انتقال آب آبیاری (مانند کانال‌ها یا لوله‌ها)، ارزیابی نیازهای زهکشی و طراحی روش‌های کنترل فرسایش آبی تأثیر می‌گذارد.

مدیریت آبیاری همچنین به شکل توپوگرافی اراضی و شبکه آبراهه‌های سطحی بستگی دارد. به‌طور مثال، تجمع آب پس از باران در فرورفتگی‌های مزرعه می‌تواند باعث شود که با اضافه کردن آب آبیاری، این مناطق به‌طور مداوم مرطوب بمانند. این لکه‌های مرطوب ممکن است منشأ بیماری محصولات می‌مانند سیب‌زمینی باشند (Waller و Yitayew، ۲۰۱۶).

انجام زهکشی خاک، فرسایش، استفاده از ماشین‌آلات و انتخاب محصولات، به شیب زمین بستگی دارد. شیب یعنی خمیدگی یا انحناى سطح زمین که به‌طور درصدی بیان می‌شود. شکل شیب، عامل مهمی در انتخاب نوع سامانه آبیاری است. شیب‌ها را می‌توان به‌صورت مسطح، محدب و مقعر تقسیم‌بندی کرد و از نظر مشخصات به دو نوع شیب ساده و پیچیده تقسیم کرد.

شیب‌های ساده، صاف و امتدادیافته در یک یا دو جهت هستند و معمولاً در مخروط‌افکنه‌ها و دامنه‌های پای دره‌ها دیده می‌شوند. دامنه‌های پیچیده می‌توانند کوتاه،

مقعر یا محدب باشند و در چندین جهت امتداد یابند. این نوع شیب‌ها اغلب در مناطقی مانند تپه‌های کوچک، یا در قله‌ها و فرورفتگی‌های موجود در لندفرم‌های ناشی از رسوبات یخرفت و دشت‌های زراعی مشاهده می‌شوند.

آبیاری سطحی (یا ثقلی) فقط در شیب‌های ساده تا دو درصد قابل اجرا است، در حالی که سامانه‌های آبیاری بارانی یا قطره‌ای باید در شیب‌های ساده یا پیچیده بیشتر از یک درصد استفاده شوند. سامانه آبیاری بارانی سنتریپوت می‌تواند تا شیب‌های ۱۵ درصد کار کند، اما به‌طور کلی در شیب‌های ساده بیش از نه درصد توصیه نمی‌شود.

تسطیح زمین برای هر دو سامانه آبیاری سطحی و بارانی مفید است. اما چنین عملیاتی ممکن است به دلیل تغییرات ایجاد شده در سطح خاک، عملکرد را برای یک تا سه فصل رشد کاهش دهد. بنابراین، پس از عملیات تسطیح، باید مراقبت ویژه‌ای برای احیای خاک سطحی و ترکیب مواد آلی انجام شود (Scherer و همکاران، ۱۹۹۶).

۵-۳- ضرورت سازگاری خاک و آب برای آبیاری

برنامه‌ریزی آبیاری نیازمند بررسی سازگاری آب آبیاری با خاک زمین کشت شده است. در غیر این صورت، آب ناسازگار می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر منفی بگذارد و کشت محصولات آینده را مشکل ساز کند. بنابراین، استفاده از مفاهیم اولیه روابط خاک، گیاه و آب با توجه به کیفیت آب آبیاری ضروری است.

۵-۳-۱- تعامل (اندرکنش) بین خاک و آب

خاک، سامانه‌ای سه‌بخشی است که شامل جامدات (مواد معدنی و آلی)، مایع (آب) و گازها (هوا و بخار آب) می‌شود. خاک، آب و بخار آب را در فضاهای خود نگهداری می‌کند و تقریباً نیمی از آن را تشکیل می‌دهند. علاوه بر ذخیره آب، خاک وسیله‌ای برای انتقال آب نیز است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند بافت، جرم مخصوص ظاهری و ساختمان خاک، اندازه و حجم منافذ خاک را تعیین می‌کنند.

آب در خاک به دو صورت نگهداری می‌شود: یکی به‌عنوان پوشش نازک روی سطح خارجی ذرات خاک و دیگری در فضاهای بین ذرات.

آب موجود در منافذ خاک به دو شکل گرانشی (ثقلی) و موینگی نگهداری می‌شود. آب گرانشی به‌دلیل نیروی جاذبه به سمت پایین حرکت می‌کند. آب موینگی توسط ذرات خاک در برابر نیروی گرانش نگه داشته می‌شود. از این رو، آب موینگی مهم‌ترین نوع آب برای تولید محصول است. فضاهای خاک از طریق نفوذ آب به داخل خاک و سپس حرکت آب به سمت پایین در اثر نیروی جاذبه و حرکت آب به سمت بالا توسط نیروی موینگی پر می‌شود.

حرکت آب به سمت پایین ادامه می‌یابد تا زمانی که تعادل بین دو نیروی متضاد موینگی و گرانش برقرار شود. نیروهای موینگی آب را در اطراف ذرات خاک از طریق فضاهای کوچک منافذ به سمت بالا می‌کشند. ممکن است حرکت به سمت بالا باعث تجمع نمک در خاک و رسوب آن شود، زیرا آب از طریق تبخیر و تعرق گیاهان از خاک خارج می‌شود (Biswas و Mukherjee، ۱۹۸۷؛ DPIRD، ۲۰۱۹؛ Michael، ۱۹۹۰).

میزان آب در خاک را می‌توان به چهار سطح رطوبتی تقسیم کرد: (۱) اشباع، (۲) ظرفیت مزرعه، (۳) نقطه پژمردگی و (۴) رطوبت پسته‌ای (هیگروسکوپ) یا شرایط آون خشک. در خاک اشباع، تمام منافذ با آب پر شده و تقریباً همه هوای خاک با آب جایگزین شده است. پس از قطع آبیاری، آب اشباع به سرعت از خاک خارج می‌شود. این خروج آب به‌دلیل نیروی گرانش و جذب توسط ریشه‌های گیاهان است.

آب زهکشی شده را آب گرانشی می‌نامند. پس از زهکشی آب گرانشی، مقداری از رطوبت باقی‌مانده در خاک به نام رطوبت ظرفیت مزرعه شناخته می‌شود. این رطوبت، آبی است که پس از آبیاری یا بارندگی، در خاک بین اشباع و ظرفیت مزرعه نگه داشته می‌شود. با ادامه تبخیر، تعرق، نشت و زهکشی عمیق، رطوبت خاک به نقطه‌ای می‌رسد که گیاهان نمی‌توانند آب را از منافذ ریز خاک جذب کنند. این رطوبت به نام رطوبت نقطه پژمردگی شناخته می‌شود. بنابراین، رطوبت بین ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی

برای گیاهان قابل استفاده است و باید قبل از رسیدن به نقطه پژمردگی، خاک آبیاری شود تا تولید محصول پایدار حفظ شود.

اگر کاهش رطوبت خاک ادامه یابد، گیاهان به مرگ نزدیک می‌شوند و در نهایت زنده نمی‌مانند. این وضعیت به نام نقطه پژمردگی دائم (PWP) شناخته می‌شود. با کاهش مداوم رطوبت خاک، مقدار رطوبتی که تحت فشار اتمسفری حدود ۱۰,۰۰۰ بار در خاک نگهداری می‌شود، شبیه به شرایط خاک آون خشک است. این شرایط به نام رطوبت هیگروسکوپی (پوسته‌ای) شناخته می‌شود و به عنوان ضریب هیگروسکوپی یا رطوبت خاک آون خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مقدار به عنوان مرجع برای اندازه‌گیری سه مقدار دیگر رطوبت خاک در نظر گرفته می‌شود (Michael, ۱۹۹۰؛ DPIRD, ۲۰۱۹). بنابراین، حفظ مقدار بهینه آب آبیاری تأثیر زیادی بر کیفیت خاک مانند محافظت از خاک در برابر شوری، غرقابی و فرسایش دارد.

۵-۳-۲- وضعیت خشکی فیزیولوژیکی خاک

خشکی فیزیولوژیکی به معنای عدم توانایی گیاهان در جذب آب از خاک، حتی اگر آب در ناحیه ریشه در دسترس باشد، تعریف می‌شود. املاح موجود در خاک باعث می‌شوند آب کمتری در اختیار گیاهان قرار گیرد و در نتیجه خشکی فیزیولوژیکی رخ می‌دهد.

عوامل مختلفی مانند پاشش نمک از آب دریا، نفوذ آب شور به آب‌های زیرزمینی، بالا آمدن مویینگی آب شور و تبخیر-تعرق باعث افزایش شوری خاک می‌شوند.

فاصله از دریا و میزان محافظت از خاک در برابر باد، بر شوری خاک و کیفیت آب آبیاری تأثیر می‌گذارد. در حالی که تنش رطوبت خاک (درجه جذب آب به خاک) مهم‌ترین عامل در ویژگی‌های آب خاک برای رشد پایدار محصول است، نیاز به آبیاری باید بر اساس نسبت آب آبیاری به تبخیر تجمعی تست تبخیر (IW/CPE) و با توجه به شوری خاک و آب، و نیاز به آبیاری برای شستشوی نمک‌های تجمعی از سطح خاک و

عمق زیر منطقه ریشه تعیین شود (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Dhara و همکاران، ۱۹۹۱؛ FAO و UNESCO، ۱۹۶۷؛ Moreno-Casasola، ۲۰۰۸؛ USSLS، ۱۹۶۸).

$$LR = \frac{D_{dw}}{D_{iw}} = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} \quad (۱-۵)$$

در اینجا، LR نیاز آبخویی، به معنی آب موردنیاز برای شستشوی نمک‌های اضافی زیر ناحیه ریشه است. LR نسبت عمق آب زهکشی (D_{dw}) به عمق آب آبیاری (D_{iw}) است که معادل نسبت هدایت الکتریکی EC_{iw} به EC_{dw} است (USSLS، ۱۹۶۸).

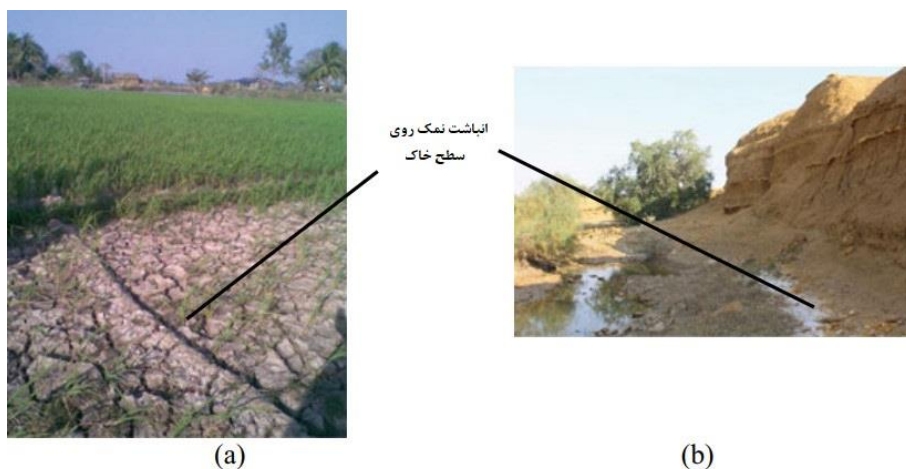
$$D_{iw} = D_{dw} + D_{cw} \quad (۲-۵)$$

D_{cw} آب مصرفی بر اساس یک اقلیم خاص است که برای یک محصول کشت شده تخمین زده می‌شود.

$$D_{iw} = D_{cw} \frac{EC_{dw}}{EC_{dw} - EC_{iw}} \quad (۳-۵)$$



شکل ۵-۱- پاشش نمک به وسیله باد از سطح آب و امواج دریا به هوا در نواحی ساحلی



شکل ۵-۲- رسوب نمک در سطح خاک: یک منطقه مرطوب ساحلی در بنگال غربی، هند و b: منطقه خشک در راجستان، هند

برای حفظ تولید محصول می‌توان از آب‌های شور در شرایط زهکشی مناسب استفاده کرد. اگر شستشوی نمک‌های انباشته شده حاصل از آبیاری با آب شور انجام نشود، سطح جدیدی برای شوری خاک تعیین شده که تابعی از شوری آب آبیاری، بافت خاک و میانگین بارندگی سالانه سطح زیرکشت محصولات زراعی خواهد بود (رابطه ۵-۴):

$$EC_s = K + k^2 \left(\frac{EC_{iw} \times SP}{R} \right) \quad (۴-۵)$$

که در آن، (۱) EC_s سطح شوری خاک، (۲) SP درصد اشباع خاک، (۳) R میانگین بارندگی سالانه و (۴) دو ثابت ظاهر می‌شود: K بسته به اقلیم و k بسته به خاک و الگوی کشت است.

رابطه (۴-۵) که ابتدا در سرزمین‌های اشغالی فلسطین برای باغ‌های مرکبات به کار گرفته شد، همچنین برای مناطق خشک و نیمه‌خشک راجستان، گجرات شمالی، هاریانا و اوتار پرادش غربی در هند نیز استفاده می‌شود (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ FAO و UNESCO، ۱۹۶۷).

۵-۳-۳- شناخت ویژگی‌های خاک برای مدیریت آبیاری

آبیاری برای پایداری تولیدات کشاورزی اهمیت زیادی دارد. اما به دلیل محدودیت‌های خاک و زمین، نمی‌توان همه زمین‌ها را آبیاری کرد. برای این منظور، رتبه‌بندی عددی برای آبیاری از ۱۰۰ نمره استفاده می‌شود. این نمره‌گذاری شامل بافت خاک (۲۰ نمره)، انتقال آب در خاک (۲۰ نمره)، کل نمک‌های محلول (۲۵ نمره)، pH (۱۵ نمره)، سدیم قابل تبادل (۱۰ نمره) و تخلخل غیرمومینگی (۱۰ نمره) است.

بر اساس سامانه چهار طبقه‌ای تناسب اراضی برای آبیاری، کلاس I با نمره ۸۶ بدون مشکل، کلاس II با نمره ۷۶-۸۶ با مشکلات متوسط، کلاس III با نمره ۶۶-۷۶ با مشکلات شدید و کلاس IV با نمره کمتر از ۶۶ با مشکلات بسیار شدید شناخته می‌شود. همچنین، روش عددی دیگری برای تعیین طبقه آبیاری وجود دارد که شامل پنج طبقه است: A (بدون محدودیت تا خفیف)، B (متوسط)، C (شدید)، D (بسیار شدید) و E (نامناسب برای آبیاری). این طبقه‌بندی بر اساس عمق خاک، بافت، انتقال آب در خاک، ظرفیت نگهداری آب، شوری، قلیائیت و ویژگی‌های زهکشی برای استفاده مداوم از زمین‌های کشاورزی تحت آبیاری برای تولید پایدار محصولات انجام می‌شود (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Bali و Khybri، ۱۹۸۲؛ Mehta و Shankaranarayana، ۱۹۶۱؛ Mehta و همکاران، ۱۹۵۸).

ساختمان خاک بر حرکت هوا، آب و ریشه‌های گیاه از طریق خاک تأثیر می‌گذارد. این شرایط خاک به وسیله خاکدانه‌های پایدار و شبکه‌ای از منافذ خاک برای تبادل سریع هوا و آب با ریشه‌های گیاه کنترل می‌شود.

نحوه ترکیب ذرات شن، سیلت و رس به شکل خاکدانه‌های بزرگ‌تر با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف، پایداری ساختمان خاک را تعیین می‌کند. وجود عوامل سیمان‌کننده معدنی و آلی، چرخه‌های تر و خشک کردن، انجماد و ذوب، فعالیت حیوانی و نفوذ ریشه نیز در تشکیل ساختمان خاک مؤثر هستند. خاکدانه‌های مقاوم در برابر تنش فیزیکی برای کشت و حفظ بهره‌وری خاک ضروری هستند.

کشت بیش از حد یا خاک‌ورزی خاک‌های مرطوب ممکن است به تخریب خاکدانه‌ها، از دست دادن مواد آلی و کاهش پایداری آنها منجر شود (Scherer و همکاران، ۱۹۹۶). ریشه‌های گیاه معمولاً به دلیل لایه‌های زیرسطحی محدودکننده که با نفوذ ریشه تداخل دارند، در قسمت بالایی نیم‌رخ خاک متمرکز می‌شوند.

عمق خاک، که به ضخامت مواد خاک اشاره دارد، نقش حمایتی برای تأمین مواد غذایی و آب برای گیاهان دارد. لایه‌های متفاوت مانند سنگ‌ریزه و شن در عمق کم (حدود کمتر از ۹۰ سانتی‌متر) می‌توانند آب موجود در خاک را کاهش دهند و عمق ریشه‌زایی را محدود کنند (شکل ۵-۴). در چنین شرایطی، آبیاری مکرر برای تأمین آب کافی برای گیاهان ضروری است.

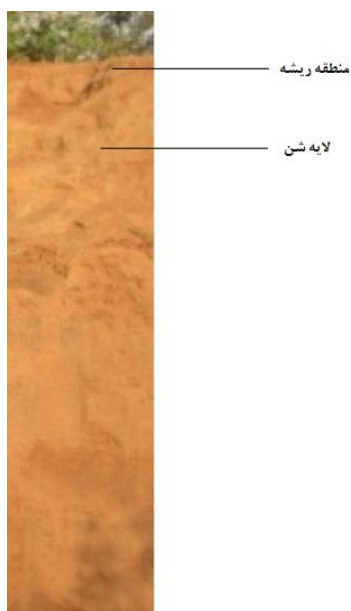
نفوذپذیری خاک تحت تأثیر اندازه، شکل و پیوستگی فضاهای منفذی قرار دارد و به جرم مخصوص ظاهری، ساختمان و بافت خاک بستگی دارد. این ویژگی برای تعیین قابلیت آبیاری خاک بسیار مهم است. خاک‌هایی با نفوذپذیری آهسته، بسیار کند، سریع یا بسیار سریع برای آبیاری نامناسب در نظر گرفته می‌شوند.

نفوذ، یعنی جریان آب به سمت پایین از سطح خاک، به شرایط سطح خاک مانند زبری (شخم و بقایای گیاهی)، پوشش گیاهی، میزان رطوبت، شیب و نفوذپذیری بستگی دارد. سرعت نفوذ با افزایش درصد بخش‌های درشت‌بافت خاک مانند خاک شنی نسبت به خاک رسی، افزایش می‌یابد.

اما این ویژگی برای پایداری ساختمان خاک معکوس است. بنابراین، آب و مواد غذایی بیشتری از خاک‌های با بافت درشت از دست می‌رود. به همین دلیل، زمان و نحوه کاربرد کودها، به‌ویژه با توجه به بافت خاک، اهمیت زیادی دارد (Mukherjee و Biswas، ۱۹۸۷). تصمیم‌گیری در مورد مدیریت آب آبیاری در مزارع نیازمند تعیین دقیق ویژگی‌های فیزیکی خاک است.



شکل ۳-۵- خاک‌ورزی خاک‌های خیس و باتلاقی



شکل ۴-۵- لایه‌های شن در نزدیکی سطح باعث عمق ضعیف ریشه‌زایی می‌شود.

۵-۳-۴- کیفیت آب آبیاری

آلودگی آب یکی از مسائل مهم در دوران صنعتی شدن است که با عادات نادرست مصرف آب تشدید می شود. آب سطحی به طور سنتی برای آبیاری استفاده می شود و میزان دسترسی به آن تعیین کننده مصرف ۳۳ تا ۹۰ درصد منابع آبی جهان و ۷۰ درصد آب شیرین جهان است.

برای استفاده از آب در آبیاری، ارزیابی کیفیت آب بر اساس ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی لازم است. نظارت مداوم بر این ویژگی ها برای تولید داده ها و اطلاعات مفید جهت مدیریت و کاهش مشکلات در منابع آب ضروری است (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲).

با تغییر اقلیم، اطلاعات زیادی در مورد کیفیت آب آبیاری در مناطق گرمسیری در دسترس نیست. خاک های با مشکل شوری و قلیائیت، تنش های غیرزیستی ایجاد می کنند که بر جوانه زنی بذر، رشد و جذب آب و مواد معدنی توسط گیاهان تأثیر می گذارد و در نتیجه بر عملکرد و بهره وری محصولات اثر می گذارد.

همچنین، شوری خاک بر پتانسیل اسمزی خاک تأثیر می گذارد و باعث ایجاد تنش آبی و اثرات سمی بر محصولات می شود. در شرایط خاص، بافت خاک ممکن است باعث کاهش عملکرد، نفوذ کمتر آب و تخریب خاک شود (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲). آب آبیاری همیشه حاوی مقداری نمک است و ماهیت و نسبت یون های موجود کیفیت آب آبیاری را تعیین می کند (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲).

کیفیت آب آبیاری از دیدگاه کشاورزی باید بر اساس موارد زیر تجزیه و تحلیل شود: (۱) غلظت نمک های محلول، (۲) غلظت نسبی سدیم نسبت به سایر کاتیون ها، (۳) غلظت بور یا دیگر عناصری که ممکن است در شرایط خاص سمی باشند، و (۴) غلظت بی کربنات ها در مقایسه با غلظت کلسیم و منیزیم (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی و مواد شیمیایی صنعتی که با آب آبیاری اختلاط می یابند، بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی آب تأثیر می گذارد و ممکن است به خاک و تولید

محصول آسیب برسانند. این تغییرات می‌توانند به مرور زمان باعث نامناسب شدن زمین‌ها برای کشاورزی شوند (Bortolini و همکاران، ۲۰۱۸؛ Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲).

گرفتگی قطره‌چکان‌ها و آبپاش‌ها نیز یکی دیگر از اثرات منفی کیفیت آب آبیاری است، به‌ویژه زمانی که آب دارای املاح و نمک‌های زیاد باشد. وجود مواد جامد معدنی، آلی و محلول نیز باعث مشکلاتی در سامانه آبیاری می‌شود.

برای پیشگیری از این مشکلات، آزمایش کیفیت آب ضروری است (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲). مقامات و سازمان‌های بین‌المللی، مانند FAO، روش‌های طبقه‌بندی و نظارت را برای ارزیابی کیفیت آب آبیاری پیشنهاد کرده‌اند (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲).

استفاده از این ابزار و مقررات کمک می‌کند تا کشورها شاخص‌های توسعه پایدار را پایش کنند و به بهینه‌سازی عملکرد محصول، کیفیت محصول، و مناسب بودن خاک و تجهیزات آبیاری بپردازند (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲). تعیین کیفیت آب آبیاری با استفاده از پارامترهای مشخص مانند مواد معدنی، فلزات، pH، EC و SAR انجام می‌شود و این معیارها به تأمین مواد غذایی و بهبود عملکرد و بهره‌وری کمک می‌کند (Guerra Tamara و همکاران، ۲۰۲۲؛ Taghizadehghasab و همکاران، ۲۰۲۱).

۵-۴- مدیریت آبیاری در خاک‌های متأثر از نمک

خاک‌های تحت تأثیر نمک بر اساس مقدار نمک‌های محلول و سدیم طبقه‌بندی می‌شوند. این نوع خاک‌ها معمولاً به دلیل حرکت آب‌های زیرزمینی که سطح ایستابی آن‌ها نزدیک به سطح خاک است، تشکیل می‌شوند. تبخیر آب از سطح خاک یا تعرق گیاهان باعث تجمع نمک‌ها در خاک می‌شود. به‌طور کلی، استفاده از آب آبیاری در این خاک‌ها توصیه نمی‌شود.

اگرچه خاک‌های شور و سدیمی ممکن است منشأ طبیعی داشته باشند، اما آبیاری با آب‌های مشکل‌دار نیز می‌تواند باعث ایجاد این مشکلات شود. ترکیب خاصی از کیفیت آب آبیاری و خاک می‌تواند منجر به تجمع نمک‌ها و یا سدیم در ناحیه ریشه شود که بر رشد گیاه تأثیر منفی دارد. این مشکل را می‌توان با استفاده از مکمل‌های کلسیم محلول کنترل کرد که می‌تواند ساختمان خاک را بهبود بخشد. این عمل معمولاً در مزارعی که تحت تأثیر سدیم هستند و آبیاری سطحی انجام می‌شود، انجام می‌شود.

برای مدیریت غلظت نمک، نیاز به آبیاری ویژه و استفاده از شیوه‌های مدیریتی است. شستشوی نمک را می‌توان با استفاده از آب اضافی، بارندگی زیاد، یا هر دو انجام داد. اما این ممکن است باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تجمع دوباره نمک‌ها در سطح خاک شود. برای مدیریت این معضل می‌توان از کاشت گیاهان ریشه‌دار مانند درختان و محصولاتی با ریشه عمیق مانند یونجه، نصب سامانه‌های زهکشی زیرسطحی، و شستشوی نمک‌های سطحی استفاده کرد (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Biswas و Mukherjee، ۱۹۸۲).

۵-۵- شناسایی خاک‌های متأثر از نمک

برای تعیین دقیق شدت شوری خاک، باید میزان نمک و سدیم آن مشخص شود. برای تخمین میزان نمک، هدایت الکتریکی عصاره آب خاک یا گل اشباع اندازه‌گیری می‌شود. محتوای سدیم خاک نیز معمولاً از روی عصاره آب خاک اندازه‌گیری و به‌عنوان نسبت سدیم به کلسیم به‌علاوه منیزیم (SAR) بیان می‌شود. پایش مقدار SAR برای هر خاک خاص، با نمونه‌برداری از لایه سطحی خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متری به‌صورت دوره‌ای هر سه تا پنج سال، شاخص خوبی برای ردیابی تجمع سدیم و مسائل فیزیکی مرتبط با آن است.

به‌عنوان مثال، خاک‌هایی با مقدار SAR معادل ۱۳ مشکلات فیزیکی و پراکندگی ذرات رس را نشان می‌دهند، در حالی که SAR کمتر از ۶ مشکل فیزیکی ندارد. افزایش SAR

از شش به نه، هشدار برای آمادگی لازم جهت مدیریت مشکلات فیزیکی خاک است (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Bortolini و همکاران، ۲۰۱۸؛ USSLS، ۱۹۶۸).

۵-۶- مدیریت خاک و آب برای تولید پایدار محصول

مدیریت آب آبیاری به‌ویژه تصمیم‌گیری درباره شروع و میزان استفاده از آب در مزارع، یکی از بخش‌های دشوار است. آگاهی از الگوهای مصرف آب در مراحل مختلف رشد محصول به تصمیم‌گیری‌های بهتر درباره کاربرد آب، طراحی سامانه آبیاری و مدیریت آن کمک می‌کند. گیاهان در مراحل رشد (رویشی و زایشی) بیشتر در معرض آسیب ناشی از کم‌آبی هستند. این آگاهی به جلوگیری از تنش آبی و کاهش هزینه‌های پمپاژ ناشی از استفاده غیرضروری از آب که می‌تواند به گسترش بیماری‌های گیاهان منجر شود، کمک می‌کند.

یکی دیگر از معیارهای مهم در مدیریت آب آبیاری، کاهش آبشویی کود و آفت‌کش‌ها است. این کار به کاهش هزینه‌های کشت و حفاظت از منابع آب و محیط‌زیست کمک می‌کند. رعایت معیارهای مصرف بهینه آب ضروری است، زیرا مصرف نادرست آب در زمان نامناسب می‌تواند به تنش محصول و کاهش عملکرد منجر شود.

برنامه‌ریزی اجرایی آبیاری باید بر اساس اندازه‌گیری دقیق بارندگی باشد. هر مزرعه باید حداقل یک و احتمالاً دو باران‌سنج (با قطر پنج تا شش سانتی‌متر) بر روی پایه‌های نصب‌شده در کنار مزرعه داشته باشد. این شیوه مدیریتی آب آبیاری، کمک می‌کند تا تعادل مناسبی بین نیازهای آبی محصول، استفاده از آب در ناحیه ریشه، دردسترس‌بودن آب، هزینه پمپاژ، بهداشت محیط و تولید پایدار محصول با در نظر گرفتن عوامل اقلیمی و ویژگی‌های خاک برقرار شود (Michael، ۱۹۹۰؛ Scherer و همکاران، ۱۹۹۶).

۵-۷- نتیجه گیری کلی

کیفیت خاک و آب آبیاری برای دستیابی به پایداری در تولید مواد غذایی بسیار مهم است. هدف از آبیاری باید افزایش انعطاف پذیری خاک و بهبود خدمات بوم سازگان از طریق خاک باشد. خاک به عنوان یک غشای زیستی، باید توانایی حفظ کیفیت آب را از طریق تغییر شکل دادن آلاینده ها، فیلتر کردن و کاهش منابع غیر نقطه ای آلودگی و سایر آلاینده ها داشته باشد.

از سوی دیگر، اطلاع از کیفیت آب نیز ضرورتی برای برآورده کردن نیاز آبیاری محصولات در خاک های آسیب دیده از نمک است. این اطلاعات برای حفظ کیفیت خاک و آب مورد نیاز، ضروری است (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Lal، ۲۰۱۰؛ USSLS، ۱۹۶۸). همچنین، اطلاعات کیفیت آب، ورودی مهمی برای تولید ماهی از تالابها (Jaishankar و همکاران، ۲۰۱۴) و کنترل و جداسازی آلودگی آب از مزارع کشاورزی و تولید محصولات کشاورزی است (Mateo-Sagasta و همکاران، ۲۰۱۷؛ FAO، ۲۰۱۳).

منابع مورد استفاده

1. Agarwal, R. R., Yadav, J. S. P., & Gupta, R. N. (1982). Saline and alkali soils of India. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
2. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1994). Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
3. Bali, Y. P., & Khybri, M. L. (1982). Land evaluation. In N. S. Randhawa et al. (Eds.), Review of soil research in India. ISSS/AISS/IBG 12th international congress on soil science (pp. 587–596). Industrial Soil and Soil Science, New Delhi.
4. Biswas, T. D., & Mukherjee, S. (1987). Textbook of soil science. Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd., New Delhi.
5. Bortolini, L., Maucieri, C., & Borin, M. (2018). A tool for the evaluation of irrigation water quality in the arid and semi-arid regions. *Agron*, 8(2), 23. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020023>
6. Dhara, P., Panda, S., Roy, G. B., & Datta, D. K. (1991). Effect of water bodies on the quality of groundwater in coastal areas of South 24 Parganas in West Bengal, India. *J Ind Soc Coastal Agric Res*, 9(1/2), 395–396.

7. DPIRD. (2019). Calculating readily available water. Agriculture and Food, Department of Primary Industries and Regional Development (DPIRD), Government of Western Australia. Available: <https://www.agric.wa.gov.au/citrus/calculating-readily-available-water>. Accessed 21 June 2022
8. FAO & UNESCO. (1967). International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, and UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris.
9. FAO. (2013). Guidelines to control water pollution from agriculture in China: Decoupling water pollution from agricultural production. FAO water reports 40. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
10. Goyal, M. R., Chavan, V. K., & Tripathi, V. K. (2016). Principles and management of clogging in micro irrigation. In M. R. Goyal (Ed.), Innovations and challenges in micro irrigation, vol 1 (p. 43). Apple Academic Press, Inc., Oakville.
11. Guerra Tamara, B., Torregroza-Espinosa, A. C., Pinto Osorio, D., Pallares M. M., Corrales Paternina, A., Echeverría González, A. (2022). Implications of irrigation water quality in tropical farms. *Global J Environ Sci Manag*, 8(1), 75–86. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2022.01.06>
12. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism, and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
13. Lal, R. (2010). Managing soil to address global issues of the twenty-first century. In R. Lal & B. A. Stewart (Eds.), *Food security and soil quality* (pp. 6–19). CRC Press, New York.
14. Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M., Turrall, H., & Burke, J. (2017). Water pollution from agriculture: A global review—executive summary. CGIAR research program on water, land and ecosystems (WLE). Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, and International Water Management Institute (IWMI), Colombo.
15. Mehta, K. M., Mathur, C. M., & Shankaranarayana, H. S. (1958). A proposed method for rating lands for irrigation and its application to Chambal area. *J Soil Wat Conserv*, 6, 125–139.
16. Mehta, K. M., & Shankaranarayana, H. S. (1961). Rating of lands for irrigation-Jawai Project Area. *J Indian Soc Soil Sci*, 9(2), 71–76.
17. Michael, A. M. (1990). *Irrigation—theory and practice*. Vikas Publishing House Pvt. Ltd., N. Delhi, pp. 463, 480–482.
18. Moreno-Casasola, P. (2008). Dunes. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of ecology* (pp. 971–976). Imprint Elsevier Science, Elsevier B.V., Amsterdam.

فصل ۶

تأثیر حفظ رطوبت خاک بر تولید مواد غذایی

چکیده

حفظ رطوبت خاک برای مدیریت مصرف آب محصولات کشاورزی در دوره‌های کوتاه خشکسالی بسیار مؤثر است، زیرا رطوبت خاک را نمی‌توان برای مدت طولانی در خاک نگهداری کرد. میزان حفظ رطوبت به عواملی مانند درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، جرم مخصوص خاک، عمق مؤثر ریشه‌زنی و تبخیر و تعرق بستگی دارد. بنابراین، ذخیره بارش در محل و همچنین جمع‌آوری رواناب سطحی در مخازن و تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای تأمین آب آبیاری یا حفظ رطوبت خاک مفید باشد. همچنین استفاده از مالچ‌ها نیز روش مناسبی است.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، برداشت رواناب، حفاظت تناوب زراعی، رطوبت خاک، مالچ، محلول‌های با پایه طبیعی، مواد آلی خاک

کلمات اختصاری

جرم مخصوص ظاهری خاک	BD
برنج بذر مستقیم	DSR
عمق مؤثر هیدرولوژیکی خاک	EHD
نسبت تبخیر و تعرق واقعی به بالقوه	Et/E0
سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد	FAO
میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی	MS
راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت	Nbs
باران	R

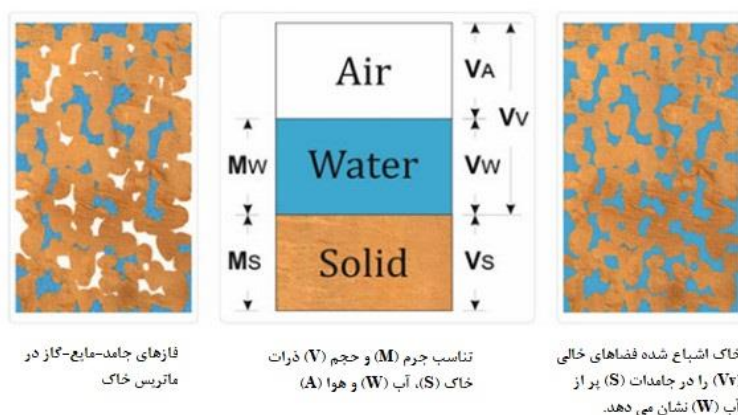
Ro	میانگین بارندگی در روز بارانی
RD	عمق ریشه‌زایی خاک سطحی
Rc	ظرفیت ذخیره رطوبت خاک
SOM	مواد آلی خاک
SRI	سامانه کاشت متمرکز برنج
UNCTCN	مرکز و شبکه فناوری اقلیم سازمان ملل متحد
UNFCCC	کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات اقلیم سازمان ملل متحد
UN	سازمان ملل متحد

۶-۱- مقدمه

رطوبت خاک (یا آب خاک)، به عنوان بخشی از سامانه سه‌فازی خاک شامل جامد (مواد معدنی و آلی)، مایع (آب) و گاز (هوای خاک و بخار آب) در مهندسی عمران تعریف می‌شود. رطوبت خاک تأثیر زیادی بر رفتارهای مهندسی، هیدرولوژیکی، زراعی و اکولوژیکی خاک دارد. اگرچه ماده آلی خاک (SOM) در مهندسی عمران معمولاً نادیده گرفته می‌شود، اما نقش مهمی در میزان رطوبت خاک و پویایی مواد غذایی برای تولید پایدار غذا دارد (Arora و همکاران، ۲۰۰۸؛ Murthy، ۲۰۰۲؛ Terzaghi، ۱۹۴۳؛ Venkatramaiah، ۲۰۰۶).

با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت، رقابت برای مصرف منابع آبی افزایش یافته است و توسعه زمین‌های کشاورزی محدود شده است. این محدودیت، کشاورزان و برنامه‌ریزان را به سمت کشاورزی دیم و استفاده از روش‌های طبیعی برای حفظ رطوبت خاک سوق می‌دهد. در این نوع کشاورزی، مدیریت رطوبت خاک برای کاهش تبخیر و تعرق از سطح گیاه و خاک اهمیت بالایی دارد. حفظ رطوبت خاک به کاهش نیاز آبیاری و حفاظت از منابع آب برای تولید پایدار کشاورزی کمک می‌کند.

برای افزایش رطوبت خاک سطحی در دسترس گیاهان و بهبود نفوذ آب به عمق خاک و تغذیه آب‌های زیرزمینی، برخی فناوری‌های خاص برای حفظ رطوبت در هر منطقه توصیه شده است. همچنین، روش‌های زراعی مختلفی مانند کاشت مستقیم بذر برنج (DSR)، برنج هوازی، و سامانه متمرکز برنج (SRI) به منظور بهبود بهره‌وری آب و استفاده بهینه از آن ترویج می‌شوند (Mohanta و همکاران ۲۰۲۱؛ Midya و همکاران ۲۰۲۱؛ Kumar a, b ۲۰۲۱؛ King. -Okumu؛ ۲۰۲۱؛ FAO، ۲۰۲۱).



شکل ۶-۱- سه فاز خاک: خاک (S)، آب (W) و هوا (A) و رابطه جرم (M) و حجم (V) آن‌ها

۶-۲- ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر عمق ریشه‌زایی، جرم مخصوص ظاهری خاک، بارندگی و تبخیر و تعرق

ذخیره آب در خاک به عمق و تراکم ریشه‌ها بستگی دارد و به‌ویژه عمق لایه سطحی خاک (افق A) اهمیت دارد. عمق ریشه‌زایی خاک (RD) معمولاً کمتر از عمق افق A است. برای چمن، عمق ریشه‌زایی ۰/۰۵ متر و برای درختان و محصولات درختی ۰/۱ متر توصیه شده است. این ذخیره آب بر تولید رواناب تأثیر می‌گذارد. به گفته Kirkby، رواناب زمانی رخ می‌دهد که بارندگی روزانه از ظرفیت ذخیره رطوبت خاک بیشتر شود

و می‌توان رواناب سالانه را با استفاده از رابطه (۱-۶) تخمین زد (Kirkby، ۱۹۷۶؛ Morgan RPC، ۲۰۰۱).

$$Q = R \exp(-Rc/Ro) \quad (1-6)$$

در اینجا، R باران، Ro میانگین بارندگی در روز بارانی (میلی‌متر). به‌عنوان نسبت بین باران و تعداد روزهای بارانی در سال محاسبه می‌شود. Rc ، ظرفیت ذخیره رطوبت خاک در رابطه (۱-۶) است. Rc نیز از رابطه (۲-۶) تخمین زده می‌شود.

$$Rc = 1000 MS \times BD \times EHD(E_t/E_o) \quad (2-6)$$

که در آن، MS ، میزان رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه (درصد وزنی/وزنی)، BD جرم مخصوص ظاهری خاک (مگاگرم بر مترمکعب)، EHD ، عمق مؤثر هیدرولوژیکی خاک (متر)، E_t/E_o ، نسبت تبخیر و تعرق واقعی به بالقوه است.

در اینجا، EHD جایگزین مفهوم عمق ریشه‌زایی RD شده و عمق خاکی را نشان می‌دهد که ظرفیت ذخیره رطوبت در آن، تولید رواناب را کنترل می‌کند. EHD تابعی از پوشش گیاهی است و بر عمق و تراکم ریشه‌ها و در برخی موارد به‌عنوان مثال، در خاک‌های با عمق کمتر از ۰/۱ متر یا با سله یا اندوده سطحی بر عمق مؤثر خاک تأثیر می‌گذارد (شکل ۲-۶) (Sterk، ۲۰۲۱؛ Shrestha و همکاران، ۲۰۱۴؛ Morgan، ۲۰۰۱).



شکل ۲-۶- سله یا اندوده سطحی خاک

۶-۳- تکنیک‌های حفاظت از رطوبت خاک و اجرای آن‌ها

تکنیک‌های حفظ رطوبت خاک در مناطقی که منابع آبیاری محدود است، به‌ویژه در شرایط کنونی با بارندگی‌های نامنظم و کمبود منابع آب زیرزمینی، بسیار مهم هستند. بسیاری از این روش‌ها ساده و کم‌هزینه بوده و بر اساس مواد و امکانات محلی اجرا می‌شوند. برای مثال، استفاده از پوشش‌هایی برای جلوگیری از تماس مستقیم خاک با گرما و نور خورشید به کاهش تبخیر از خاک کمک می‌کند. همچنین، اقدامات حفاظت از خاک و آب و بهبود کیفیت خاک برای حفظ رطوبت بسیار مؤثر هستند (UN CTCN, ۲۰۱۷).

برخی روش‌های کاهش هدررفت رطوبت خاک عبارت‌اند از:

۱. پخش کمپوست یا کود روی خاک: این روش تبخیر و تعرق را کاهش داده و مواد غذایی را به خاک اضافه می‌کند. کمپوست را می‌توان در گودال اطراف درخت و در عمق زیر خاک سطحی قرار داد و سپس روی آن را با خاک پوشاند. این کار به بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و افزودن مواد غذایی کمک می‌کند.

۲. استفاده از خاک‌پوش: در مناطق با بارش کم تا متوسط، می‌توان از موادی مانند کاه، تراشه چوب، زغال سنگ نارس، بقایای گیاهی و موارد مشابه برای پوشاندن سطح خاک استفاده کرد. این کار به کاهش فرسایش خاک و حفظ رطوبت کمک می‌کند. بهتر است از پلاستیک به‌عنوان پوشش استفاده نشود.

۳. خاک‌ورزی حفاظتی: کاهش دفعات خاک‌ورزی و استفاده از روش‌های مناسب خاک‌ورزی باعث حفظ مواد آلی خاک و افزایش ظرفیت جذب و نگهداری آب می‌شود.



شکل ۶-۳- استفاده از کود آلی در گودال اطراف درخت در زیر سطح خاک و سپس پوشش داده شده توسط خاک برای حفظ رطوبت خاک پس از بارندگی



شکل ۶-۴- کاربرد مالچ پاشی در کشت سبزیجات در یک منطقه دیم

با استفاده از این روش‌ها، بقایای محصول برای کاهش تبخیر و تعرق و همچنین محافظت از خاک در برابر نور مستقیم خورشید، باد و باران شدید روی سطح مزرعه باقی

می‌ماند. روش‌های مکانیکی خاک‌ورزی نیز می‌توانند به حفظ رطوبت خاک کمک کنند. در یک مطالعه، مشخص شد که استفاده از شیار بازکن دو دیسکی با کولتیواتور ساده می‌تواند بیشترین حفظ رطوبت خاک و تراکم مناسب خاک را با کمترین به هم‌ریختگی ساختمان خاک و مقاومت بیشتر در برابر نفوذ ایجاد کند (Sawant و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیقی درباره تأثیر اندازه خاکدانه‌های خاک و تراکم خاک بر از دست دادن رطوبت و سبز شدن گیاهان در خاک شنی، مشخص شد که ذرات کوچک‌تر خاک (۰/۱۸ میلی‌متر) ظرفیت نگهداری رطوبت بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر (۰/۷۶ میلی‌متر) دارند (Johnson و Buchele، ۱۹۶۱). همچنین، مطالعه‌ای نشان داد که شیار بازکن‌های اسکنه‌ای، رطوبت بیشتری را نسبت به بیل و دیسک حفظ می‌کنند و جوانه‌زنی بذر با اسکنه نسبت به سایر شیار بازکن‌ها بیشتر است (Baker، ۱۹۷۶).

شیار بازکن‌ها و شیارهای عمیق نیز در مقایسه با دیسک‌های تک و دوتایی، رطوبت بیشتری را در خاک نگه می‌دارند. همچنین، درصد جوانه‌زنی بیشتری با شیار بازکن T معکوس به دست می‌آید (Choudhary، ۱۹۸۸؛ Sawant و همکاران، ۲۰۱۶). با افزایش سرعت شیار بازکن‌ها، رطوبت خاک کاهش می‌یابد، زیرا خاک بیشتری در معرض باد قرار می‌گیرد (Tessier و همکاران، ۱۹۹۱).

(۴) تناوب زراعی با کشت محصولات مختلف: در فصل‌های گوناگون به افزایش ماده آلی خاک از طریق باقی‌مانده‌های گیاهی مثل برگ‌ها و ریشه‌ها کمک می‌کند. این کار می‌تواند ساختار خاک و ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود بخشد. تناوب زراعی با گیاهان دارای ریشه‌های عمیق و کم‌عمق همچنین به بهره‌برداری از آب‌های عمقی کمک کرده و کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد. به این ترتیب، بهبود ماده آلی و رطوبت خاک به افزایش حاصلخیزی و پایداری در تولید غذا از همان خاک در آینده کمک می‌کند.

اضافه کردن محصولات کود سبز در تناوب زراعی نیز می‌تواند ماده آلی و مواد غذایی خاک را افزایش داده و ظرفیت نگهداری رطوبت و کیفیت خاک را بهبود بخشد. برخی گیاهان مهم کود سبز شامل آزولا، گیاه نیل وحشی (*Baptisia australis*)، دایچا (*Sesbania bispinosa*)، آویز (*Sesbania grandiflora*)، کالوتروپیس، سابابول (*Leucaena leucocephala*)، درختچه‌های گلبریکیدیا و درختانی مانند نرادیکا، ماهوا (*Madhuca longifolia*)، کرنج (*Millettia pinnata*) و غیره هستند. استفاده از کود برگ سبز می‌تواند ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و فرسایش خاک را کاهش دهد (شکل ۵-۶).

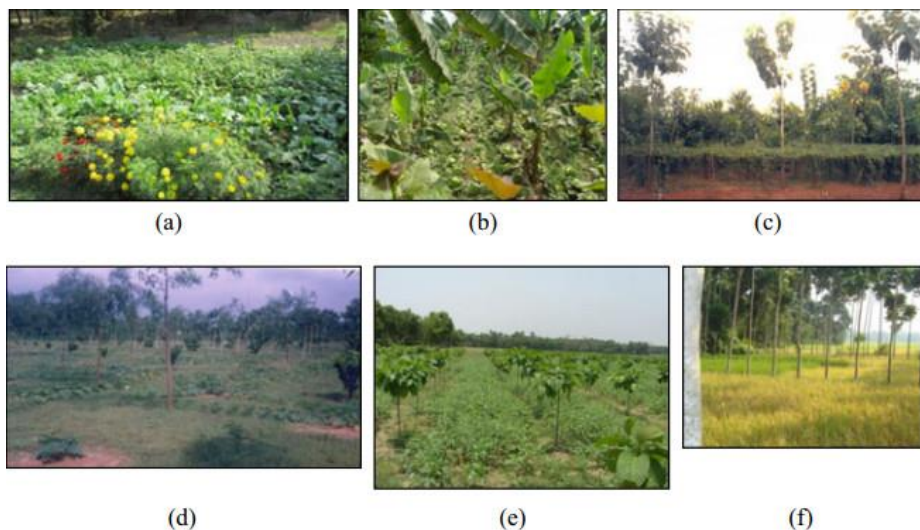


شکل ۵-۶- کود سبز: جوانه‌زنی گیاه ماش سیاه زیر درختان گلابی

(۵) خاک‌ورزی عمیق: با انجام خاک‌ورزی عمیق در برخی مناطق و خاک‌ها، ظرفیت جذب آب خاک افزایش می‌یابد. این روش همچنین تخلخل و نفوذپذیری خاک را بهبود داده و فرسایش خاک را کاهش می‌دهد.

(۶) کشت ترکیبی و کاشت مخلوط درختان: ترکیب کشت محصولات با زمان‌های کاشت و دوره‌های رشد متفاوت، به‌ویژه با کاشت درختان در مزارع و حاشیه‌های آن، به

استفاده بهتر از رطوبت خاک و حفظ آن کمک کرده و کیفیت و پایداری خاک در تولید محصولات را بهبود می‌بخشد (شکل ۶-۶).



شکل ۶-۶- کاشت مخلوط: a: کشت مخلوط، b: کاشت مخلوط: موز با کلم، c: مزارع مرتعی، d: کاشت درخت در مزارع محصولات، e: کشت کنگد با درختان جوان کادام، f: کاشت درختان در مرزهای مزارع برنج

(۷) شخم نواری: به جای شخم زدن در جهت شیب، شخم نواری در امتداد خطوط تراز (عرضی) انجام می‌شود (شکل ۶-۷). این کار موانعی در برابر حرکت آب ایجاد کرده و باعث حفظ بیشتر آب در خاک و کاهش سرعت رواناب می‌شود. این روش به کنترل فرسایش و رواناب و همچنین افزایش حفظ رطوبت و حاصلخیزی خاک کمک می‌کند (شکل ۶-۸).

(۸) استحصال آب باران: آب باران اضافی، مانند رواناب، در حوضچه‌های حفر شده، به‌ویژه در ارتفاعات پایین‌تر یا گودال‌های مزارع کشاورزی جمع‌آوری می‌شود. این کار

به کاهش رواناب، جلوگیری از فرسایش خاک و استفاده چندمنظوره از آب برداشت شده کمک می‌کند (شکل ۶-۹). استخرهای استحصال آب باران، که به‌عنوان استخرهای مزرعه نیز شناخته می‌شوند، می‌توانند به نفوذ آب به خاک، حفظ رطوبت خاک، کنترل سیل، مدیریت خشکسالی، افزایش تنوع زیستی و بهبود وضعیت مواد غذایی خاک کمک کنند و خدمات بوم‌سازگانی را بهبود بخشند.

با این حال، برنامه‌ریزی برای ساخت استخرهای مورد نیاز در مزرعه باید با توجه به تعادل هیدرولوژیکی، شرایط هیدروژئولوژیکی و نیازهای اجتماعی منطقه انجام شود. در غیر این صورت، ممکن است در فصول خشک، استخرهای کوچک خشک شوند. همچنین، عمق حوضچه‌ها باید مناسب انتخاب شود، به‌ویژه در مناطق ساحلی که ممکن است تحت تأثیر آب‌های زیرزمینی شور قرار گیرند. عمق زیاد استخرها می‌تواند باعث شوری آب آن‌ها به دلیل ارتباط با آب‌های زیرزمینی شور شود.



شکل ۶-۷- شخم نواری: شخم زدن در سراسر شیب



شکل ۶-۸- کشت نواری: خردل (مقاوم در برابر فرسایش) و کلم و گل کلم (غیرمقاوم در برابر فرسایش)

۶-۳-۱- ملاحظات اجرایی برای فناوری‌های حفظ رطوبت خاک

برای ارزیابی فناوری‌های حفظ رطوبت خاک، چهار جنبه مختلف مورد بررسی قرار گرفته و این ارزیابی بر اساس یک مقیاس مشخص ارائه شده است که اعداد از ۱ تا ۵ را در برمی‌گیرد (UN CTCN، ۲۰۱۷).

(I) تکامل تکنولوژیکی: در مراحل اولیه تحقیق و توسعه، فناوری‌ها تا مرحله ۵ به‌طور کامل و گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه، فناوری‌های حفظ رطوبت خاک ممکن است به‌عنوان مرحله ۵ ارزیابی شوند، هرچند که این فناوری‌ها به‌طور خاص برای هر منطقه طراحی شده‌اند.

(II) سرمایه‌گذاری اولیه: از هزینه بسیار کم (۱) تا سرمایه‌گذاری بسیار پرهزینه (۵) برای پیاده‌سازی فناوری. در اینجا، فناوری‌ها ممکن است به‌عنوان گزینه‌های کم‌هزینه

ارزیابی شوند، زیرا برخی از مداخلات نیاز به هزینه ندارند و ممکن است مواد مورد نیاز به‌طور رایگان در مزارع موجود باشند یا به‌عنوان مواد دورریز دیگر استفاده شوند.



الف: استخرهای
استحصال آب باران



ب: گوسفندان به آب
استخر مزرعه وابسته
هستند.



ج: گاوها به آب استخر
مزرعه وابسته هستند.



د: طیور به آب استخر
مزرعه وابسته است.



ه: کشاورزی تلفیقی مبتنی
بر استخرهای استحصال
آب باران



و: آبیزان در
استخرهای استحصال
آب باران مزرعه



ز: ماهیگیری از استخر مزرعه



ح: دامپروری و سکونت
انسان بر اساس آب
استخرهای استحصال آب

شکل ۶-۹- استخری در مزرعه جهت جمع آوری آب باران و کاربردهای چند منظوره آن

(III) هزینه‌های عملیاتی: از هزینه بسیار کم/بدون هزینه (۱) تا هزینه‌های بسیار بالا (۵) برای بهره‌برداری و نگهداری. در این زمینه، فناوری‌های حفاظت از رطوبت خاک ممکن است به‌عنوان ۱ ارزیابی شوند، زیرا این فناوری‌ها معمولاً ساده هستند و کارگران ماهر می‌توانند به راحتی از آن‌ها استفاده کنند.

(IV) چارچوب زمانی پیاده‌سازی: از بسیار سریع برای اجرا و رسیدن به ظرفیت مورد نظر (۱) تا سرمایه‌گذاری قابل توجه زمانی برای ایجاد و/یا رسیدن به ظرفیت کامل (۵). در این زمینه، اکثر فناوری‌های نگهداری رطوبت خاک ممکن است به‌عنوان ۱ ارزیابی شوند، زیرا این فناوری‌ها می‌توانند به‌سرعت پس از باران اجرا شوند، در حالی که فناوری‌هایی مانند مخازن جمع‌آوری آب باران نیاز به حفاری در فصل خشک و جمع‌آوری آب در فصل‌های بارانی دارند. همچنین، مالچ‌پاشی می‌تواند در دوره‌های خشک به‌طور مداوم انجام شود تا از تبخیر سطح خاک جلوگیری کند.

به‌طور کلی، فناوری‌های حفاظت از رطوبت خاک دارای ویژگی‌های زیر هستند: (۱) سازگاری و تکامل بالا، (۲) نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بسیار کم، (۳) هزینه‌های عملیاتی پایین و (۴) زمان اجرای کوتاه.

۶-۴- نقش‌های مفید حفظ رطوبت خاک

(I) مزایای روش‌های حفاظت از خاک: این روش‌ها معمولاً شامل کاهش سرعت رواناب، حفظ رطوبت خاک، افزایش نفوذ آب و کمک به کنترل فرسایش خاک هستند. همچنین، بسته به مواد مورد استفاده، این روش‌ها می‌توانند به حفظ مواد غذایی خاک، کنترل علف‌های هرز، کنترل دمای خاک و کاهش تأثیرات باران شدید، باد و خورشید کمک کنند.

(II) اجرای فناوری‌های نگهداری رطوبت خاک: این فناوری‌ها فرایند بازیافت فعال مواد آلی زائد را تسهیل می‌کنند. با بازگرداندن مواد آلی زائد گیاهان به خاک از طریق تجزیه، نیاز به مدیریت مواد زائد کاهش می‌یابد.

(III) مزایای اجتماعی و اقتصادی:

(الف) فناوری‌های حفظ رطوبت خاک می‌توانند نیازهای آبیاری را کاهش دهند، کیفیت خاک را بهبود بخشند و بهره‌وری آب و محصول را افزایش دهند.
(ب) کاهش نیازهای آبیاری به نوبه خود به کاهش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب برای آبیاری منجر می‌شود (UN CTCN، ۲۰۱۷).

۵-۶- دورنما و مشکلات فناوری‌های حفظ رطوبت خاک

۵-۶-۱- دورنما فناوری‌های حفظ رطوبت خاک

ارتقا فناوری‌های حفظ رطوبت خاک می‌تواند بهبود قابل توجهی در حفظ رطوبت و کیفیت خاک داشته باشند و در نتیجه تخریب خاک را کاهش دهند. استفاده از مواد در دسترس محلی می‌تواند هزینه‌ها و نیاز به امکانات اضافی برای بازیافت و مدیریت زباله را کاهش دهد.

بسیاری از روش‌های حفاظت خاک و آب در سطح مزرعه، رویکردهای ساده و کم‌هزینه‌ای هستند که به مواد محلی و نیروی انسانی فنی بستگی دارند. این فناوری‌ها می‌توانند درآمدزایی داشته باشند و هم‌افزایی بین گزینه‌های مختلف کشاورزان محلی را افزایش دهند، مانند استفاده از پسماندهای مرغداری و دامداری به‌عنوان کمپوست (UN CTCN، ۲۰۱۷).

۵-۶-۲- مشکلات فناوری‌های حفظ رطوبت خاک

در برخی شرایط، بقایای گیاهی مثل شبدر یا کاه که به‌عنوان علوفه استفاده می‌شود، به‌عنوان «بقایا» محسوب نمی‌شود. بنابراین، برای حفظ رطوبت خاک به سرمایه‌گذاری اضافی نیاز است. این مشکل می‌تواند با برنامه‌ریزی جدید برای تناوب محصولات بر اساس موقعیت مکانی خاص حل شود (UN CTCN، ۲۰۱۷).

۶-۶- نتیجه گیری کلی

حفظ آب در فضاهاى خالى خاک، که شامل آب مایع و بخار آب می‌شود، یکی از ارزان‌ترین روش‌ها است. با این حال، رطوبت ذخیره‌شده در خاک نمی‌تواند برای مدت طولانی حفظ شود. این مسئله به رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه، جرم مخصوص ظاهری خاک، عمق مؤثر هیدرولوژیکی یا عمق ریشه‌زایی و تبخیر و تعرق بستگی دارد. بنابراین، حفظ بارندگی در محل بارش و استفاده از مخازن استحصال آب باران و منابع آب زیرزمینی برای تأمین آب آبیاری و رطوبت خاک مفید است. استفاده از مالچ نیز می‌تواند در این زمینه مؤثر باشد.

ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند ظرفیت نگهداری آب، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت در برابر نفوذ، با افزایش سرعت حرکت شیار بازکن‌ها کاهش می‌یابد. کمترین تغییرات در رطوبت خاک در مورد استفاده از شیار بازکن دو دیسکی با پره چرخان ساده مشاهده می‌شود. این شیار بازکن‌ها می‌توانند شکاف‌های ریزی در خاک ایجاد کنند بدون اینکه خاک را زیاد بهم بزنند و بقایای گیاهی را به‌خوبی قطع کنند. بنابراین، این شیار بازکن‌ها برای کشاورزی حفاظتی در سامانه کشت ذرت-گندم مناسب‌تر هستند.

منابع مورد استفاده

1. Arora, S., Hadda, M. S., & Bhatt, R. (2008). Tillage and mulching in relation to soil moisture storage and maize yield in foothill region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 7(2), 51–56.
2. Baker, C. J. (1976). Experiments relating to techniques for direct drilling of seeds into untilled dead turf. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21(2), 133–134.
3. Choudhary, M. A. (1988). A new multicrop inverted T seeder for upland crop establishment. *Agricultural Mechanization in Asia*, 19(3), 37–42.
4. FAO. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture—systems at breaking point. Synthesis Report 2021. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

5. Johnson, W. H., & Buchele, W. F. (1961). Influence of soil granule size and compaction on rate of soil drying and emergence of corn. *Transactions of the ASAE*, 4(2), 170–174.
6. King-Okumu, C. (2021). A rapid review of drought risk mitigation measures: integrated drought management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7085en>
7. Kirkby, M. J. (1976). Hydrological slope models: the influence of climate. In E. Derbyshire (Ed.), *Geomorphology and Climate* (pp. 247–267). Wiley.
8. Kumar, P. S. M., Sairam, M., Praharaj, S., & Maitra, S. (2021). Soil moisture conservation techniques for dry land and rainfed agriculture. *Indian Journal of Natural Sciences*, 12(69), 37386–37391.
9. Midya, A., Saren, B. K., Dey, J. K., Maitra, S., Praharaj, S., Gaikwad, D. J., ... Hossain, A. (2021a). Crop establishment methods and integrated nutrient management improve: Part I. Crop performance, water productivity and profitability of rice (*Oryza sativa* L.) in the lower Indo-Gangetic plain, India. *Agronomy*, 11, 1860. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091860>
10. Midya, A., Saren, B. K., Dey, J. K., Maitra, S., Praharaj, S., Gaikwad, D. J., ... Hossain, A. (2021b). Crop establishment methods and integrated nutrient management improve: Part II. Nutrient uptake and use efficiency and soil health in rice (*Oryza sativa* L.) field in the lower Indo-Gangetic plain, India. *Agronomy*, 11, 1894. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091894>
11. Mohanta, S., Banerjee, M., Malik, G. C., Shankar, T., Maitra, S., Ismail, I. A., ... Hossain, A. (2021). Productivity and profitability of kharif rice are influenced by crop establishment methods and nitrogen management in the lateritic belt of the subtropical region. *Agronomy*, 11, 1280. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071280>
12. Morgan, R. P. C. (2001). A simple approach to soil loss prediction: a revised morgan-morgan-finney model. *Catena*, 44, 305–322.
13. Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Blackwell Publishing.
14. Morgan, R. P. C., Morgan, D. D. V., & Finney, H. J. (1984). A predictive model for the assessment of erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30, 245–253.

15. Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Marcel Dekker Inc.
16. Sawant, S., Kumar, A., Mani, I., & Singh, J. K. (2016). Soil bin studies on the selection of furrow opener for conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 15(2), 107–112.
17. Shrestha, D. P., Suriyaprasit, M., & Prachansri, S. (2014). Assessing soil erosion in inaccessible mountainous areas in the tropics: the use of land cover and topographic parameters in a case study in Thailand. *Catena*, 121, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.016>
18. Sterk, G. (2021). A hillslope version of the revised Morgan, Morgan, and Finney water erosion model. *International Soil and Water Conservation Research*, 9, 319–332.
19. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley.
20. Tessier, S., Saxton, K. E., Papendiski, R. I., & Hyde, G. M. (1991). Zero tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence. *Soil and Tillage Research*, 21, 347–360.
21. UN CTCN. (2017). Soil moisture conservation techniques. UN Climate Technology Centre & Network (UN CTCN), United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Technology Mechanism. <https://www.ctc-n.org/technologies/soil-moisture-conservation-techniques>. Accessed 21 June 2022.
22. Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical Engineering*, 2nd Ed. New Age International (P) Ltd.
23. Wilkins, D. E., Muilenburg, G. A., Allamaras, R. R., & Johnson, C. E. (1983). Grain drill opener effects on wheat emergence. *Transactions of the ASAE*, 26(3), 651–655.

فصل ۷

مدیریت کربن آلی خاک

چکیده

مدیریت مواد آلی خاک برای تضمین امنیت غذایی و پایداری تولید محصول ضروری است. ماده آلی خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشد. این بهبود می‌تواند به کاهش فرسایش خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها، بهبود وضعیت آب در خاک و در دسترس بودن مواد غذایی کمک کند. کربن آلی خاک شاخص سلامت خاک است که با افزودن بهینه مواد آلی به خاک و تبدیل آن‌ها به ماده آلی خاک در مزارع، به پایداری حاصلخیزی خاک و دستیابی به امنیت غذایی کمک می‌کند.

کلمات کلیدی: آب، تولید مواد غذایی، کربن، کربن آلی خاک، مواد آلی خاک، میکروارگانیسم، هوموس

کلمات اختصاری

AOM	بخش اضافی مواد آلی
C	کربن
Cox	حالت اکسیداسیون
CO ₂	دی‌اکسیدکربن
EHS	ماده هیومیک قابل استخراج
FA	اسید فولیک
GHG	گازهای گلخانه‌ای
H	هیدروژن
HA	اسید هومیک

هوموس	HUM
تخریب زمین متعادل	LDN
جزء زنده مواد آلی	LivOM
نیتروژن	N
آمونیاک	NH ₃
خدمات حفاظت از منابع طبیعی	NRCS
جزء غیرزنده مواد آلی	NonLivOM
اکسیژن مولکولی	O ₂
مواد آلی	OM
نسبت اکسیداتیو	OR
فسفر	P
گوگرد	S
کربن آلی خاک	SOC
ماده آلی خاک	SOM
نیتروژن آلی خاک	SON
هدف توسعه پایدار	SDG
کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد در اروپا	UNECE
سازمان ملل متحد	UN
وزارت کشاورزی ایالات متحده	USDA
مواد شناور آب	WFS
هیومیک محلول در آب	WSS

۷-۱- مقدمه

مواد آلی خاک (SOM) شامل تمام مواد آلی طبیعی است که از تجزیه مواد آلی در خاک یا بر روی سطح خاک به وجود می‌آید. این مواد می‌توانند از منابع زنده یا مرده، از جمله بقایای گیاهان و جانوران، باشند و به جز بخش‌های زنده بالای گیاهان در مراحل مختلف تجزیه قرار داشته باشند (Baldock و Broos، ۲۰۱۶؛ Tan، ۲۰۱۴). SOM نتیجه تجزیه مواد بیولوژیکی مانند بقایای گیاهی، حیوانی و میکروبی در خاک است (شکل ۷-۱) و بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارد. ترکیب و سرعت تجزیه SOM بر ساختمان خاک، تخلخل، سرعت نفوذ آب، و ظرفیت نگهداری آب در خاک تأثیر دارد. همچنین، ظرفیت تبادل کاتیونی، در دسترس بودن مواد غذایی گیاه و فعالیت‌های موجودات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

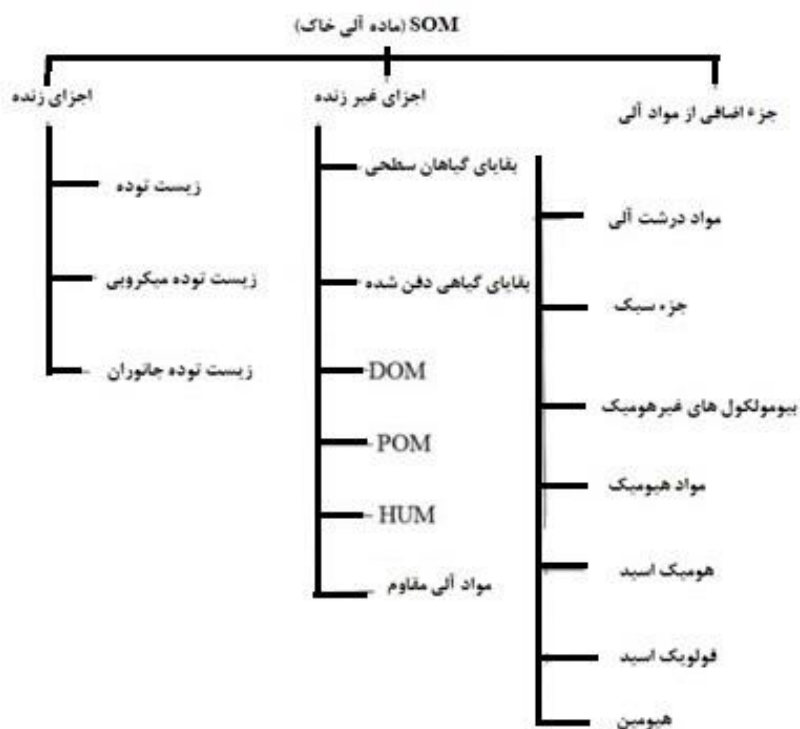
چرخه‌های مواد غذایی گیاهان با کشت فشرده و عدم بازیابی مواد آلی خاک از تعادل خارج می‌شوند. این موضوع می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری خاک و آسیب به بوم‌سازگان کشاورزی شود.

مواد آلی خاک (SOM) می‌تواند به‌طور قابل توجهی ظرفیت خاک را بهبود بخشد. این بهبود از طریق ذخیره و تأمین مواد غذایی ضروری برای گیاهان و نگهداری عناصر سمی با استفاده از کلات‌ها صورت می‌گیرد. همچنین، SOM انعطاف‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد و به تجزیه سریع‌تر مواد معدنی کمک می‌کند. کربن خاک که بخش اصلی SOM است، نقش کلیدی در کارکرد خاک برای تولید محصولات و خدمات زیست‌محیطی ایفا می‌کند و به پایداری حاصلخیزی خاک و سلامت بوم‌سازگان کمک می‌کند. بنابراین، SOM می‌تواند بسیاری از تهدیدات خاک را کاهش دهد و با مدیریت مناسب کربن خاک، می‌توان به این اهداف دست یافت.

SOM توانایی معکوس کردن روند تخریب زمین و بهبود کارکرد خاک را دارد. کربن خاک به‌طور مستقیم بر پنج خدمت ضروری بوم‌سازگان تأثیر می‌گذارد: چرخه مواد

غذایی، تأمین و کیفیت آب، حمایت از تنوع زیستی، حفظ شبکه غذایی خاک، و تعدیل تغییرات اقلیمی با کاهش گازهای گلخانه‌ای.

در نتیجه، وظایف SOM در خاک نقش مهمی در حفظ بهره‌وری مواد غذایی از زمین‌های کشاورزی و تالاب‌ها دارند و به تأمین اهداف تخریب زمین متعادل (LDN) و سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک می‌کند (Borrelli و همکاران، ۲۰۱۸؛ Kasimir و همکاران، ۲۰۱۸؛ Lal، ۲۰۱۸).



شکل ۷-۱- اجزای ماده آلی خاک (SOM) (بر اساس Baldock و Broos، ۲۰۱۲)

ادامه شکل ۷-۱- اجزای ماده آلی خاک (SOM) (بر اساس Baldock و Broos, ۲۰۱۲)

اجزای ماده آلی خاک	توضیحات
زی توده	بافت های زنده با منشأ گیاهی و درختان مرده
زیست توده میکروبی	سلول های میکروارگانیسم های زنده خاک
زیست توده جانوران	جانوران زنده خاک
بقایای گیاهان سطحی	بقایای آلی روی سطح خاک (بقایای گیاهی از جمله لاشبرگ)
بقایای گیاهی دفن شده	بقایای آلی (بیش از دو میلی متر) در ماتریکس خاک
مواد آلی محلول	ترکیبات آلی محلول در آب (>۴۵/۰ میلی متر) در محلول خاک
ذرات مواد آلی	بقایای آلی (۲۰۰-۵۳ میکرومتر) با ساختار سلولی قابل تشخیص عمدتاً از بقایای گیاهی
هوموس	مواد آلی (>۵۳ میکرومتر) باقی مانده پس از حذف ترکیبات آلی محلول و ذرات مواد آلی
مواد آلی مقاوم	مواد آلی بسیار کربن دار از جمله زغال چوب، مواد گیاهی زغالی، گرافیت و زغال سنگ با زمان گردش طولانی
مواد آلی بزرگ	قطعات مواد آلی (بیش از ۲۰ میکرومتر یا بیش از ۵۰ میکرومتر) در ماتریکس خاک
جزء سبک	مواد آلی جدا شده از خاک با شناورسازی سوسپانسیون های پراکنده روی آب یا مایعات سنگین با تراکم ۱/۵ تا ۲ مگاگرم بر متر مکعب
بیومولکول های غیر هومیک	بیوپلیمرهای آلی شامل پلی ساکاریدها و قندها، پروتئین ها و اسیدهای آمینه، چربی ها، موم ها و سایر لیپیدها و لیگنین
مواد هیومیک	مولکول های آلی با ساختار شیمیایی که اجازه نمی دهد آن ها را در دسته مولکول های زیستی غیر هومیک قرار دهند.
هومیک اسید	مولکول های آلی محلول در محلول های قلیایی اما در اسیدی شدن عصاره های قلیایی رسوب می کنند.
فولویک اسید	مولکول های آلی در محلول قلیایی محلول هستند و در اسیدی شدن عصاره های قلیایی محلول باقی می مانند.
هیومین	مواد آلی که در محلول قلیایی نامحلول هستند.

اکنون نقش مواد آلی خاک به عنوان کربن آلی خاک (SOC) به خوبی شناخته شده است و به عنوان یکی از عوامل کلیدی در هدف توسعه پایدار (SDG15) سازمان ملل متحد با عنوان "زندگی در زمین" (حفاظت و مدیریت پایدار از بوم سازگان های زمینی،

جنگل‌ها، مبارزه با بیابان‌زایی، و بازگرداندن خاک و تنوع زیستی) مورد توجه قرار دارد. همچنین هدف توسعه پایدار SDG15.3 تمرکز بر مبارزه با بیابان‌زایی و بازیابی اراضی تحت تأثیر بیابان‌زایی، خشکسالی و سیل تا سال ۲۰۳۰ مطرح شده است (UNECCE، ۲۰۲۲؛ UN، ۲۰۱۸، ۲۰۲۲).

در این راستا، بررسی علمی مکانیسم‌های بیوژئوشیمیایی و فیزیکی مرتبط با تحرک SOM به عنوان نماینده SOC و کاربرد آن در تصمیم‌گیری برای کاهش اثرات تغییر اقلیم ضروری است. کاهش تلفات SOC و توسعه مکانیزم‌های پشتیبانی در سطح مزرعه برای حفظ و افزایش ذخایر کربن خاک، با معکوس کردن روند فرسایش خاک و در نتیجه تضمین امنیت غذایی، بسیار اهمیت دارد.

۷-۲- روابط متقابل SOM، کربن، نیتروژن، فسفر، گوگرد و هوموس

رابطه SOM و اجزای آن (شکل ۷-۱) را می‌توان از طریق رابطه (۷-۱) بیان کرد.

$$SOM = LivOM + NonLivOM + AOM \quad (7-1)$$

در اینجا، LivOM، NonLivOM و AOM به ترتیب نشان‌دهنده (۱) اجزای زنده، (۲) اجزای غیر زنده و (۳) بخش‌های اضافی از مواد آلی (از جمله هوموس) SOM هستند (شکل ۷-۱).

انواع مختلفی از مواد آلی وجود دارد که بر این اساس، SOM را می‌توان به‌طور کلی به چهار طبقه دسته‌بندی کرد که عبارت‌اند از (۱) مواد شناور در آب (WFS)، (۲) مواد هیومیک محلول در آب (WSS)، (۳) مواد هیومیک قابل استخراج (EHS) و (۴) هومین باقیمانده (رابطه ۷-۲) (Dou و همکاران، ۲۰۲۰).

$$SOM = WFS + WSS + EHS + humin \quad (7-2)$$

از بین این چهار جزء، هوموس (HUM) را می‌توان به‌صورت رابطه (۷-۳) بیان کرد.

$$Humus = WSS(part) + EHS + humin \quad (7-3)$$

که در آن، (۱) EHS مجموع اسیدهای هیومیک و اسیدهای فولویک، (۲) HA، اسیدهای هیومیک، (۳) FA، اسیدهای فولویک و (۴) HUM، مجموع اسیدهای هیومیک و اسیدهای فولویک و هومین است.

معدنی شدن SOM موجب آزادسازی مواد غذایی اصلی از مواد هیومیک در ماتریس خاک می‌شود. فرایندهای برگشت‌پذیر معدنی شدن و تثبیت، تناسب‌هایی بین کربن (C) و نیتروژن (N)، فسفر (P) و گوگرد (S) ایجاد می‌کند. این تناسب‌ها، که به نسبت‌های خاص C:N، C:P، C:S بستگی دارند، بسته به نوع خاک، وضعیت زمین، کاربری اراضی و اقلیم، متفاوت هستند.

نسبت‌ها، به‌ویژه نسبت C:N، به‌عنوان شاخص‌های سطح حاصلخیزی خاک برای رشد بهتر محصول و پایداری در تولید مواد غذایی عمل می‌کنند. SOM به‌عنوان منبع طبیعی "آهسته رهش" مواد غذایی گیاه، به غیر از رس کلوئیدی و ذرات ریز خاک مانند سیلت، در درازمدت در حفظ حاصلخیزی خاک مؤثر است.

به‌طورکلی، مقدار C:N در SOM در خاک‌های کشاورزی از ۸:۱ تا ۱۵:۱، با میانگین بین ۱۰:۱ و ۱۲:۱ متغیر است. در مراتع و خاک‌های جنگلی، نسبت کربن به نیتروژن (C) به‌ترتیب حدود ۱۱/۸ و ۱۲/۲ است. این نسبت در مواد گیاهی بین ۲۰:۱ تا ۳۰:۱ متغیر است، و در کمپوست تولید شده در مزارع، نسبت C می‌تواند به ۱۰۰:۱ برسد (Baldock و Broos، ۲۰۱۲؛ Buckman و Brady، ۱۹۷۴).

تخمین مواد آلی خاک (SOM) با استفاده از مقدار وزنی کربن آلی و/یا نیتروژن کل انجام می‌شود. معمولاً از ضریب ۱/۷۲ استفاده می‌شود که بر اساس جرم بیان شده و با فرض اینکه کربن تقریباً ۵۸ درصد وزن SOM است، برای تبدیل میزان کربن آلی به میزان وزنی SOM به‌کار می‌رود. بنابراین، مقدار SOC (گرم کربن در هر کیلوگرم خاک) به‌طور معادل میزان SOM (گرم در هر کیلوگرم خاک) را نشان می‌دهد (رابطه ۷-۴).

$$SOM = 1.72 \times SOC \quad (۷-۴)$$

و با در نظر گرفتن نسبت C:N و نیتروژن آلی خاک (SON)، گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک)، رابطه (۴-۷) را می توان مانند رابطه (۵-۷) نوشت.

$$SOM = 1.72 \times C:N \text{ ratio} \times SON \quad (5-7)$$

نسبت مولی بین C:N:P:S در SOM حدود ۱۰۷:۷,۷:۱:۱ برآورد شده است. متوسط نسبت C:N:P برای خاک و زیست توده میکروبی به ترتیب حدود ۱۸۶:۱۳:۱ و ۶۰:۷:۱ است. خاک های مرتعی به غنی بودن از مواد غذایی و خاک های جنگلی به غنی بودن از کربن گرایش دارند.

اگرچه نسبت مولی C:O:H در مواد آلی خاک به طور عمومی استفاده نمی شود، یکی از ویژگی های مفید دیگر SOM، حالت اکسیداسیون (Cox) است که می توان آن را از ترکیب عنصری مولی محاسبه کرد. مقدار Cox برای یک مولکول آلی خاص یا برای SOM، با استفاده از درصدهای مولی x, y, z و w برای کربن (C)، هیدروژن (H)، اکسیژن (O) و نیتروژن (N) به ترتیب، در مولکول یا میانگین وزنی مولکول $C_xH_yO_zN_w$ می تواند به صورت زیر محاسبه شود (معادله ۶-۷).

$$C_{ox} = \frac{2Z - y + 3w}{x} \quad (6-7)$$

با توجه به مصرف اکسیژن مولکولی (O_2) و انتشار دی اکسید کربن (CO_2) در طول تجزیه مواد آلی (معدنی شدن)، نسبت اکسیداتیو (OR) یکی از ویژگی های مفید است. این نسبت به عنوان نسبت مولی مصرف O_2 به انتشار CO_2 در فرآیند تجزیه تعریف می شود. با فرض اینکه فتوسنتز خالص بر اساس رابطه (۷-۷) انجام می شود و تمام نیتروژن به عنوان آمونیاک (NH_3) تولید می شود، می توان OR را از حالت اکسیداسیون (Cox) با استفاده از معادله (۸-۷) محاسبه کرد.

$$xCO_2 + 1/2 (y-3w) H_2O + wNH_3 \rightarrow C_xH_yO_zN_w + [x + 1/4(y-3w) - z/2]O_2 \quad (7-7)$$

$$OR = 1 - 1/4 C_{ox} \quad (8-7)$$

مقادیر Cox ممکن است از ۴- تا ۴+ متفاوت باشد، اما در مولکول‌های آلی معمولاً بین ۲/۲- و ۳+ است. به‌طور خاص، مقادیر Cox برای لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آلی به‌ترتیب ۲- تا ۱-، ۰ و ۰ تا ۳+ است. از مقادیر Cox ماده آلی خاک و اجزای آن می‌توان برای شناسایی ترکیب مولکولی، مسیر ترکیب بیوشیمیایی، سطح تجزیه و زمینه دیاژنتیکی استفاده کرد. به‌عنوان مثال، مقادیر Cox کمتر از ۱- معمولاً نشان‌دهنده وجود ساختارهای لیپیدی/آلیفاتیک است، در حالی که مقادیر Cox بیشتر از یک احتمالاً به مقدار بالای اسیدهای کربوکسیلیک اشاره دارد.

مقادیر حالت اکسیداسیون (Cox) که در محدوده ۱- تا ۱+ قرار دارند، چندان مفید نیستند، زیرا ترکیبات مختلف می‌توانند چنین مقادیر مشابهی را تولید کنند. این مقادیر Cox می‌توانند برای کمی‌سازی و استفاده مؤثر از SOM در جهت تولید غذای پایدار و سایر کاربردهای مربوط به خدمات بوم‌سازگان خاک و آب و محیط زیست استفاده شوند (Baldock و Broos, ۲۰۱۲).

۳-۷- نقش مواد آلی خاک در پایداری خاکدانه‌ها

مواد آلی خاک (SOM) محیطی است که زندگی در آن در میان ذرات ریز و خرد شده سنگ‌ها که به‌دلیل هوازدگی شکل گرفته‌اند، رخ می‌دهد. خدمات بوم‌سازگانی که از طریق SOM ارائه می‌شود شامل: (i) تهویه خاک، (ii) مخزن مواد غذایی، (iii) حمایت از فعالیت میکروبی به‌عنوان بستر، (iv) حفاظت از محیط زیست و (v) حفظ و افزایش بهره‌وری کشاورزی و امنیت غذایی است. وجود آب برای کارکرد مؤثر تمام این خدمات بوم‌سازگانی ضروری است.

خاک عمدتاً از چهار قسمت تشکیل شده است: ذرات SOM و مواد معدنی خاک دو قسمت جامد آن هستند که به‌ترتیب حدود نیمی از حجم کل خاک را به‌طور متوسط پنج و ۴۵ درصد تشکیل می‌دهند (شکل ۷-۲). نیمی دیگر از خاک شامل آب و هواست که

به‌طور مساوی حجمی را پر می‌کنند (USDA NRCS, ۲۰۲۲؛ Brady و Buckman, ۱۹۷۴؛ Toor و Kalev, ۲۰۱۸).

محتوای SOM در خاک‌های کشاورزی معمولاً از یک تا پنج درصد تغییر می‌کند، اما می‌تواند از یک تا ۱۰۰ درصد در خاک‌های بیابانی و خاک‌های آلی متغیر باشد. مقدار کم SOM در خاک‌ها به‌طور قابل توجهی باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری می‌شود و این امر به تخریب ساختمان خاک و کاهش کیفیت خاک منجر می‌شود.

مقادیر کم SOM به‌دلیل معدنی شدن ناشی از دمای بالا و استفاده زیاد از خاک در کشاورزی ایجاد می‌شود. جرم مخصوص ظاهری بالا همچنین بر حرکت آب در خاک تأثیر می‌گذارد و ممکن است باعث ایجاد لایه‌های سخت یا غیرقابل نفوذ در خاک شود (Akamigbo و Igwe, ۱۹۹۰؛ Igwe, ۲۰۰۳؛ Igwe و همکاران, ۱۹۹۵، ۲۰۰۵؛ Mbagwu و همکاران, ۱۹۲۰؛ Schnitzer, ۲۰۰۵).

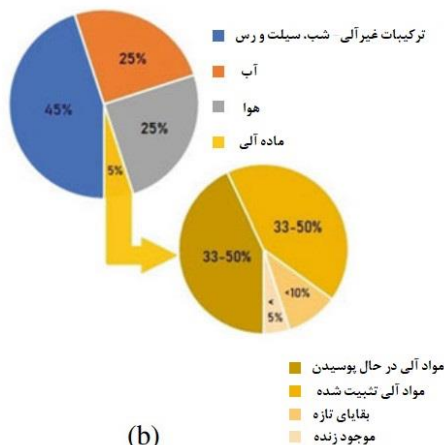
پتانسیل تشکیل ویژگی‌های پایدار مانند خاکدانه‌های پایدار در خاک‌های استوایی بالا است. این ویژگی‌ها با نسبت پراکندگی پایین و درصد بالا از خاکدانه‌های پایدار در آب، به‌ویژه در حضور کانی‌هایی مانند کائولینیت، اکسیدها و کوارتز، افزایش می‌یابد. ماده آلی، مانند سزکویی اکسیدها، به‌عنوان عامل سیمانی‌شدن عمل می‌کند و پیوندهای بین ذرات خاک را تقویت کرده و نسبت پراکندگی خاک را کاهش می‌دهد، در نتیجه خاک را از فرسایش محافظت می‌کند (Glinski و همکاران, ۲۰۱۱).

بقایای گیاهی، جانوری و زیواگان (بیوتای) خاک، منبع اصلی همه مواد کربنی خاک مانند ماده آلی خاک هستند (شکل ۷-۳). تجمع ماده آلی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله مقدار بقایا، شرایط اقلیمی، موقعیت زمین، بافت خاک، میزان حضور آب و ریز جانداران در محیط خاک، شرایط رد اکس (اکسایش و کاهش) و دیگر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک است (Medina-Sauza و همکاران, ۲۰۱۹؛ Pett-Ridge و همکاران, ۲۰۲۱؛ Powlson و همکاران, ۲۰۲۲؛ Schmidt و همکاران, ۲۰۰۲؛ Stevenson, ۱۹۶۴؛ Sun و Ge, ۲۰۲۱؛ Wertz و همکاران, ۲۰۱۲).



خاک
مواد معدنی ۴۵ درصد
مواد آلی ۵ درصد
هوا ۲۵ درصد
آب ۲۵ درصد

(a)



(b)

شکل ۷-۲- ترکیب خاک (بر اساس Buckman و Brady، ۱۹۷۴؛ Kalev و Toor، ۲۰۱۸؛ USDA

NRCS، ۲۰۲۲): a: خاک، b: خاک و ماده آلی خاک

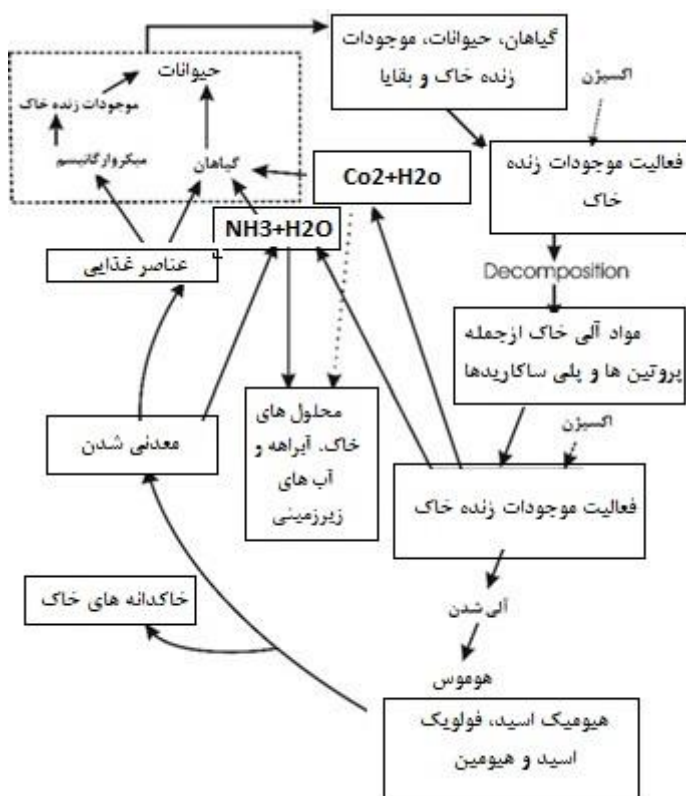
مواد هیومیکی، که فراوانترین مولکولهای درشت آلی طبیعی هستند، جزء اصلی ماده آلی خاک در خاکهای خوب هوموسی شده به شمار می آیند. عصاره گرفته شده از مواد هیومیکی خاک معمولاً به سه بخش تفکیک می شود:

۱. بخش HA که هنگام اسیدی شدن عصاره به $\text{pH} = 2$ می رسد.
۲. بخش FA که بعد از اسیدی شدن هم به صورت محلول باقی می ماند و در هر دو محیط اسیدی و قلیایی محلول است.
۳. بخش هومین که با ترکیبات غیر آلی خاک باقی می ماند و در هر دو محیط قلیایی و اسید نامحلول است.

ساختار مواد هیومیک بسیار پیچیده تر از هر بیوپلیمری است که تحت عوامل بیولوژیکی یا ژنتیکی تولید می شود. این سه بخش مواد هیومیکی، ترکیب شیمیایی مجزایی نیستند و از صدها ترکیب مرتبط در سطوح مولکولی تشکیل شده اند که به وضوح شناسایی نشده اند. ساختار و ترکیب این مواد، مولکولهای پیچیده ای از پلیمرهای اصلی طبیعی مانند پروتئین ها، پلی ساکاریدها و اسیدهای نوکلئیک هستند (Chen، ۱۹۹۸؛

Christensen و Johnston، ۱۹۹۷؛ Gerke، ۲۰۱۸؛ Schnitzer، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵؛ Trivedi و همکاران، ۲۰۱۸).

تشکیل مواد هیومیک از مواد اولیه مختلف در حضور محیط‌های خاکی متنوع و موجودات خاکی، تحت تأثیر فرایندهای تخریبی و مصنوعی مختلف انجام می‌شود. به همین دلیل، مولکول‌های هیومیک در هر نمونه مشابه نیستند و جداسازی آنها به اجزای همگن برای تحلیل دقیق ساختارشان مشکل است.

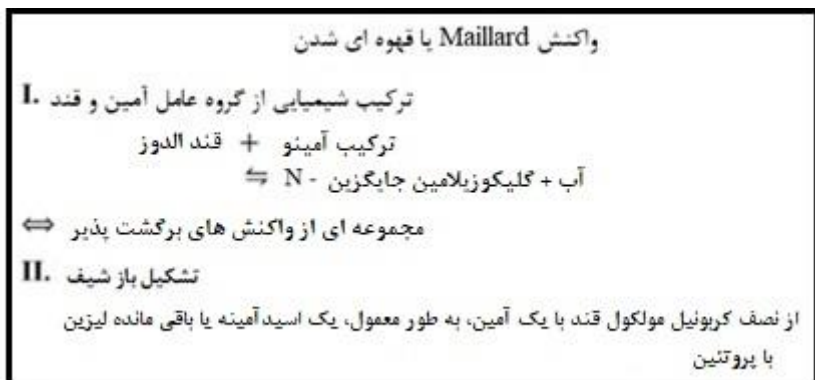


شکل ۷-۳- ماده آلی خاک (SOM) در چرخه اکولوژیکی خاک که شامل کارکردهای مختلف خاک است (بر اساس Stevenson، ۱۹۶۴)

شناسایی و تمایز هر یک از مؤلفه‌های هیومیک به‌طور جداگانه از دیگر مؤلفه‌ها در همان محیط و از مؤلفه‌های مشابه در محیط‌های مختلف اهمیت زیادی دارد. فرایندهای هوموسی شدن شامل حفظ انتخابی باقیمانده‌های زیستی یا مؤلفه‌های مقاوم به تجزیه و تبدیل آن‌ها به مولکول‌های ماکرومولکولی هوموس است. این شامل ترکیب میکروارگانیسم‌ها با باقیمانده‌های آلی نیز می‌شود.

ترکیب شیمیایی ماکرومولکول‌های هیومیک ممکن است شامل واکنش‌های گسترده میلارد یا قهوه‌ای شدن باشد. این واکنش‌ها شامل ترکیب آمین و قند و تشکیل باز شیف از کربونیل مولکول قند با یک آمین، معمولاً اسیدآمین یا باقی‌مانده لیزین یا پروتئین، در یک سری واکنش‌های برگشت‌پذیر است. این فرایند به‌دلیل حمله گروه اسیدآمین هسته‌دوست به کربونیل الکتروفیل قند اتفاق می‌افتد (شکل ۷-۴).

شکل‌گیری رنگ در مخلوط‌های قندی کاهنده آبی/اسیدآمین به‌طور مستقیم با درصد قند احیاکننده به شکل آلدئید تغییر می‌کند. علاوه بر این، بقایای لیگنین می‌توانند به مواد هیومیک کمک کنند و ساختارهای لیگنین از ویژگی‌های اجزای هیومیک تازه تشکیل‌شده هستند (Haider و همکاران، ۱۹۶۵؛ Hopkins و Shiel، ۱۹۹۱؛ Kogel-Knabner و همکاران، ۱۹۹۲؛ Haider و Guggenberger، ۲۰۰۵؛ Hayes و همکاران، ۲۰۱۷؛ Kopecký و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۷-۴- واکنش Maillard یا قهوه‌ای شدن

با پیشرفت فرایند هوموسی شدن، افزودن گروه‌های فنلی مانند لیگنین به ساختارهای هیومیک کاهش می‌یابد. این فرایند که به آن معدنی شدن لیگنین می‌گویند، در خاک‌هایی که تحت کشت آیش و بدون پوشش و کشت تک‌محصولی هستند، انجام می‌شود. این خاک‌ها معمولاً کربن (C) و نیتروژن (N) کل کمتری دارند، مگر اینکه تحت تناوب زراعی یا با افزودن کودهای آلی باشند (Broos و Baldock, ۲۰۱۲؛ Nelson و Baldock, ۲۰۰۰؛ Johnston و Christensen, ۱۹۹۷).

علاوه بر لیگنین، پلی‌ساکاریدها نیز از اجزای اصلی SOM خاک هستند و نقش مهمی در محیط خاک دارند. مشخص شده است که بخش‌های مختلف SOM در اندازه‌های مختلف خاک متفاوت هستند. محتویات فنل، که احتمالاً منبع آن لیگنین است، در ذرات کوچک‌تر خاک افزایش می‌یابد، در حالی که مولکول‌های اکسیژن-الکیل، که احتمالاً منبع آن‌ها کربوهیدرات‌ها هستند، با بزرگ‌ترین بخش‌های ذرات خاک مرتبط هستند.

با توجه به حساسیت SOM به فرایندهای تجزیه و معدنی شدن، کربن بیولوژیکی ناپایدار را می‌توان با تخمین کربن و نیتروژن مرتبط با زیست‌توده میکروبی خاک و دی‌اکسید کربن معدنی شده در مدت زمان معین تعیین کرد. همچنین، لازم به ذکر است که شرایط ساختمان خاک می‌تواند با تأثیر بر کارکرد خاک و دسترسی به آب و اکسیژن، دینامیک تجمع خاک، دسترسی میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده به SOC و سپس دسترسی شکارچیان جانوری به میکروارگانیسم‌ها، تجزیه بیولوژیکی SOM را به طور قابل توجهی کنترل کند. این به دلیل توانایی خاک رس برای محدود کردن SOM و محصور شدن SOC در خاکدانه‌ها و منافذ کوچک خاک است.

منافذ خاک با اندازه کمتر از سه میکرومتر برای تجزیه‌کننده‌های میکروبی قابل دسترسی نیستند. SOM جذب شده روی ذرات رس با چنین شرایط منفذی، به دلیل انتشار آنزیم‌های خارج سلولی از میکروارگانیسم‌ها و سپس انتشار محصولات آنزیمی به سمت میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شود. بنابراین، ذرات خاک می‌توانند باعث تجزیه آهسته

SOM شوند و در نتیجه سرعت دسترسی به مواد غذایی در محلول خاک کاهش یابد و مواد غذایی از ماتریس خاک شسته شوند.

علاوه بر این، کربن از طریق ترکیب در سلول‌های میکروبی نیز حفظ می‌شود که به آن "بازده میکروبی" می‌گویند و مقدار آن برای گونه‌های مختلف میکروبی، ویژگی‌های خاک و کیفیت بقایای در حال تجزیه، متفاوت است. معدنی شدن SOC به‌طور متفاوتی به‌عنوان "تنفس خاک"، "تنفس پایه" یا "تنفس میکروبی" نامیده می‌شود و به‌عنوان یک شاخص از فعالیت بیولوژیکی در ماتریس خاک است. فعالیت بیولوژیکی معمولاً در بازه‌های زمانی از چند روز تا چند هفته اندازه‌گیری می‌شود و ارزیابی انتشار دی‌اکسید کربن ($\text{CO}_2\text{-C}$) در یک بازه زمانی طولانی‌تر، یعنی بیش از سه ماه، به‌عنوان اندازه‌گیری بخشی از SOC که به‌راحتی در دسترس موجودات خاک تجزیه‌کننده است، در نظر گرفته می‌شود.

۴-۷- نتیجه‌گیری کلی

از نظر مدیریت SOC، مدیریت SOM به‌عنوان پیش‌نیاز برای تضمین امنیت غذایی از طریق پایداری در تولید محصول اهمیت دارد. SOC شاخصی برای سلامت خاک است که با استفاده خردمندانه از مواد آلی (OM) و تبدیل آن‌ها به SOM به‌دست می‌آید. SOM توانایی بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را دارد و می‌تواند فرسایش خاک را با بهبود پایداری خاکدانه‌ها، وضعیت خاک-آب، دسترسی به مواد غذایی خاک و غیره کنترل کند. ویژگی‌های SOM می‌تواند به پایداری حاصلخیزی خاک در مزرعه کمک کرده و در نتیجه امنیت غذایی را تضمین کند.

منابع مورد استفاده

1. Akamigbo, F. O. R., & Igwe, C. A. (1990). Physical and chemical characteristics of four gullied soils locations in Anambra State, Nigeria. *Nigerian Agricultural Journal*, 25, 29-48.

2. Baldock, J. A., & Broos, K. (2012). Soil organic matter. In P. M. Huang, Y. Li, & M. E. Sumner (Eds.), *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes* (2nd ed., pp. 1–52). CRC Press.
3. Baldock, J. A., & Nelson, P. N. (2000). Soil organic matter. In M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of Soil Science* (pp. 825–884). CRC Press.
4. Baldock, J. A., Oades, J. M., Vassallo, A. M., & Wilson, M. A. (1989). Incorporation of uniformly labelled ^{13}C glucose into the organic fraction of a soil. Carbon balance and CP/MAS ^{13}C NMR measurements. *Australian Journal of Soil Research*, 27, 725–746.
5. Borrelli, P., Panagos, P., Lugato, E., Alewell, C., Ballabio, C., Montanarella, L., & Robinson, D. A. (2018). Lateral carbon transfer from erosion in noncroplands matters. *Global Change Biology*, 24(8), 3283–3284. <https://doi.org/10.1111/gcb.14125>
6. Buckman, H. O., & Brady, N. C. (1974). The soil in perspective. In H. O. Buckman & N. C. Brady (Eds.), *The Nature and Properties of Soils* (p. 13). Eurasia Publishing House.
7. Chen, Y. (1998). Electron microscopy of soil structure and soil components. In P. M. Huang, N. Senesi, & J. Buffle (Eds.), *Structure and Surface Reactions of Soil Particles* (pp. 155–182). Wiley.
8. Christensen, B. T., & Johnston, A. E. (1997). Soil organic matter and soil quality—lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. In E. G. Gregorich & M. R. Carter (Eds.), *Developments in Soil Science: Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health* (pp. 399–430). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80045-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80045-1)
9. Dou, S., Shan, J., Song, X., Cao, R., Wu, M., Li, C., & Guan, S. (2020). Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness. *Pedosphere*, 30(2), 159–167. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60001-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60001-7)
10. Gerke, J. (2018). Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: a review. *Agronomy*, 8(5), 76. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050076>
11. Glinski, J., Horabik, J., & Lipiec, J. (2011). *Encyclopedia of Agrophysics*. Springer.
12. Haider, K., Frederick, L. R., & Flaig, W. (1965). Reactions between amino acid compounds and phenols during oxidation. *Plant and Soil*, 22, 49–64.
13. Haider, K. M., & Guggenberger, G. (2005). Organic matter: genesis and formation. In D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Vol. 3 (pp. 93–101). Academic Press.
14. Hayes, M. H. B. (2003). Advances in our understanding of the composition and structures of soil organic matter. In W. S. Wilson, T. R. G. Gray, D. J. Greenslade, R. M. Harrison, & M. H. B. Hayes (Eds.),

- Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment (pp. 1–2). Woodhead Publishing Ltd.
15. Hayes, M. H. B., Mylotte, R., & Swift, R. S. (2017). Humin: its composition and importance in soil organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (pp. 47–138). Academic Press.
 16. Hopkins, D. W., & Shiel, R. S. (1991). Spectroscopic characterization of organic matter from soil with mull and mor humus forms. In W. S. Wilson (Ed.), *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment* (pp. 71–90). Royal Society of Chemistry.
 17. Igwe, C. A. (2003). Erodibility of soils of the upper rainforest zone, south eastern Nigeria. *Land Degradation & Development*, 14, 323–334.
 18. Igwe, C. A., Akamigbo, F. O. R., & Mbagwu, J. S. C. (1995). Physical properties of soils of south eastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability. *Soil Science*, 160, 431–441.
 19. Igwe, C. A., Zarei, M., & Stahr, K. (2005). Mineral and elemental distribution in soils formed on the river Niger floodplain, Eastern Nigeria. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 147–158.
 20. Kalev, S. D., & Toor, G. S. (2018). The composition of soils and sediments. In B. Török & T. Dransfield (Eds.), *Green Chemistry—An Inclusive Approach* (pp. 339–357). Elsevier Inc.
 21. Kasimir, A., He, H., Coria, J., & Norden, A. (2018). Land use of drained peatlands: greenhouse gas fluxes, plant production, and economics. *Global Change Biology*, 24(8), 3302–3316. <https://doi.org/10.1111/gcb.13931>
 22. Kinesch, P., Powlson, D. S., & Randall, E. W. (1995). ¹³C NMR studies of soil organic matter in whole soils: I. Quantitation possibilities. *European Journal of Soil Science*, 46, 125–138.
 23. Kogel-Knabner, I., de Leeuw, J. W., & Hatcher, P. G. (1992). Nature and distribution of alkyl carbon in forest soil profiles: implications for the origin and humification of aliphatic biomacromolecules. *Science of the Total Environment*, 117(118), 175–185.
 24. Kopecký, M., Kolář, L., Perná, K., Váchalová, R., Mráz, P., Konvalina, P., ... Dumbrovský, M. (2022). Fractionation of soil organic matter into labile and stable fractions. *Agronomy*, 12(1), 73. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010073>
 25. Lal, R. (2018). Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
 26. Masiello, C. A., Gallagher, M. E., Randerson, J. T., Deco, R. M., & Chadwick, O. A. (2008). Evaluating two experimental approaches for measuring ecosystem carbon oxidation state and oxidative ratio. *Journal of Geophysical Research*, 113, G03010. <https://doi.org/10.1029/2007JG000534>

27. Mbagwu, J. S. C., Lal, R., & Scott, T. W. (1983). Physical properties of three soils in southern Nigeria. *Soil Science*, 136, 48–55.
28. Medina-Sauza, R. M., Álvarez-Jiménez, M., Delhal, A., Reverchon, F., Blouin, M., Guerrero-Analco, J. A., ... Barois, I. (2019). Earthworms building up soil microbiota, a review. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 81. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00081>
29. Pett-Ridge, J., Shi, S., Estera-Molina, K., Nuccio, E., Yuan, M., Rijkers, R., ... Firestone, M. K. (2021). Rhizosphere carbon turnover from cradle to grave: the role of microbe–plant interactions. In V. V. S. R. Gupta & A. K. Sharma (Eds.), *Rhizosphere Biology: Interactions Between Microbes and Plants* (pp. 51–73). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_2
30. Pfeffer, P. E., & Gerasimowicz, W. V. (Eds.). (1989). *Nuclear Magnetic Resonance in Agriculture*. CRC Press.
31. Powlson, D. S., Poulton, P. R., Glendining, M. J., Macdonald, A. J., & Goulding, K. W. T. (2022). Is it possible to attain the same soil organic matter content in arable agricultural soils as under natural vegetation? *Outlook on Agriculture*, 51(1), 1–14. <https://doi.org/10.1177/00307270221082113>
32. Schmidt, I., Sliekers, O., Schmid, M., Cirpus, I., Strous, M., Bock, E., ... Jetten, M. S. M. (2002). Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria competitors or natural partners? *FEMS Microbiology Ecology*, 39, 175–181.
33. Schnitzer, M. (1995). Organic–inorganic interactions in soils and their effect on soil quality. In P. M. Huang et al. (Eds.), *Environmental Impacts of Soil Component Interactions* (pp. 3–19). Lewis Publishers.
34. Schnitzer, M. (2000). A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Advances in Agronomy*, 68, 1–58.
35. Schnitzer, M. (2005). Organic matter: principles and processes. In D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Vol. 3 (pp. 85–92). Academic Press.
36. Stevenson, I. L. (1964). Biochemistry of soil. In F. E. Bear (Ed.), *Chemistry of the Soil*, 2nd Edn (p. 258). Oxford & IBH Publishing Co.
37. Sun, Y.-Q., & Ge, Y. (2021). Temporal changes in the function of bacterial assemblages associated with decomposing earthworms. *Frontiers in Microbiology*, 12, 682224. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.682224>
38. Tan, K. H. (2014). *Humic Matter in Soil and the Environment—Principles and Controversies*. CRC Press.
39. Trivedi, P., Wallenstein, M. D., Delgado-Baquerizo, M., & Singh, B. K. (2018). Microbial modulators and mechanisms of soil carbon storage. In B. K. Singh (Ed.), *Soil Carbon Storage Modulators, Mechanisms and Modeling* (Chap. 3, pp. 73–115). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00003-2>

40. UNECCE. (2022). UNSDG Indicator 15.3.1: proportion of land that is degraded over total land area, (%). United Nations Economic Commission for Europe (UNECCE). <https://w3.unece.org/SDG/en/Indicator?id=66>. Accessed June 21, 2022.
41. UN. (2018). High-level political forum goals in focus—goal 15: protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss. Statistical Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations (UN). <https://unstats.un.org/sdgs/report/2018/Goal-15>. Accessed June 21, 2022.
42. UN. (2022). Sustainable Development Goal 15. Department of Economic and Social Affairs, United Nations (UN). <https://sdgs.un.org/goals/goal15>. Accessed June 21, 2022.
43. USDA NRCS. (2022). Soil organic matter: soil quality kit—guides for educators. Natural Services Conservation Services (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA). https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053264.pdf. Accessed June 21, 2022.
44. Wertz, S., Adam, K. K., Leigh, A. K. K., & Grayston, S. J. (2012). Effects of long-term fertilization of forest soils on potential nitrification and on the abundance and community structure of ammonia oxidizers and nitrite oxidizers. *FEMS Microbiology Ecology*, 79, 142–154. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01204.x>
45. Wilson, M. A. (1987). *N.M.R. Techniques and Applications in Geochemistry and Soil Chemistry*. Pergamon Press.

فصل ۸

نکات پایانی: خاک و آب برای امنیت غذایی

چکیده

اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد (SDG 15) برای تولید مواد غذایی پایدار می‌تواند با اجرای برنامه‌هایی برای مدیریت عاقلانه فرسایش خاک، مواد آلی خاک، رطوبت خاک، آب آبیاری، شوری خاک، مالچ پاشی، کشت گیاهان پوششی و زراعت جنگلی تأمین شود. استفاده از این روش‌ها در پلات‌های آزمایشی در مزرعه نه تنها تأثیرات مثبت در سطح منطقه مورد بررسی دارد، بلکه به بهبود نتایج اقدامات حفاظت آب و خاک در سطح کشور نیز منجر می‌شود. برای اجرای مؤثر این برنامه‌ها، نیاز به مطالعات مداوم، تحقیقات و آموزش در زمینه حفاظت خاک و آب است. این تلاش‌ها باید به‌عنوان یک جریان علمی کامل و بر اساس نیازهای اجتماعی و پذیرش عمومی گسترش یابد.

کلمات کلیدی: آبیاری، تولید محصولات کشاورزی، تولید مواد غذایی، کربن آلی خاک، مقدار آب خاک، مواد آلی خاک، هدف توسعه پایدار

کلمات اختصاری

FAO	سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد
NPS	منبع غیر نقطه‌ای
NREL	آزمایشگاه اکولوژی منابع طبیعی
O.M	مواد آلی
SOC	کربن آلی خاک
SOM	مواد آلی خاک

مقدار آب خاک	SWC
هدف توسعه پایدار سازمان ملل متحد	UNSDG
شورای جهانی آب	WWC

۱-۸- نتیجه گیری کلی

ایده حفاظت از منابع خاک در قرن گذشته گسترش یافته است. این موضوع باعث شده تا مفاهیم «سلامت خاک»، «باروری خاک» و «حفاظت خاک» در ادبیات علمی و آگاهی عمومی مورد توجه قرار گیرد. تحلیل های تاریخی نشان داده است که جامعه علمی خاک به کندی به این اصطلاحات واکنش نشان داده است، اما این مفاهیم در طول زمان رشد و تطابق پیدا کرده اند (Mizuta و همکاران، ۲۰۲۱؛ SWC، ۲۰۲۲). جامعه علوم کشاورزی هنوز در برخی نقاط برای ادامه تحقیقات و آموزش در زمینه حفاظت خاک به عنوان یک جریان علمی کامل، مردد است.

دانش خاک شناسی به ابعاد گسترده ای رسیده است. این شامل مطالعات در زمینه های مختلف از بررسی توده های بزرگ خاک تا ذرات خاک و رس کلوئیدی، جامعه میکروبی خاک، مواد آلی خاک، عناصر غذایی، رطوبت خاک و جذب آن توسط گیاهان، و ویژگی های فیزیکی، شیمیایی، میکروبی و بیوشیمیایی خاک و تعاملات آن ها با شرایط آب و هوایی و هیدرولوژیکی برای کشت موفق محصولات می شود. روش های تعیین این ویژگی ها از وزن سنجی تا فناوری های هسته ای و نانو تکنولوژی بسیار متنوع و پیشرفته است و نشان دهنده پیشرفت های زیاد در دانش خاک شناسی و ابزارهای تحقیقاتی است. همچنین، کاربرد روش های حفاظت خاک و آب از مقیاس های کوچک تا پروژه های بزرگ متغیر است. تجربیات پروژه های بزرگ مانند سدهای بزرگ نتایج نامطلوبی به همراه داشته و ممکن است توسعه را به شرایط ابتدایی مانند سیلاب های مکرر و خشکسالی برگرداند که بر تولید پایدار محصول تأثیر می گذارد. بر اساس این تجربیات، لازم است که سیاست گذاران و مسئولان برای مدیریت منابع آب و خاک بر اساس منطق

علمی و سودمندی، و برای اجرای اقدامات در مقیاس کوچک حفاظت خاک و آب، آگاهی لازم را ایجاد کنند. این اقدامات برای حفظ سلامت خاک و تولید غذای پایدار برای جمعیت نه تا ۱۰ میلیاردی جهان ضروری است (Connel, ۲۰۱۳؛ FAO, ۲۰۱۱, ۲۰۲۱؛ FAO و WWC, ۲۰۱۵؛ Ghosh, ۲۰۱۴؛ Luino و همکاران, ۲۰۱۴؛ NREL, ۲۰۲۱).

انسان‌ها برای تأمین غذا و استفاده از خدمات بوم‌سازگانی خاک به خاک سالم وابسته هستند. فرسایش خاک، یکی از مشکلات محیط زیست در جهان است که می‌تواند به تخریب زمین و کاهش سطح خدمات اکولوژیکی منجر شود. این مسئله می‌تواند به از بین رفتن تنوع زیستی و گل‌آلودگی مخازن آب و دریاچه‌ها منجر شود و به‌طور کلی توسعه پایدار منطقه‌ای را به خطر اندازد. بنابراین، ارزیابی فرسایش خاک باید بر اساس تحقیقات میدانی، سنجش از دور با وضوح بالا، داده‌های کارتوگرافی دقیق و اطلاعات مربوط به فرسایش خاک انجام شود. این اطلاعات برای برنامه‌ریزی اقدامات مناسب حفاظت خاک و آب در سطح مزرعه ضروری است (Amundson و همکاران, ۲۰۱۵؛ Borrelli و همکاران, ۲۰۱۷, ۲۰۲۱؛ FAO, ۲۰۱۹ a,b؛ Montanarella, ۲۰۱۵؛ Morgan, ۲۰۰۵؛ Oldeman و همکاران, ۱۹۹۱, ۱۹۹۴؛ Robinson و همکاران, ۲۰۱۷؛ Teng و همکاران, ۲۰۱۸؛ Yang و همکاران, ۲۰۲۰).

ارزیابی کیفیت خاک در مقیاس‌های بزرگ‌تر مانند مزرعه، حوزه آبخیز، شهرستان، استان یا در سطح ملی، نسبت به ارزیابی‌های مقیاس نقطه‌ای یا کرت، کلی‌تر و با دقت کمتری است (Coyne و همکاران, ۲۰۲۲؛ Creamer و همکاران, ۲۰۲۲؛ Karlen و همکاران, ۱۹۹۸؛ Lehman و همکاران, ۲۰۱۵). برای مدیریت بهتر تأثیرات تغییرات جهانی و ایجاد راهبردهای سازگار با شرایط جدید آب‌وهوایی، نیاز به تحقیقات دقیق و طولانی‌مدت در شرایط کنترل شده است (Allen و همکاران, ۲۰۱۱؛ Costantini و Mocali, ۲۰۲۲؛ Hassan و همکاران, ۲۰۲۲؛ Huang و همکاران, ۲۰۲۲). این تحقیقات

شامل اقدامات مناسب حفاظت خاک و آب در سطح مزرعه و در جهت اطمینان از کشت پایدار محصول و امنیت غذایی است.

فرسایش خاک تأثیر زیادی بر کیفیت پایدار آب دارد. وجود پوشش گیاهی می‌تواند در مقابله با فرسایش مفید باشد، اما این وابسته به نیازهای جامعه محلی است. عملیات جنگلی مانند قطع درختان، حمل و نقل و ساخت جاده‌ها باید با حداقل دخالت و دستکاری در محیط انجام شود. گیاهی که کشاورزان در مزارع کشت می‌کنند، می‌تواند در حفظ خاک مفید باشد. فرسایش خاک می‌تواند عناصر غذایی و مواد شیمیایی کشاورزی را با خود ببرد، بنابراین اقدامات حفاظتی در هر قطعه زمین تأثیرات مناسبی بر کیفیت آب و محیط‌زیست خواهند داشت.

کیفیت خاک و آب آبیاری برای تولید پایدار مواد غذایی بسیار مهم است. هدف آبیاری باید افزایش انعطاف‌پذیری خاک و خدمات بوم‌سازگانی آن باشد. این شامل حفظ کیفیت آب با تغییر مواد آلاینده، فیلترکردن و کاهش آلودگی منبع غیرنقطه‌ای (NPS) و سایر آلاینده‌ها است. همچنین، اطلاع از کیفیت آب برای تعیین نیاز آبیاری محصولات کشت شده در خاک‌های متأثر از نمک ضروری است، که کیفیت آب مصرفی بر کیفیت خاک تأثیر دارد (Agarwal و همکاران، ۱۹۸۲؛ Lal، ۲۰۱۰؛ USSLS، ۱۹۶۸). اطلاع درباره کیفیت آب نقش مهمی در تولید ماهی در تالاب‌ها و همچنین در کنترل و جداسازی آلودگی آب ناشی از مزارع کشاورزی ایفا می‌کند (Jaishankar و همکاران، ۲۰۱۴؛ FAO، 2013؛ Mateo-Sagasta و همکاران، ۲۰۱۷).

حفظ رطوبت خاک در فضاهای خالی خاک یکی از ارزان‌ترین روش‌ها است، اما نمی‌توان این رطوبت را برای مدت طولانی حفظ کرد. رطوبت خاک تحت تأثیر رطوبت در حد ظرفیت مزرعه، جرم مخصوص ظاهری خاک، عمق هیدرولوژیکی مؤثر، و تبخیر و تعرق است. نگهداری آب باران در محل بارش و کنترل رواناب سطحی از طریق مخازن استحصال آب باران و افزایش آب زیرزمینی از طریق تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند برای

آبیاری و تأمین رطوبت خاک مفید باشد. این اقدامات با استفاده از لایه‌های مالچ انجام می‌شود.

با توجه به کاربرد ماشین‌های خاک‌ورزی، مشخص شد که ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند قدرت نگهداری آب در خاک و جرم مخصوص ظاهری با افزایش سرعت حرکت شیار زن‌ها کاهش می‌یابد. کمترین تغییرات رطوبت خاک در استفاده از شیار زن‌های دو دیسکی با زیرشکن ساده مشاهده می‌شود. این ماشین‌ها بدون ایجاد پراکندگی و تخریب زیاد در خاک، بهترین گزینه برای کشاورزی حفاظتی هستند.

مدیریت مواد آلی خاک (SOM) برای مدیریت کربن آلی خاک (SOC) در خاک‌های کشت شده ضروری است تا امنیت غذایی از طریق تولید پایدار محصول تضمین شود. SOC شاخص سلامت خاک است که از طریق کاربرد مواد آلی و تبدیل آن‌ها به SOM به دست می‌آید. SOM می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشد و فرسایش خاک را کنترل کند. بنابراین، ویژگی‌های SOM می‌تواند به پایداری حاصلخیزی خاک و دستیابی به امنیت غذایی کمک کند.

آگاهی عمومی درباره علم و فناوری‌های حفاظت آب و خاک در حال افزایش است، اما بسیاری از این فناوری‌ها هنوز با نیازهای جامعه هماهنگ نشده‌اند. برای پاسخ به نیازهای کشاورزان، جامعه علمی باید خدمات خود را در زمینه تحقیقات، مطالعات، و آموزش حفاظت خاک و آب به آن‌ها ارائه دهد. این رویکرد می‌تواند هدف SDG 15 سازمان ملل متحد برای تولید پایدار غذا و امنیت غذایی را تحقق بخشد.

منابع مورد استفاده

1. Agarwal, R. R., Yadav, J. S. P., & Gupta, R. N. (1982). Saline and Alkali Soils of India. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
2. Allen, D. E., Singh, B. P., & Dalal, R. C. (2011). Soil health indicators under climate change: a review of current knowledge. In B. P. Singh, A. L. Cowie, & K. Y. Chan (Eds.), Soil health and climate change: An overview (pp. 25–45). Springer.

3. Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071–1261076.
4. Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st-century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 1–13.
5. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modeling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment*, 780, 146494.
6. Connell, D. (2013). The Tennessee Valley Authority: Catchment planning for social development. *Global Water Forum*. Retrieved from <https://globalwaterforum.org/2013/03/20/international-water-politicsthe-tennessee-valley-authority-catchment-planning-for-social-development/>. Accessed 20 June 2022.
7. Costantini, E. A. C., & Mocali, S. (2022). Soil health, soil genetic horizons and biodiversity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185, 24–34.
8. Coyne, M. S., Pena-Yewtukhiw, E. M., Grove, J. H., Sant'Anna, A. C., & Mata-Padrino, D. (2022). Soil health—It's not all biology. *Soil Security*, 6, 100051.
9. Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561.
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)—managing systems at risk. Rome: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/solaw/the-book/en/>. Accessed 20 June 2022.
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Guidelines to control water pollution from agriculture in China: Decoupling water pollution from agricultural production (FAO Water Reports No. 40). Rome: FAO.
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & World Water Council (WWC). (2015). Towards a water and food secure future—critical perspective of policymakers. Rome: FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i4560e/i4560e.pdf>. Accessed 21 June 2022.
13. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019a). Soil erosion: The greatest challenge to sustainable soil management. Rome: FAO.
14. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019b). Outcome document of the global Symposium on soil erosion. Rome: FAO.
15. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Land & water: Sustainable land management. Rome: FAO. Retrieved from

- <https://www.fao.org/land-water/land/sustainable-land-management/en/>. Accessed 21 June 2022.
16. Ghosh, S. (2014). The impact of the Damodar valley project on the environmental sustainability of the lower Damodar basin in West Bengal, Eastern India. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 7(2), 47–54. Retrieved from https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2441593. Accessed 21 June 2022.
17. Hassan, W., Li, Y., Saba, T., Jabbi, F., Wang, B., Cai, A., & Wu, J. (2022). Improved and sustainable agroecosystem, food security and environmental resilience through zero tillage with emphasis on soils of temperate and subtropical climate regions: A review. *International Soil and Water Conservation Research*, In press. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.005>.
18. Huang, B., Yuan, Z., Zheng, M., Liao, Y., Nguyen, K. L., Nguyen, T. H., ... Li, D. (2022). Soil and water conservation techniques in tropical and subtropical Asia: A review. *Sustainability*, 14, 5035. <https://doi.org/10.3390/su14095035>.
19. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
20. Karlen, D. L., Gardner, J. C., & Rosek, M. J. A. (1998). Soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, 11, 56–60.
21. Lal, R. (2010). Managing soil to address global issues of the twenty-first century. In R. Lal & B. A. Stewart (Eds.), *Food security and soil quality* (pp. 6–19). CRC Press.
22. Lehman, R. M., Cambardella, C. A., Stott, D. E., Acosta-Martinez, V., Manter, D. K., Buyer, J. S., ... Karlen, D. L. (2015). Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. *Sustainability*, 7(1), 988–1027. <https://doi.org/10.3390/su7010988>.
23. Luino, F., Tosatti, G., & Bonaria, V. (2014). Dam failures in the 20th century: Nearly 1000 avoidable victims in Italy alone. *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 3(1), 19–31.
24. Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M., Turrall, H., & Burke, J. (2017). *Water pollution from agriculture: A global review—executive summary*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and International Water Management Institute (IWMI).

25. Mizuta, K., Grunwald, S., Cropper, W. P., Jr., & Bacon, A. R. (2021). Developmental history of soil concepts from a scientific perspective. *Applied Sciences*, 11(9), 4275. <https://doi.org/10.3390/app11094275>.
26. Montanarella, L. (2015). Govern our soils. *Nature*, 287(7580), 32–33.
27. Malden NREL. (2021). Food security. Fort Collins: Natural Resources Ecology Lab (NREL). Retrieved from <https://www.nrel.colostate.edu/research/food-security/>. Accessed 21 June 2022.
28. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note (2nd revised ed.). Global assessment of soils degradation, The Map Sheets. World Soil Information (ISRIC), Wageningen.
29. Oldeman, L. R., Hakkeling, T. T. A., & Sombroek, W. G. (1994). The global extent of soil degradation. In D. Green & J. Szabolcs (Eds.), *Soil resilience and sustainable land use* (pp. 99–118). CAB International.
30. Robinson, D. A., Panagos, P., & Borrelli, P. (2017). Soil natural capital in Europe: A framework for state and change assessment. *Scientific Reports*, 7(1), 6706.
31. Teng, H., Liang, Z., Chen, S., Liu, Y., Raphael, A., Rossel, V., ... Shi, Z. (2018). Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Science of The Total Environment*, 635, 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.146>.
32. USSLS (1968). Richards, L. A. (Ed.), *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Salinity Laboratory Staff (USSLS), Agriculture Handbook No. 60, USDA. Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi.
33. Yang, Q., Zhu, M., Wang, C., Zhang, X., Liu, B., Wei, X., ... Yang, L. (2020). Study on a soil erosion sampling survey in the pan-third pole region based on higher-resolution images. *International Soil and Water Conservation Research*, 8, 440e451.

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

Title: Soil and Water Conservation for Sustainable Food Production

Author: Subhabrata Panda

Translated by: Zahra Gerami

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Page Layout: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Institute

ISBN: 978-600-6054-44-5

Circulation: 100 Copies

Date of Publication: 2025

Price: 1200000 Rls.

This scientific work has been registered with the series number of **3140371** at the date of **2025-02-03** in the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

Soil and Water Conservation for Sustainable Food Production

**Author:
Subhabrata Panda**

**Translated by:
Zahra Gerami**