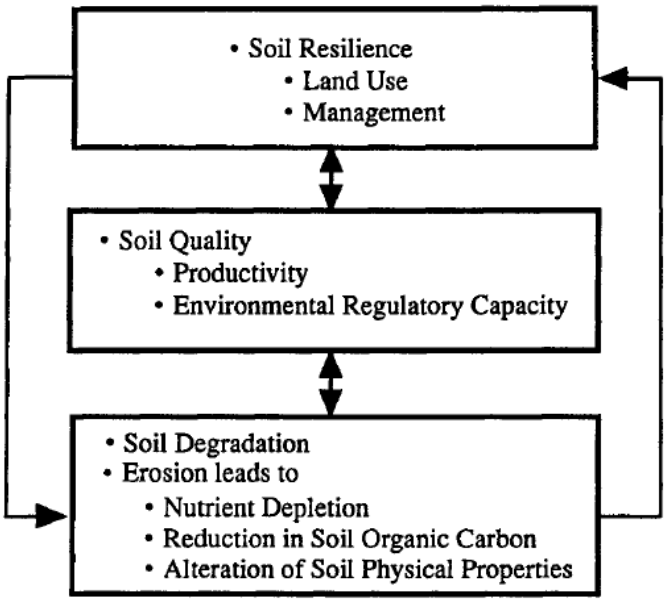
مدیریت و کنترل فرسایش خاک

مقدمه

فرسایش تشدیدی خاک یک معضل جهانی در دوران معاصر با تأثیرات شدید اقتصادی و محیط زیست است. تأثیرات اقتصادی به دلیل کاهش عملکرد محصول است و تأثیرات زیست محیطی به دلیل کاهش توانایی خاک در تنظیم کیفیت آب و هوا است. کارکردهای تعدیل‌کنندگی محیط خاک با باروری خاک نیز ارتباط نزدیک دارد، هر دو با کیفیت خاک تعیین می شوند. تعامل نزدیک بین کیفیت خاک (به عنوان مثال، باروری و ظرفیت تنظیمی محیط)، فرایندهای تخریب خاک و انعطاف پذیری خاک در شکل زیر نشان داده شده است. انعطاف پذیری خاک که به توانایی خاک برای بازگرداندن کیفیت آن پس از ایجاد اختلال اشاره دارد، به ویژگی‌های ذاتی خاک و تعادل خالص بین فرآیندهای تشکیل دهنده و تخریب کننده خاک بستگی دارد. طبق معادله ۱۴,۱:

$$S_r = S_a + \int_{ti}^{tf} (S_n - S_d \pm I_m)dt$$

که Sr، انعطاف پذیری خاک است، Sa شرایط پیشین خاک است، Sn ؛ میزان تشکیل خاک جدید است، Sd میزان تخریب خاک ، Im ورودی مدیریت و t زمان است. بزرگی و علامت عبارت داخل پرانتز (Sn - Sd + 1m) در تعیین انعطاف پذیری خاک بسیار مهم است. معادله فوق را می توان برای یک خاصیت معین خاک (به عنوان مثال، عمق ریشه، ضخامت خاک سطح، محتوای کربن آلی [SOC] خاک، ظرفیت آب موجود در گیاه [AWC]، ظرفیت مواد مغذی موجود [ANC] و ...) استفاده کرد. برای این منظور لازم است که رابطه آن خاصیت با زمان مشخص باشد. انعطاف پذیری خاک با کاهش اثرات نامطلوب فرایندهای اصلی تخریب بر کیفیت خاک تأثیر میگذارد



فرسایش تشدیدی خاک یک فرآیند تخریب کننده غالب در مقیاس جهانی است. به دلیل جابجایی فیزیکی خاک توسط نیروهای باد، آب و گرانش، باعث کاهش عمق خاک فعال (سولوم) یا کاهش عمق ریشه دهی یا لایه محدود کننده آب و کاهش ظرفیت آب و مواد مغذی گیاه می‌شود. بنابراین ، فرسایش خاک ممکن است طبق معادله زیر بیان شود:

$$E = d(R_d, \text{AWC}, \text{ANC}, \text{SOC}) / dt$$

که E میزان فرسایش خاک است، Rd عمق ریشه / عمق خاک سطحی و t زمان است. شناخت کارکردهای ویژه خاک در ارتباط با پارامترهای موجود در معادله فوق اهمیت دارد. مقدار E برای فرسایش منفی و برای رسوب مثبت است. فرسایش خاک همچنین ممکن است به عنوان میزان تغییر هر یک از این پارامترها مطابق با معادله زیر بیان شود:

$$E = d(S_n - S_d) / dt$$

که Sn؛ میزان افزایش و Sd میزان افت یک ویژگی مشخص خاک است (به عنوان مثال، عمق خاک سطحی). فرسایش خاک از طریق تأثیر بر خصوصیات ذاتی خاک (به عنوان مثال، Rd، AWC، ANC ، مقدار رس) و کارایی استفاده از نهاده‌های خارجی (به عنوان مثال کود، آبیاری، انرژی خاکورزی) بر کیفیت خاک تأثیر می‌گذارد. با در نظر گرفتن عوامل اصلی، کیفیت خاک (Sq) ممکن است طبق معادله زیر بیان شود:

$$S_q = f(P_s \times S_c \times R_d \times e_d \times N_c \times B_d)_t$$

که Ps ، باروری خاک بر حسب واحد مناسب، Sc، شاخص مشخصات ساختاری خاک از جمله تخلخل و توزیع اندازه منافذ است، Rd عمق ریشه‌زایی، ed تراکم بار سطحی، Nc، ذخیره مواد مغذی، Bd معیار تنوع زیستی و t زمان است. فرسایش تشدیدی از طریق اثرات نامطلوب بر پارامترهای ذکر شده در معادله ۱۴,۴ بر کیفیت خاک تأثیر می‌گذارد.

اثرات فرسایش خاک بر کیفیت خاک

فرسایش تشدیدی خاک اغلب در مناطق اقتصادی-اجتماعی صورت می گیرد و همانطور که در شکل زیر نشان داده شده بزرگی آن توسط مدیریت و عوامل اصلی بیوفیزیکی شامل توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و کاربری زمین تعیین می شود. تأثیر فرسایش بر کیفیت خاک و بالعکس توسط اثرات متقابل عوامل بیوفیزیکی و محیط‌های اقتصادی - اجتماعی (که شامل مدیریت نیز می شود) پیچیده و مبهم شده است. کیفیت خاک بر میزان فرسایش تأثیر می گذارد و به نوبه خود تحت تأثیر آن قرار می گیرد. این اثرات متقابل توسط خصوصیات ذاتی خاک، حدود بحرانی آنها و تغییرات مکانی و زمانی ناشی از مدیریت تعیین می شود. موارد مهم در زیر موارد زیر است.

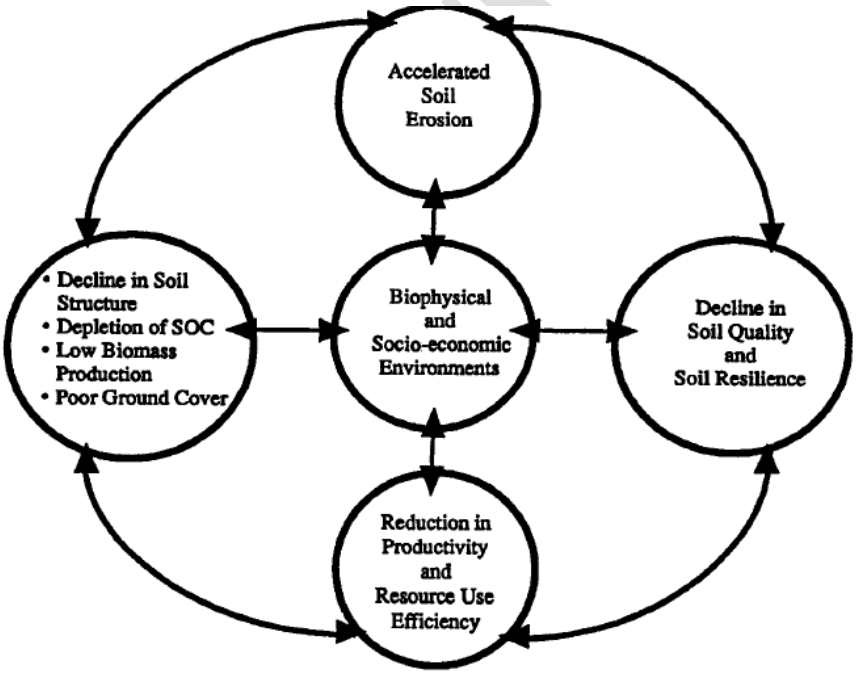


FIGURE 14.2 The complex relationship between soil quality and accelerated erosion as affected by biological and socioeconomic factors.

عمق سولوم یا ریشه

اثرات فرسایش بر کیفیت خاک به حداقل عمق خاک (عمق بحرانی) مورد نیاز برای حفظ باروری و ظرفیت تنظیمی محیط بستگی دارد. مقدار عمق بحرانی خاک ممکن است به کاربری زمین، سیستم های کشاورزی،

مدیریت، آب و هوا و مقاومت خاک بستگی داشته باشد. اثرات فرسایش بر کیفیت و باروری خاک برای خاکی با عمق پروفیلی زیاد و خواص مطلوب (به عنوان مثال، رسوبات آبرفتی یا لس) حداقل است.

عمر خاک

مدت زمانی که باروری خاک و ظرفیت تنظیمی محیط در سطح ر ضایت بخ شی حفظ شود، به عنوان عمر خاک تعریف شده ا ست. عمر خاک به انعطاف پذیری خاک، کاربری ارا ضی، سی ستم ک شاورزی و مدیریت بستگی دارد. زمان لازم برای کاهش کیفیت خاک به نصف سطح قبل آن نیمه عمر خاک گفته می شود. هرچه نیمه عمر خاکی بیشتر باشد، اثرات فرسایش بر کیفیت آن کمتر است.

اثر فرسایش بر کیفیت فیزیکی خاک

عوامل تعیین کننده کیفیت فیزیکی خاک (شکل زیر) توسط فرسایش خاک تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرند. واکنش پذیرترین و فعالترین قسمت خاک، بخشهای آلی و رس ا ست. فرسایش تشدیدی یک فرآیند مخرب انتخابی است، زیرا بخش فعال خاک را از بین می برد و منجر به تخریب در خصوصیات فیزیکی خاک می شود. با شدیدتر شدن فر سایش، ترکیب افق های پایین تر کیفیت فیزیکی خاک را تعیین می کند. افزایش فرسایش خاک می تواند باعث تغییر یک خاک از یک مرحله به یک مرحله دیگر با کاهش کیفیت خاک شود. این تغییر به تغییرات نامطلوب در خصوصیات خاک سطح نسبت داده می شود.

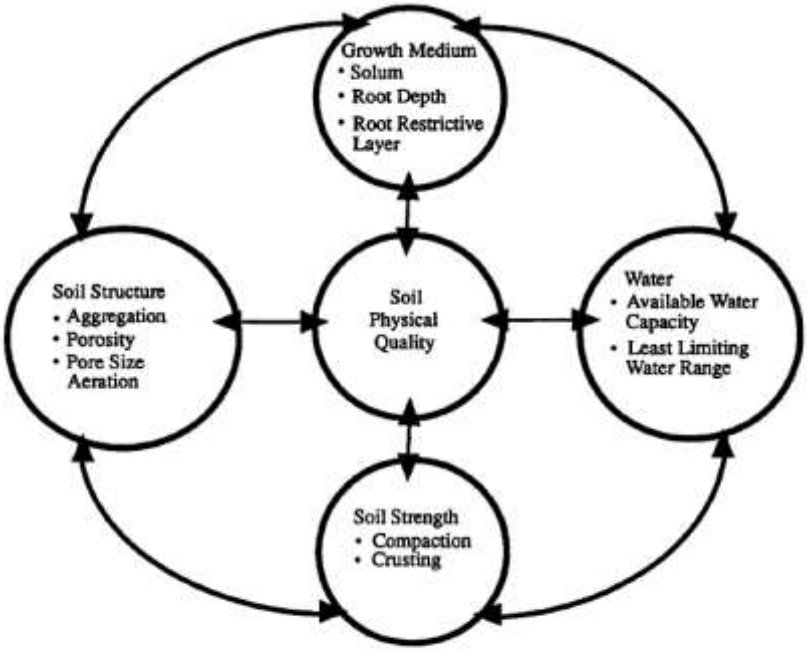


FIGURE 14.3 Determinants of soil physical quality. Accelerated erosion reduces soil physical quality through effects on these parameters.

ساختمان خاک یک ویژگی مهم از کیفیت فیزیکی خاک است و نگهداری و بهبود آن برای کاهش خطرات فر سایش خاک ضروری ا ست. میزان فر سایش خاک تو سط توانایی خاکدانه های خاک در مقاومت در برابر نیروهای ضربه قطره باران و جریان سطح تعیین می شود. SOC یکی از خصوصیات خاک است که بر جدا شدن ذرات خاک تأثیر می گذارد. خاکدانه سازی با افزایش شدت فرسایش کاهش می یابد. خاکدانه ها توسط فرآیندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی تشکیل می شوند، اما اساساً توسط مواد آلی تثبیت می‌شوند. SOC را می توان بسته به ظرفیت آنها در تثبیت خاکدانه ها به سه مولفه اصلی تقسیم کرد. مواد هومیکی مرتبط با کاتیون های فلزی چند ظرفیتی ماندگارترین عوامل تثبیت کننده بوده و با خاکدانه های ریز در ارتباط هستند. ریشه ها و هیف های قارچی عامل تثبیت موقت هستند و در درجه اول با خاکدانه های بزرگ در ارتباط هستند. پلی ساکاریدهای گیاهی و میکروبی و صمغ ها و پلی ساکاریدهای پیچیده تر خاک ، عوامل تثبیت کننده گذرا هستند و به خاکدانه سازی ریز و در شت کمک می کنند. این عوامل گذرا برای دوره های کوتاه مدت، از هفته ها تا چند ماه موثر هستند. همچنین تخلخل خاک، توزیع اندازه منافذ و توانایی آنها در انتقال مایعات توسط خاکدانه سازی کنترل می شود. منافذ درشت میزان نفوذ و تخلیه را کنترل می کنند ، در حالی که منافذ ریز ظرفیت ذخیره آب را کنترل می کنند. به دلیل تأثیر شدید SOC بر خاکدانه سازی و کیفیت خاک ، ضروری است که در مقدار آن در یک سطح مناسب حفظ شود.

TABLE 14.1
Soil Erosion Effects on Soil Physical Properties of Ap Horizon

		Bulk density ($mg\ m^{-3}$)			0.03 MPa water content (%)			Hydraulic conductivity ($cm\ h^{-1}$)		
State	Soil	SL	M	SV	SL	M	SV	SL	M	SV
Michigan	Marlette	1.37	1.48	1.50	27.7	24.6	23.7	—	—	—
Wisconsin	Dubuque	1.34	1.36	1.37	32.0	—	43.0	41.8	15.6	17.9
Ohio	Miamian	1.44	1.47	1.51	41.0	39.0	37.0	6.11	2.82	1.45

Note: SL = slight erosion, M = moderate erosion, and SV = severe erosion.

خاکدانه سازی همچنین بر تشکیل سله و پوسته شدن سطح زمین تأثیر می گذارد. با تخریب خاکدانه های سطحی پوسته ها تشکیل می شوند و منافذ با ذرات ریز مسدود میشوند. پوسته ها مانع نفوذ آب می شوند که منجر به افزایش رواناب و فرسایش می شود. پوسته های قوی حاوی SOC کمتری نسبت به پوسته های ضعیف هستند و خاک های فرسایش یافته دارای پوسته های قوی تر و رواناب بیشتری نسبت به خاک های فرسایش نیافته دارند. علاوه بر پایداری کم خاکدانه ها، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) یک خاک نیز بر تشکیل پوسته تأثیر می گذارد. برخورد قطرات باران با سطح خاکهای سدیمی باعث پراکندگی شیمیایی

ذرات رس می شـــود که با آب نفوذی حرکت کرده و منافذ را مســـدود می کنند. از بین رفتن خاک در اکثر خاکهای سدیمی با ESP ارتباط نزدیک دارد.

کانی شـناسـی رس عامل مهمی در تشـکیل و تثبیت خاکدانه ها اسـت. رسـهای قابل انعطاف، اسـمکتیت و ورمیکولیت، ممکن اسـت باعث تجزیه خاکدانه های خشـک سـطحی در اثر خیس شـدن ناگهانی آنها شـود. زمانی که رس پراکنده خشک شوند، پوسته ای متراکم و سخت تشکیل می دهد. رسهای انبساط ناپذیر، میکا و کائولینیت ، کمتر در معرض اختلال در هنگام آبگیری هســـتند. ماهیت و مقدار کاتیون های قابل تبادل بر نحوه واکنش مواد معدنی رس به هیدراتاسـیون و مقاومت پوسـته ها تأثیر می گذارد. فرسـایش خاک ممکن است کانی شناسی رس لایه شخم را تغییر ندهد ، اما ممکن است مقدار و نسبت کاتیون ها و در نتیجه ثبات خاکدانه ها را تغییر دهد.

اکسیدهای آهن ریز عناصر اتصال دهنده ای هستند که پیوند ذرات اولیه خاک و خاکدانه سازی نقش دارند. در فرآیند خاکدانه سازی، اکسیدهای Fe نسبت قابل توجهی از منافذ بین ذرات را پر می کنند. خاکدانه ها بیشتر از طریق جاذبه بین بار مثبت اکسیدهای Fe با بار منفی مواد معدنی رس تشکیل می شوند تا رشد کریستال. بار ذرات اکسید Fe به pH وابسته است. بنابراین، تأثیر آنها بر خاکدانه سازی وابسته به pH است. فرسـایش خاک ممکن اسـت از طریق کاهش عمق خاک و ترکیب کردن خاک زیرین در لایه شـخم، مقدار اکسیدهای Fe را در لایه شخم افزایش دهد. فرسایش باعث تغییر pH لایه شخم می شود ، در نتیجه بر پایداری خاکدانه های متصل به اکسیدهای آهن تأثیر می گذارد.

اثر فرسایش بر کیفیت شیمیایی و معدنی خاک

کیفیت شیمیایی خاک توسط طیف گسترده ای از خصوصیات (شکل زیر)، از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، pH ، مواد مغذی مورد نیاز گیاه (N، P، K) ، شوری و مسمومیت های عنصری تعیین می شود. از بین این خصوصیات ، فرسایش خاک به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر CEC، pH (جدول زیر) و در دسترس بودن مواد مغذی تأثیر می گذارد.

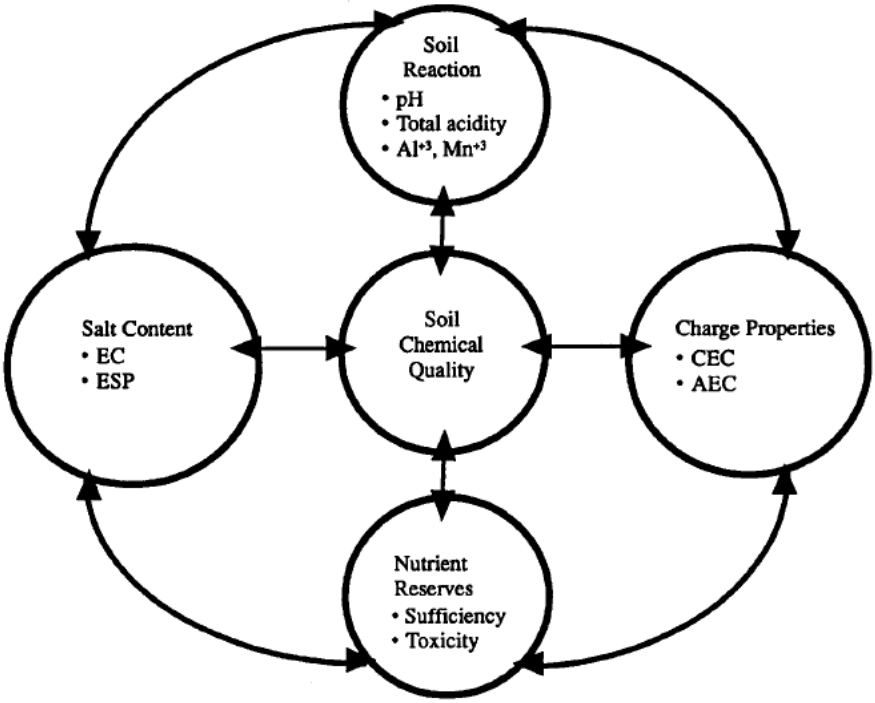


FIGURE 14.4 Determinants of soil chemical quality. Accelerated erosion reduces soil chemical quality through effects on these parameters.

CEC یک خاک با فرسایش خاک از طریق از دست دادن SOC کاهش می یابد حتی اگر مقدار رس در خاکهایی که افق Bt دارند افزایش یابد، زیرا SOC دارای CEC بسیار بیشتری نسبت به رس است کاهش CEC رخ میدهد. کاهش در CEC همچنین اثرات سوئی بر ANC ، رشد گیاه و باروری دارد.

PH خاک نیز به میزان و نوع کاتیون ها یا ANC مربوط می شود. در دسترس بودن یا حل شدن مواد مغذی گیاه به pH مربوط ا ست. بنابراین ، pH بر ر شد گیاه و متعاقباً مقدار ماده آلی ا ضافه شده به خاک تأثیر می گذارد. حتی اگر تلفات عنا صر غذایی در اثر فر سایش خاک با افزودن کودها به راحتی قابل ا صلاح با شد، قابلیت جذب مواد مغذی و ANC برای حفظ ر شد گیاه مهم هستند. کیفیت خاک تحت تأثیر تلفات عناصر غذایی تأثیر منفی می پذیرد. آلتی سولها و زیرگروههای آلفی سولها دارای زیر لایه های اسیدی هستند. فرسایش لایه‌های سطحی این خاک‌ها ممکن است باعث شود مقداری از مواد زیرین اسیدی در لایه شخم قرار گیرد. غلظت‌های بالای Al در نتیجه منجر به کاهش ر شد ریـ شه می شود و ممکن ا ست تولید محصول را محدود کند. در نتیجه، کاهش تولید محصول در Ultisols فرسایش یافته بدون افزودن کود، آهک و اصلاح کننده ها آلی اغلب دشوار است.

TABLE 14.2
Erosion Effects on Soil Chemical Properties of Ap Horizon

		CEC (cmol kg^{-1})			pH		
State	Soil	SL	M	SV	SL	M	SV
Nebraska	Sharpsburg	16.3	18.0	22.2	5.1	5.7	5.5
Ohio	Miamian	9.2	13.6	17.0	5.6	5.9	5.7
Ohio	Strawn	14.0	14.0	20.0	6.5	6.6	7.6
Michigan	Marlette	6.8	9.2	9.5	6.4	6.7	7.4
Minnesota	Ves	18.0	18.0	13.2	5.8	6.2	8.0
South Dakota	Beadle	29.9	31.6	22.7	6.8	7.1	7.5

Note: SL = slight erosion, M = moderate erosion, and SV = severe erosion.

اثر فرسایش بر کیفیت زیستی خاک

فرسایش از طریق کاهش کیفیت و کمیت محتوای SOC بر کیفیت بیولوژیکی خاک تأثیر می گذارد (شکل و جدول زیر). فرسایش همچنین بر کربن زیست توده، SOC و تنوع زیستی خاک تأثیر می گذارد. خاک موجودی زنده و زیستگاه تعداد زیادی از گونه های متنوع حیوانات و میکروارگانیسم ها است. فعالیت بیوتای خاک باعث تولید پلیمرهای آلی می شود که ذرات رس را به خاکدانه ها متصل می کند (Lynch and Bragg، 1985). در صورت از بین رفتن بیوتا، از طریق فر سایش و فرآیندهای مخرب مربوط، بالاترین لایه زمین دیگر خاک نخواهد بود.

اثر فرسایش بر تولید محصول:

فرسایش خاک به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تولید محصول تاثیر دارد. اثرات مستقیم شامل کاهش در ضخامت خاک حاصلخیز سطحی، تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، رسوبگذاری در اراضی پست، تخلیه مواد آلی و غذایی و اثرات غیر مستقیم شامل افزایش هزینه های تولید مانند مصرف بیشتر کود و سم، آبیاری بیشتر و عملیات شخم شدیدتر.

اندازه گیری فرسایش خاک

چندین رویکرد برای اندازه گیری فرسایش وجود دارد: (۱) اندازه‌گیری فرسایش در شرایط طبیعی با نصب کرت‌های فرسایش، یا وسایل دیگر مانند میخ و پل فرسایش (۲) استفاده از دستگاه‌های شبیه ساز باران (۳) اندازه‌گیری مقدار رسوب در ایستگاه‌های رسوب سنجی، (۴) استفاده از رادیو ایزوتوپها مانند سزیم ۱۳۷ و سرب و (۴) شبیه‌سازی فرسایش با استفاده از مدل‌های ریاضی. با توجه به اهمیت مدل‌ها در مطالعات فرسایش در مقیاس حوزه آبخیز، در زیر به طور خلاصه چند مدل فرسایش شرح داده می‌شود.

۲-۱ مدل RUSLE

تحقیقات انجام شده توسط رنارد و همکاران (۱۹۹۷) منجر به پی‌ریزی معادله جهانی تلفات خاک اصلاح شده (RUSLE) گردید. مزیت مهم مدل RUSLE، قابلیت انعطاف بیشتر آن است که مدل‌سازی در سامانه‌های مختلف را مقدور می‌سازد (اسدی و همکاران، ۱۳۸۹). مشکلی که در ارزیابی خطر فرسایش با مدل RUSLE وجود دارد این است که این مدل نمی‌تواند توزیع مکانی و زمانی فرسایش خاک را نشان دهد، لذا ترکیب این مدل با سامانه اطلاعات جغرافیایی و فناوری سنجش از دور پتانسیل تخمین مقدار فرسایش خاک را فراهم می‌کند (لو و همکاران، ۲۰۰۴).

مدل RUSLE به شکل معادله ۲-۴ ارائه شده است (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷):

$$A=RKLSCP \qquad (۱-۲)$$

که در آن A متوسط سالانه تلفات خاک ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)، R شاخص فرسایندگی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)، K عامل فرسایش‌پذیری خاک ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) ، LS عامل طول و درجه شیب (بدون واحد)، C عامل پوشش گیاهی (بدون واحد) و P عامل عملیات مدیریتی (بدون واحد) است. در زیر به شرح پارامترهای مدل RUSLE پرداخته می‌شود.

۱-۷-۲- مدل FAO

روش برآورد میزان فرسایش خاک بر اساس ارزیابی و بررسی ۶ عامل موثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبخیز می باشد، رابطه بین شدت فرسایش خاک و عوامل موثر به صورت زیر می باشد: S=F(A.B.C.D.E.F)

در این فرمول :S= شدت فرسایش خاک، A= حفاظت خاک، F= وضعیت فعلی فرسایش، B= سنگ مادر، C= شیب، D= ساختمان و دانه بندی خاک، E= عملیات کشاورزی. فاکتورهای ارائه شده در مدل فائو بسیار شبیه فاکتورهای مدل PSIAC می باشد، A : زمین شناسی سطحی، B : خاک، C : توپوگرافی، D : پوشش خاک، E : نحوه استفاده از اراضی، F : وضعیت فعلی فرسایش. هر یک از عوامل فوق برحسب شدت و تأثیری که در فرسایش خاک ایفا می نمایند توسط کارشناسان نمره گذاری می شوند، که سهم هر فاکتور در جدول زیر آمده است.

جدول ۲-۲: سهم هر فاکتور بر حسب شدت وتاثیری که در فرسایش خاک دارند

عامل	نمره مشخص کننده شدت فرسایش
زمین شناسی	۱۸-۱
خاک	۱۶-۱
توپوگرافی-شیب	۱۶-۱
پوشش خاک	۲۰-۱
استفاده از اراضی	۱۵-۰
وضعیت فعلی فرسایش	۱۵-۰
جمع کل	۱۰۰-۴

نکته پایانی در مورد این مدل اینکه، مدل فائو تا حدودی شبیه مدل PSIAC می باشد ولی مدل PSIAC با توجه به اینکه نقش ۹ عامل را در فرسایش خاک در نظر می گیرد (در روش فائو ۶ فاکتور را داریم) و همینطور می تواند توصیفی کمی و کیفی از فرسایش خاک ارائه کند(روش فائو فقط توصیفی کیفی از فرسایش خاک در حوضه ارائه می کند) بسیار مفصل وکاربردی تر می باشد. (جوزی، مرادی مجد، ۱۳۹۴).

۳-۷-۲- مدل WEPP: (Water Erosion Prediction Project)

یک مدل رایانه ای است که می تواند فرسایش ورسوب را برروی دامنه ها و در حوضه آبخیز براساس هر واقعه بارش یا سال های متوالی برآورد کند. این مدل درسال ۱۹۵۸ پایه گذاری شده است و یک تکنولوژی جدید پیش بینی فرسایش است که برپایه مفاهیم اساسی اقلیمی، تئوری نفوذ، هیدرولوژیکی، فیزیک خاک، علوم گیاهی، هیدرولیک و مکانیسم های فرسایش بنا شده است. این مدل قادر است تلفات خاک را در طول شیب و تولید رسوب را در انتهای شیب یک تپه محاسبه کند(احمدی، جعفری، گلکاریان، لافلن، ۱۳۸۶).

۵-۷-۲- مدل EUROSEN: (European Soil Erosion Model)

مدلی فرایندی دینامیک است که توسط مورگان و همکارانش درسال ۱۹۹۸ ارائه گردید. این مدل قادر است فرسایش ناشی از فرایند شیاری و بین شیاری را در هرگبار برروی سطوح اراضی در مقیاس مزرعه ای یا آبخیزهای کوچک شبیه سازی نماید. این مدل حجم کل رواناب، تلفات کل خاک و (Hydrograph) آب نمود و هر رخداد sedimentgraph (رسوب) را شبیه سازی می کند. پیش از پرداختن به عملیات حفاظت خاک و کنترل فرسایش یک حوضه آبخیز ، لازم است که از میزان رواناب آن حوضه و همین طور شکل حوضه مورد مطالعه اطلاعاتی بدست آوریم. کامل ترین تعریفی که از رواناب شده است این است که، بخشی از نزولات آسمانی که نه تبخیر شده ، نه جذب گیاهان شده و نه در خاک نفوذ کرده است ، بلکه در سطوح شیب دار جاری شده و توسط آبراهه های حوضه آبخیز از آن خارج می گردد. این آب را رواناب یا به طور دقیق تر آبدوی مستقیم یا سطحی (Subsurface flow) می نامند، مانند چشمه ها ، این آب به دلیل کندی جریان در لایه های خاک معمولاً خیلی دیرتر از رواناب سطحی در سطح زمین ظاهر می شود و آنرا آبدوی غیر مستقیم یا دائمی می نامند به مجموع آبدوی مستقیم و غیر مستقیم آبدوی کل گفته می شود.(صمدی بروجنی، قربانی، اینانلو،۱۳۸۷).

شهید چمران اهواز

فرسایش قابل تحمل Soil Loss Tolerance / Tolerable Erosion

مقدمه

فرسایش قابل‌تحمل خاک مرز بین فرسایش طبیعی و تشدیدی بوده و یکی از اساسی‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین موضوعات در تحقیقات فرسایش خاک است. طبق نظر Lal (۱۹۹۸)، فرسایش قابل‌تحمل مسئله‌ای چندبعدی در ارتباط با مسائل مختلف اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و محیط زیست است که از طریق همکاری‌های بین رشته‌ای شامل علوم خاک، زمین شناسی، کشاورزی، آب شناسی، رسوب شناسی، اقلیم شناسی، محیط زیست، اقتصاد، و جامعه شناسی قابل حل است. مقدار فرسایش قابل‌تحمل به معنای واقعی کلمه، معیاری برای آگاهی و قضاوت درباره وضعیت فرسایش خاک و میزان خطرات و آسیب‌های بالقوه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ناشی از آن می‌باشد (۳۵). در سال‌های گذشته، به دلیل افزایش سطح آگاهی‌ها از نقش خاک در سرنوشت انسان و افزایش نگرانی‌ها در مورد مشکلات فرسایش خاک، موجی از توجهات دانشمندان و پژوهشگران به موضوع فرسایش قابل‌تحمل جلب شده است Hancock و همکاران (۲۰۱۵) معتقدند در طراحی برنامه‌های مدیریت و حفاظت خاک، آگاهی از مقدار فرسایش به تنهایی کافی نبوده و تعیین آستانه فرسایش قابل‌تحمل مبنایی مهم و اساسی است. زیرا نوع و شدت اثرات فرسایش بستگی به نوع خاک و منطقه ممکن است متفاوت باشد. بنابراین، تعیین صحیح آن برای هر منطقه با استفاده از روش‌های مناسب بسیار حایز اهمیت خواهد بود، چرا که روش‌ها و استانداردهای سخت‌گیرانه سبب اتلاف بیش از حد منابع طبیعی، هزینه‌های مالی و نیروی کار شده و از سوی دیگر، بیش‌برآورد آن منجر به هدررفت بیش از حد خاک و در نتیجه بروز مسائلی از جمله کاهش باروری و تخریب خاک و آسیب‌های محیط زیستی می‌شود.

تعاریف و مفاهیم فرسایش قابل‌تحمل در گذر زمان

بدون شک فرسایش تشدیدی و تهدیدهای ناشی از آن قرن‌ها است که به رسمیت شناخته شده، اما تا اوایل ۱۹۳۰ چندان توجه و نگرانی نسبت به آن وجود نداشت. با شروع جنگ جهانی دوم و اثرات مخرب فرسایش بر اکثر اراضی کشاورزی و منابع طبیعی اروپا و پیرو پدیدار شدن مشکلات کمبود غذا، ، مفهوم فرسایش قابل تحمل مورد توجه قرار گرفت، و در سال ۱۹۴۷ برای اولین بار به طور رسمی برای برخی از انواع خاک‌های زراعی بر مبنای "حداکثر میانگین تلفات سالانه خاک بدون کاهش باروری" تعیین شد. با تعیین مقادیر فرسایش قابل‌تحمل (T) توسط سازمان حفاظت خاک امریکا[۱] برای اغلب خاک‌های اصلی در ایالات متحده در اوایل ۱۹۶۰، استفاده از آن به طور قابل توجهی گسترش یافت. نهایتا، Wischmeier و Smith

[۱] - U.S. Soil Conservation Service

(۱۹۸۷) فرسایش قابل‌تحمل را "حداکثر مقداری از فرسایش خاک که امکان تولید پایدار محصول را در سطحی قابل‌قبول به لحاظ اقتصادی، و نامحدود به لحاظ زمانی فراهم سازد" تعریف کردند. این تعریف تقریبا مبنای اصلی تمام تعاریف بعد از خود را تشکیل می‌دهد. به عنوان مثال، برخی از دانشمندان از جمله Roose (۱۹۹۶) فرسایش قابل تحمل را "مقدار هدررفت خاک برابر با سرعت تشکیل خاک از سنگ بستر" تعریف کرد. اگرچه، در این تعریف اشاره‌ای به توان باروری خاک نشده، اما عملا این شرط را درون خود دارد. زیرا، تحت این شرایط عمق خاک و پیرو آن باروری خاک پایدار خواهد ماند. از جمله نقاط ضعف تعاریف فوق، این است که فقط بر توان تولیدی خاک تاکید دارند و سایر کارکردهای خاک در آنها لحاظ نشده است. از طرفی، تعریف مبتنی بر نرخ تشکیل خاک صرفا به کمیت خاک اشاره دارد و کیفیت خاک را در بر ندارد.

با پیشرفت فن‌آوری و افزایش مصرف کودها و سموم کشاورزی، تا حدی مشکل افت تولید محصولات کشاورزی ناشی از عوامل مختلف از جمله فرسایش برطرف شد، اما در عوض، نگرانی‌های زیست محیطی و آلودگی منابع آب اهمیت پیدا کرد. بر این اساس، در اواخر قرن بیستم با توجه به نقش فرسایش به عنوان یکی از مهمترین منابع آلاینده غیرنقطه‌ای، فرسایش قابل‌تحمل از زاویه‌ای دیگر توجهات را به خود جلب کرد. برخی دانشمندان مانند McCormack و همکاران (۱۹۸۲) معتقدند که فرسایش قابل تحمل، علاوه بر حفظ توان تولید خاک باید دربر گیرنده مسائل زیست محیطی به‌ویژه کیفیت آب و تولید رسوب نیز باشد. تحت این شرایط فرسایش قابل تحمل به "حداکثر مقدار هدررفت خاک اطلاق می‌شود که علاوه بر حفظ پایداری تولیدات کشاورزی در یک دوره زمانی طولانی، مانع از بروز مشکلات زیست محیطی شود". اما مشکل عملیاتی که در این تعریف وجود دارد این است که اثرات درون محلی و برون محلی فرسایش قابلیت تجمیع در یک شاخص واحد را ندارند. به همین دلیل، Larson (۱۹۹۷) فرسایش قابل تحمل دو آستانه‌ای را پیشنهاد داد، که آستانه بالاتر برای کنترل اثرات درون محلی به‌ویژه حفظ توان تولیدی خاک و آستانه پایین‌تر برای کنترل اثرات برون‌محلی به‌ویژه سلامتی محیط زیست استفاده شود.

در اوایل قرن بیست و یکم، با افزایش شناخت و آگاهی از سایر کارکردهای خاک تنظیم چرخه آب و عناصر غذایی، پالایش آلاینده‌ها، حفظ محیط زیست و حفظ تنوع ژنتیکی تعریف جامع و کامل‌تری از فرسایش قابل تحمل ارائه شد و آن "حداکثر مقدار فرسایشی که در نتیجه آن هیچگونه زوال یا کاهشی در یک یا چند کارکرد خاک رخ ندهد" (Verheijen و همکاران، ۲۰۰۹). Li و همکاران (۲۰۰۹) معتقدند که کامل‌ترین و ایده‌آل‌ترین تعریف ممکن برای فرسایش قابل تحمل حالتی است که **مفهوم کیفیت خاک** در آن گنجانده شود. چراکه، تقریبا تمام کارکردهای خاک در مفهوم کیفیت خاک لحاظ شده است.

جدول ۱: تعاریف و مفاهیم مختلف فرسایش قابل تحمل در طول زمان

تعریف/تفسیر	منبع
حداکثر مقدار خاکی است که می‌تواند فرسایش یابد به‌طوری که باروری خاک در یک بازه زمانی مشخص حفظ شود و مانع از ایجاد فرسایش خندقی گردد.	برونینگ و همکاران، (۱۹۴۷) به نقل از دوان و همکاران (۲۰۱۷)
حداکثر میزان فرسایش خاک که با وجود آن تولید محصولات کشاورزی در سطحی مناسب به لحاظ اقتصادی و نامحدود به لحاظ زمانی پایدار بماند.	ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)
حداکثر میزان فرسایش خاک که با وجود آن مواد آلی خاک در سطحی مناسب به لحاظ اقتصادی و نامحدود به لحاظ زمانی پایدار بماند.	الکساندر (۱۹۸۸)
حداکثر میزان فرسایش خاک سطحی که با وجود آن باروری و حاصلخیزی خاک در سطحی مناسب به لحاظ اقتصادی در بلندمدت حفظ شود.	پاتسوکویچ و همکاران (۱۹۹۷)
(۱) مقدار فرسایش برابر با نرخ تشکیل خاک در اثر هوازدگی سنگ بستر (۲) حداکثر میزان فرسایشی که با وجود آن هیچ نشانه‌ای از کاهش باروری خاک در بلند مدت مشاهده نشود.	رز (۱۹۹۶)
حداکثر میزان فرسایش خاک که با وجود آن تولید محصولات کشاورزی در سطحی بهینه به لحاظ اقتصادی و نامحدود حفظ شود.	انجمن بین المللی علوم خاک (۱۹۹۶)
میانگین سالانه فرسایش که خاکی معین می‌تواند تحمل کند و با وجود آن باروری آن در بلند مدت حفظ شود.	کوک و همکاران (۱۹۹۵)
حداکثر میزان فرسایش خاک که با وجود آن حاصلخیزی خاک به مدت ۲۵-۲۰ سال حفظ شود.	مورگان (۲۰۰۵)
(۱) حداکثر میانگین سالانه هدررفت خاک که با وجود آن امکان کشت و کار پیوسته فراهم باشد و باروری خاک بدون نیاز به هیچ نوع نهاده اضافی در بلند مدت حفظ گردد. (۲) حداکثر میزان هدررفت خاک که از نظر تئوری حداکثر نرخ توسعه خاک قابل جبران باشد و تعادل بین هدررفت و تشکیل خاک حفظ گردد.	انجمن علوم خاک امریکا (۲۰۰۱)
نرخ فرسایش برابر با نرخ تشکیل خاک	بوردمن و پوسن (۲۰۰۶)
حداکثر میانگین سالانه انواع فرسایش‌ها که با وجود آن هیچ‌گونه آسیبی به یک یا چند کارکرد خاک (تولید زیست توده، تنوع ریستی، تنظیم محیط زیست و ...) وارد نشود.	ورهیجن و همکاران (۲۰۰۹)
فرسایش قابل تحمل چندگانه: T1: فرسایش قابل تحمل برابر با نرخ تشکیل خاک T2: فرسایش قابل تحمل در رابطه با پایداری تولیدات کشاورزی T3: فرسایش قابل تحمل در رابطه با کیفیت آب و محیط زیست آبی	لی و همکاران (۲۰۰۹)

عوامل موثر بر فرسایش قابل‌تحمل

آستانه فرسایش قابل‌تحمل خاک‌های مختلف به دلیل تفاوت در خصوصیات ذاتی و محیطی آنها، یکسان نیست. سازمان حفاظت از منابع طبیعی در وزارت کشاورزی امریکا[۲] (USDA-NRCS، ۲۰۱۴) مهمترین عوامل تاثیر گذار بر مقدار آستانه فرسایش قابل‌تحمل را این‌گونه بیان کرده است: (الف) میزان تشکیل خاک

[۲] - Natural Resources Conservation Service (NRCS)

از مواد مادری، (ب) میزان تشکیل خاک سطحی از خاک زیر سطحی، (پ) میزان کاهش عملکرد محصول ناشی از فرسایش، (ت) ضخامت خاک، (ث) میزان تغییر ویژگی‌های خاک موثر بر رشد گیاه در اثر فرسایش، (ج) هدر رفت مواد غذایی خاک در اثر فرسایش، (چ) احتمال تشکیل شیار و خندق، (ح) میزان مشکلات ناشی از رسوب‌گذاری مواد فرسایش یافته در پایین دست، (د) نسبت تحویل رسوبات از محل فرسایش یافته به رودخانه‌ها و منابع آب‌های سطحی، (ذ) فراهم بودن اقدامات حفاظتی قابل اجرا، اقتصادی، پایدار و همچنین قابل پذیرش به لحاظ اجتماعی و فرهنگی.

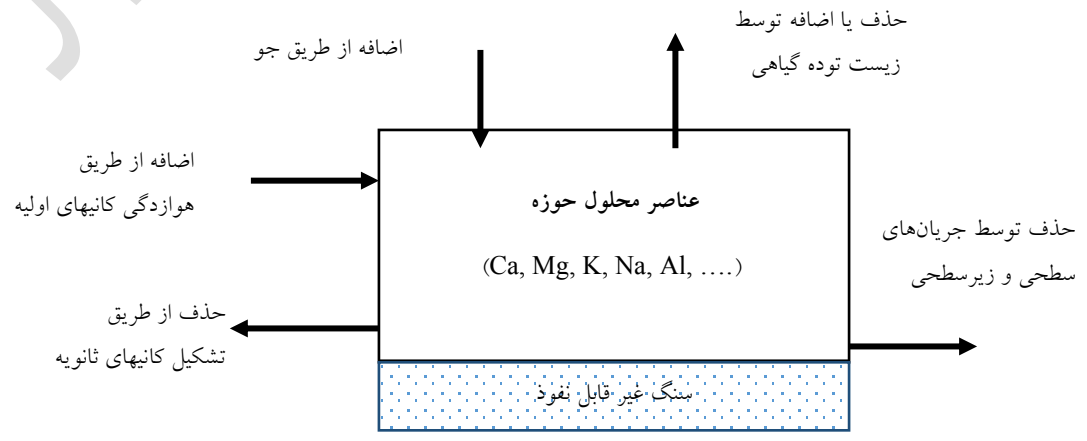
اگرچه در تعیین آستانه فرسایش قابل‌تحمل معیارهای مختلفی نقش دارند، اما لحاظ کردن همه آنها شاید غیرممکن باشد. بنابراین در هر منطقه، بسته به اهداف و سیاست‌گذاری‌ها و نیز اهمیت مسئله ممکن است یک یا چند مورد از عوامل فوق در نظر گرفته شود.

روش‌های اندازه‌گیری فرسایش قابل‌تحمل

وجود تعاریف مختلف برای فرسایش قابل‌تحمل باعث شده تا روش‌های مختلفی نیز برای اندازه‌گیری و یا برآورد آن ابداع شود. به‌طور کلی، روش‌های موجود برای تعیین فرسایش قابل‌تحمل در دنیا را می‌توان در چهار گروه شامل (الف) روش‌های مبتنی بر میزان تشکیل خاک، (ب) روش‌های مبتنی بر ضخامت خاک ج) روش های مبتنی بر کارکردهای خاک و د) مدلسازی رابطه بین فرسایش و کارکردهای خاک.

روش‌های مبتنی بر تشکیل خاک

به نظر می‌رسد یکی از اساسی‌ترین روش‌های تعیین فرسایش قابل‌تحمل، اندازه‌گیری میزان تشکیل خاک باشد. زیرا بین اکثر دانشمندان، بر سر ضرورت و اهمیت ایجاد تعادل بین میزان از دست رفتن خاک و میزان تشکیل خاک توافق نظر وجود دارد. باور عمومی این است که چنانچه بین فرسایش و تشکیل خاک تعادل برقرار باشد، باروری و حاصلخیزی خاک به‌طور نامحدود حفظ می‌گردد. با این حال، اندازه‌گیری شدت تشکیل خاک دشوار بوده و تاکنون روش استاندارد و مناسبی برای آن ارائه نشده است. از جمله روش‌های ابداعی برای تعیین میزان تشکیل خاک می‌توان به روش (الف) توازن جرمی ژئو شیمیایی، (ب) ایزوتوپ‌های استرانسیوم، (پ) تخلیه عناصر از پروفیل خاک، (ت) سن‌سنجی پرتوزاهای کیهانی و (ث) مدل‌سازی اشاره کرد. پایه و اساس تمام این روش‌ها، اندازه‌گیری میزان هوازدگی شیمیایی است. از آنجایی که خاک‌ها محصول نهایی هوازدگی سنگ‌بستر می‌باشند، بین میزان هوازدگی سنگ بستر و میزان تشکیل خاک ارتباط تنگاتنگی وجود دارد.



شکل ۱- اجزاء تعادل جرمی ژئوشیمیایی در حوزه (Velbel و Price، ۲۰۰۷)

روش های مبتنی بر ضخامت سولوم خاک

ضخامت خاک به عنوان معیاری از انعطاف پذیری خاک در نظر گرفته شده است. این روش صرفا بر اساس ضخامت خاک استوار بوده و به‌سادگی قابل محاسبه است. بنابراین در جاهایی که داده و اطلاعات کافی وجود ندارد از آن استفاده می‌شود. این روش بیان می‌کند که فرسایش قابل تحمل برابر با عمق مجاز فرسایش (عمق کنونی خاک منهای عمق بحرانی خاک) تقسیم بر بازه زمانی فرسایش (سال) است.

روش اسکیدمور

اسکیدمور (۱۹۸۲) معادله زیر را برای ارزیابی مقدار آستانه فرسایش قابل تحمل پیشنهاد کردند:

$$T_{(x,y,t)} = \frac{(T1+T2)}{2} - \left\{\frac{(T2-T1)}{2} \times \cos\left[\pi \frac{(Z-Z1)}{(Z2-Z1)}\right]\right\}$$

که در آن؛ $T_{(x,y,t)}$، آستانه فرسایش قابل تحمل در موقعیت x و y در زمان t؛ T1 حد پایینی فرسایش قابل‌تحمل که با نرخ تشکیل خاک در ارتباط است و T2 بیشینه فرسایش قابل تحمل برابر با ۱۱/۸ تن در هکتار در سال، Z عمق فعلی پروفیل خاک و Z1 و Z2 به ترتیب کمینه و بهینه عمق پروفیل خاک برای رشد پایدار محصولات کشاورزی که به ترتیب ۰/۵ و ۲ متر فرض شده‌اند. اما برای خاک‌ها و محصولات مختلف تغییر می‌کنند. طبق این رابطه، فرسایش قابل‌تحمل بین نقاط (T1, Z1) و (T2, Z2) تابعی سینوسی است که بستگی به عمق خاک دارد و عبارت (T2-T1/2) دامنه آن است. زمانی‌که عمق خاک از عمق بحرانی کمتر باشد، فرسایش قابل‌تحمل برابر حد پایین و زمانی‌که عمق خاک از عمق بهینه بیش‌تر باشد، فرسایش قابل تحمل برابر حد بالایی آن به دست می‌آید.

راهنمای مشترک وزارت کشاورزی و سازمان حفاظت منابع طبیعی امریکا

این راهنما در اوایل سال ۱۹۶۰ پس از ۱۵ سال تحقیق و بررسی بین رشته‌ای توسط دانشمندان علوم خاک، علوم زراعی، علوم زمین و دیگر رشته‌ها تهیه شد (مک‌کورمک و همکاران، ۱۹۸۲). اساس این روش در تعیین فرسایش قابل تحمل خاک بر عمق موثر خاک و کیفیت خاک استوار است. عمق موثر خاک دلالت بر عمق لایه محدود کننده ریشه و مطلوب بودن خصوصیات خاک در لایه‌های فوقانی برای رشد گیاه دارد و کیفیت خاک به نوعی نشان دهنده توانایی ترمیم خاک می‌باشد. هر چه لایه محدود کننده یا نامناسب به سطح خاک نزدیک‌تر باشد، توانایی نسبی خاک برای حفظ حاصلخیزی آن از طریق فرآیندهای طبیعی یا

مدیریت شده کمتر ا ست. در این روش، معیارهای زیر تو سط خاک شنا سان و دیگر متخ صصان در تعیین فرسایش قابل تحمل خاک به کار برده شد (مک‌کورمک و همکاران، ۱۹۸۲):

(۱) حداقل عمق لازم برای ر شد و نمو گیاه باید حفظ گردد. بنابراین برای خاک‌های کم عمق روی سنگ ب ستر یا لایه محدود کننده سخت، حفظ خاک اهمیت زیادی دارد و فر سایش قابل تحمل در این خاک‌ها باید کم باشد.

(۲) مقدار فرسایش قابل تحمل در خاک‌هایی با مواد تجدیدناپذیر نسبت به خاک‌های تجدیدپذیر باید کمتر باشد.

(۳) خاک‌هایی که حذف لایه سطحی آن‌ها باعث کاهش قابل توجه عملکرد محصول کشت شده در آن‌ها می‌شود، دارای فرسایش قابل تحمل کمتری هستند.

بر اساس این معیارها، خاک‌ها در سه گروه تقسیم بندی می‌شوند: گروه (۱) خاک‌هایی با محدودیت‌های زیاد، (۲) خاک‌هایی با محدودیت‌های متوسط و (۳) خاک‌های بدون محدودیت یا با محدودیت‌های قابل اصلاح توسط مدیریت. مقدار فرسایش قابل تحمل پس از مشخص شدن گروه خاک از جدول مربوطه استخراج می‌شود. طبق این راهنما (جدول ۲-۴) مقدار فرسایش قابل تحمل از ۲/۲ تن در هکتار در سال برای خاک‌های گروه ۱ و لایه محدود کننده در عمق ۲۵ سانتی‌متری تا ۱۱/۲ تن در هکتار در سال برای خاک‌های گروه ۳ و لایه محدود کننده در عمق بیش از ۱۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند.

جدول-۲: راهنمای مشترک وزارت کشاورزی و سازمان حفاظت منابع طبیعی امریکا

عمق لایه محدود کننده (سانتی‌متر)	فرسایش قابل تحمل سالانه (تن بر هکتار در سال)		
	گروه ۱*	گروه ۲**	گروه ۳***
۰-۲۵	۲/۲	۲/۲	۶/۷
۲۵-۵۰	۲/۲	۴/۵	۶/۷
۵۰-۱۰۰	۴/۵	۶/۷	۹/۰
۱۰۰-۱۵۰	۶/۷	۹/۰	۹/۰
>۱۵۰	۱۱/۲	۱۱/۲	۱۱/۲

*گروه ۱: محدودیت‌های توسعه ریشه زیاد است یا لایه‌های دائمی محدود کننده ریشه وجود دارد (غیرقابل تجدید).

**گروه ۲: محدودیت‌های توسعه ریشه متوسط است یا این محدودیت‌ها تاثیر کمتری در کاهش باروری خاک دارد (قابل تجدید).

***گروه ۳: می‌توان از طریق فرآیندهای طبیعی یا مدیریتی بر محدودیت‌ها غلبه کرد و به سطح باروری خاک‌های فرسایش نیافته دست یافت.

در سال‌های گذشته برخی محققان در هندوستان با استفاده از چند ویژگی‌های مهم خاک مانند سرعت نفوذ آب درخاک، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، فرسایش پذیری و اسیدیته خاک یک مدل کمی برای گروه‌بندی خاک‌ها به لحاظ مقاومت در برابر اثرات فرسایش ابداع کرده و سپس با الگو برداری از جدول راهنمای وزارت کشاورزی امریکا از آن برای تعیین فرسایش قابل تحمل در اراضی شمال شرق هیمالیا و هند مرکزی بهره برده‌اند. در این روش، هر کدام از ویژگی‌های ذکر شده با استفاده از توابع فازی بین صفر و یک امتیازدهی شده و سپس با در نظر گرفتن ضریب وزن برای هر ویژگی، مجموع آن‌ها گروه خاک را تعیین می‌کند.

Table 4 Assignment of T values to soil mapping units based on soil depth and aggregated score

	Group I (Q < 0.33)	Group II (Q = 0.33–0.66)	Group III (Q > 0.66)
Soil depth (cm)	Annual soil loss tolerance (Mg/ha)		
<25	2.5	2.5	7.5
25–50	2.5	5.0	7.5
50–100	5.0	7.5	10.0
100–150	7.5	10.0	10.0
>150	10.0	12.5	12.5

روش مبتنی بر شاخص باروری خاک

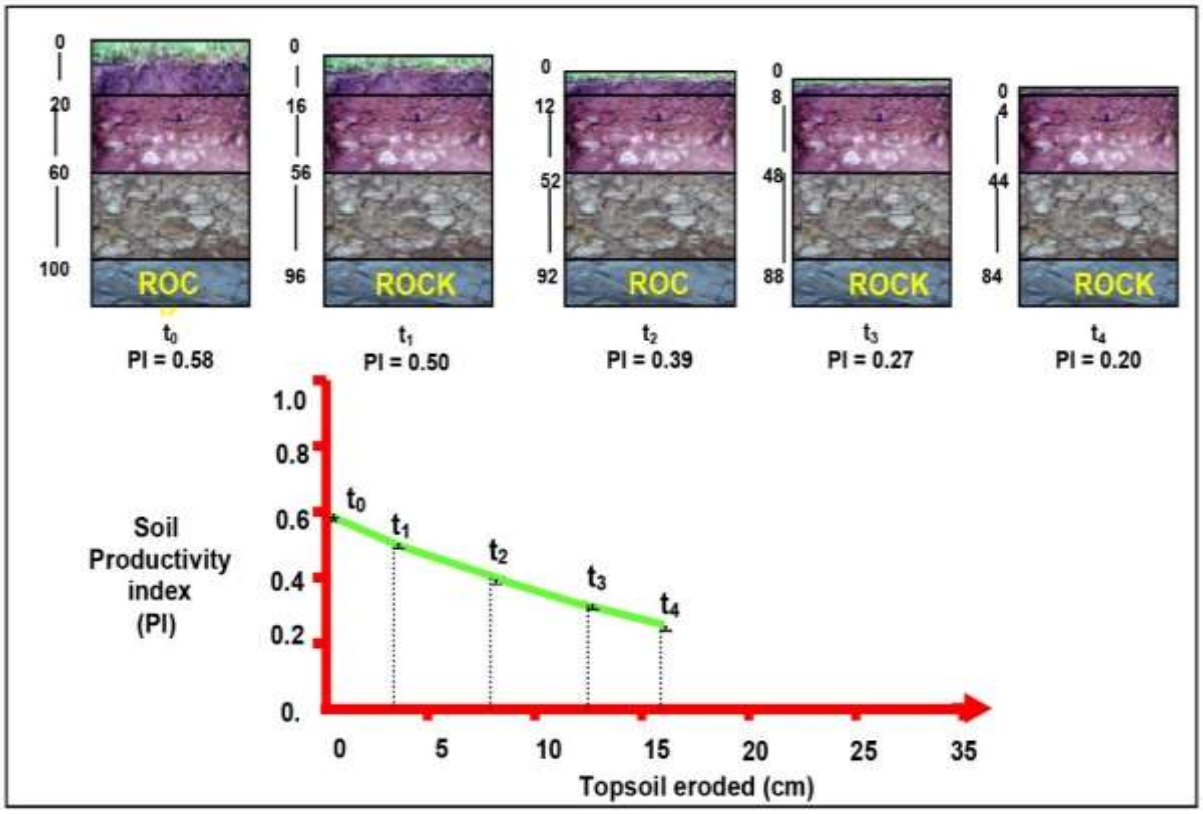
شاخص باروری خاک بیان‌کننده توانایی بالقوه خاک برای تولید محصول بوده و تابعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است. در این روش، باروری خاک برابر با مجموع باروری لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۱۰۰ سانتیمتر می‌باشد (دوان و همکاران، ۲۰۱۲). نقش هر کدام از ویژگی‌ها در تولید محصول، با استفاده از منحنی‌های امتیازدهی بین یک و صفر نرمال‌سازی شد. حاصلضرب امتیازها برای هر لایه، باروری آن لایه را مشخص می‌کند و در نهایت مجموع امتیازهای تمام لایه‌ها باروری پروفیل تا عمق ۱۰۰ سانتیمتری را بیان می‌کند. مدل باروری خاک به عنوان تابعی از موثرترین ویژگی‌های خاک در تولید محصول طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود (دلگادو، ۲۰۰۳؛ دوان و همکاران، ۲۰۱۲).

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

در این مدل، PI شاخص باروری خاک بوده که مقدار آن بین یک تا صفر تغییر می‌کند. علامت A عامل و ضعیت رطوبت یا تهویه خاک، B عامل مقاومت مکانیکی خاک، C عامل بافت خاک، O عامل حا صلخیزی

خاک، و K اهمیت نسبی هر افق در پروفیل خاک را بیان می‌کنند. در این مدل، علاوه بر عوامل خاکی تاثیر گذار بر رشد گیاه، عمق خاک نیز در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله ظرفیت نگهداری رطوبت، وضعیت تهویه و مقاومت مکانیکی خاک مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد گیاه به شمار می‌روند (لاپن و همکاران، ۲۰۰۴). اجزاء انتخاب شده برای مدل فوق به نحوی در کیفیت فیزیکی خاک نقش دارند. مطالعات انجام شده نیز نشان داده که بین عملکرد مشاهده شده و شاخص باروری همبستگی معنی‌داری وجود دارد (پیئرس و همکاران، ۱۹۸۴؛ دوان و همکاران، ۲۰۱۱؛ ۲۰۱۲).

به منظور ارزیابی اثر فرسایش بر باروری خاک، شاخص باروری خاک را با حذف تدریجی بخشی از ضخامت افق سطحی در محاسبات، در چندین حالت محاسبه می‌کنند. به عبارتی دیگر، محاسبه می شود که با حذف به عنوان مثال ۴ سانتی متر از ضخامت افق سطحی با همان ویژگی‌های معین در اثر فرسایش، شاخص باروری خاک چقدر کاهش می یابد. سپس با رسم مقدار شاخص باروری خاک در برابر ضخامت خاک، رابطه رگرسیونی خطی بین آنها به‌دست آمده و ضریب آسیب‌پذیری خاک در برابر فرسایش محاسبه شد.



شکل **Error! No text of specified style in document.**-۱: نحوه برقراری ارتباط بین مقدار فرسایش و باروری خاک (لوبو و دلگادو، ۲۰۰۵)

پس از ارزیابی اثرات فر سایش بر شاخص باروری خاک و تعیین رابطه بین آنها، درجه‌ای از خطرپذیری قابل قبول تعریف شود. در مورد باروری خاک، مقدار بـ سته به انعطاف پذیری خاک بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ در صد در سـال به عنوان نرخ کاهش مجاز باروری و مدت زمان ۱۰۰ سـال به عنوان بازه زمانی اسـتاندارد برای تعیین فرسایش قابل تحمل در نظر گرفته شده است. نرخ کاهش مجاز باروری کمتر برای خاکهایی با نعطاف پذیری کمتر و عدد بزرگتر برای خاکهایی با انعطاف پذیری بیشتر.

استفاده از مدل های فرایندی

مدل سازی یکی دیگر از روش‌های غیرم ستقیم برای ارزیابی اثرات فر سایش بر ر شد گیاه و تولید مح صول اسـت. مدل‌های فرایندی مختلفی در سـال‌های گذشـته ابداع شـده‌اند که تعداد محدودی از آن‌ها قادرند اثر فرسـایش بر تولید محصـول را برای هر خاک و محصـول شـبیه‌سـازی کنند. یکی از رایج‌ترین آن‌ها مدل حساب‌گر اثرات فر سایش بر باروری (EPIC)[۳] ا ست (ویلیامز و همکاران، ۱۹۸۴). این نوع مدل‌ها به گونه‌ای طراحی شـده‌اند که در مرحله نخسـت اثرات تلفیقی مدیریت، اقلیم و فرسـایش بر خصـوصـیات خاک و در مرحله دوم اثر تغییر خصوصیات خاک بر عملکرد محصول را شبیه‌سازی میشود. مدل اپیک از بدو تاسیس تا سال ۲۰۰۰ به منظور ارزیابی اثرات فرسایش بر تولید محصول و تعیین فرسایش قابل تحمل به‌طور گسترده در ایالات متحده مورد اسـتفاده قرار گرفت اما اسـناد و اطلاعات کمی از نتایج و کارایی آن در دسـترس می‌باشـد. اسـچائوب و همکاران (۱۹۸۸) اثرات فرسـایش بر عملکرد محصـول را با اسـتفاده از مدل اپیک شبیه‌سازی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد رابطه خطی بین عملکرد محصول و فرسایش خاک وجود دارد و به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر عملکرد حدود ۸ در صد کاهش یافت. لیتلبوی و همکاران (۱۹۹۲) با ا ستفاده از مدل PERFECT که از خانواده مدل اپیک اسـت اثرات فرسـایش بر عملکرد گندم را شـبیه‌سـازی کردند. نتایج این مطالعه نـشان داد مقدار عملکرد گندم پس از ۸۰ سال نا شی از ۱۵ سانتی‌متر فر سایش خاک در هر هکتار (۲ تن در هکتار) حدود ۵۰ درصد کاهش یافت.

[۳] - Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC)

روش‌های مقابله فرسایش

اقدامات کنترل فرسایش خاک برای کاهش یا به حداقل رساندن شدت اثرات نامطلوب آن اتخاذ می شود. مدیریت یکپارچه حوضه برای کاهش اتلاف خاک از حوضه های آبریز، پس از تعیین شدت فرسایش و همچنین آستانه مجاز آن بر اساس زیرحوضه به کار گرفته می شود. مدیریت یکپارچه شامل اقدامات مکانیکی (مهندسی) و غیر مکانیکی (زیستی و زراعی) است. معمولا روش‌های غیرمکانیکی در شیب‌های ملایم‌تر برای حفظ خاک در سراسر شیب زمین به کار گرفته می‌شوند. اصل اساسی زیربنای این رویکرد افزایش پوشش سطح خاک و کاهش اثر سرعت رواناب است. در شیب های تندتر، اقدامات مکانیکی (مانند تراس) و سایر سازه ها برای کاهش اثر شیب بر سرعت رواناب ساخته می شود. در ایجا، تاکید ما بر روش‌های غیرمکانیکی است. زیرا این روش‌ها ذرات خاک را در مکان خود حفظ میکنند و مانع از جابجایی آن میشوند.

از جمله مهم‌ترین اقدامات غیرمکانیکی می‌توان به خاک‌ورزی حفاظتی، تناوب زراعی، محصولات پوششی، مدیریت بقایا، نوارهای بافر، آگروفار ستری و مالچ‌های م صنوعی خاک ا شاره کرد. در ادامه شرح مف صلی از برخی موارد ارائه می شود. از نظر مکانیزم کنترل فر سایش، تفاوت هایی بین این شیوه های بیولوژیکی وجود دارد. اقدامات بیولوژیکی مانند بقایای گیاهی، استفاده از کودهای آلی یا مالچ‌ها در تماس مستقیم با سطح خاک هستند و به عنوان یک لایه نازک محافظ، از خاک در برابر برخورد قطرات باران محافظت می کنند. در مقابل، پو شش گیاهی ایستاده (به عنوان مثال، محصولات پو ششی) هم از طریق تاج‌پو شش و هم از طریق ریشه‌ها و ساقه فرسایش خاک را کاهش می دهند.

تاج‌پوشش گیاهی CANOPY COVER

ن سبتی از سطح خاک که تو سط اندام هوایی گیاهی پو شیده شده را تاج‌پو شش گیاهی می‌گویند. طبقات مختلف برگ و شاخه های گیاه، معماری چند طبقه تاج گیاه را تشکیل می دهند. تاج‌پو شش گیاه به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر قطرات باران برخورد می کند. در واقع، پوشش تاج پوشش یک جزء حیاتی از

فاکتور C در معادله USLE و سایر روابط پیش‌بینی فرسایش خاک است. تاج پوشش با قطع بارندگی و کاهش انرژی جنبشی قطرات باران، فرسایش خاک را کاهش می‌دهد. اثربخشی تاج پوشش در کنترل فر سایش خاک تحت تأثیر ویژگی‌های بارندگی، ویژگی‌های خاک، و ویژگی‌های تاج پو شش (به عنوان مثال، گونه، ارتفاع، تراکم) ا ست. تاج پو شش گیاهی نه تنها خاک را می‌پو شاند بلکه با خاک و لایه های زیرین نیز در تعامل است تا فرسایش خاک را کاهش دهد. برهمکنش بین تاج پوشش گیاهی و خاک، خواص هیدرولوژیکی خاک (به عنوان مثال، شار آب) و خواص ساختاری (مانند پایداری خاکدانه،) را بهبود می بخشد. رواناب و فرسایش خاک به طور کلی با افزایش تاج پوشش به طور تصاعدی کاهش می یابد (بوچت و روبیو، ۲۰۰۶). هر چه خاک بیشتر پوشیده از پوشش گیاهی باشد، حفاظت خاک در برابر فرسایش بهتر ا ست. انتخاب سیستم های زراعی که دارای تاج پو شش بالایی هستند و مقادیر زیادی بقایای سطحی تولید می کنند برای کنترل فرسایش مفید است. محصولات زراعی با تاج پوشش متراکم که در فصول پر باران زیاد رشد می کنند، خطرات فرسایش را کاهش می دهند. تاج پوشش همانند اثراتی که بر فرسایش آبی دارد، نقش عمده ای در کاهش فرسایش بادی دارد. سرعت باد را قطع می کند و کاهش می دهد. تاج پوشش چند طبقه مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی قطرات باران و باد را افزایش می دهد.

روابط پوشش تاج در مقابل فرسایش خاک

تاج پو شش در بسیاری از مدل های مورد استفاده برای پیش بینی خطر فرسایش خاک یک ورودی ضروری ا ست. روابط فر سایش خاک و پو شش تاج با ا ستفاده از معادلات RUSLE، EPIC، WEPP، SWAT و دیگر معادلات ساده شده مدل سازی می شوند. به طور کلی، یک رابطه نمایی بین فر سایش خاک و پو شش تاج وجود دارد که در معادله بیان شده است. (۶,۱) و (۶,۲) (گیسلز و همکاران (۲۰۰۵)

$$SL = e^{-bC}$$
$$RL = e^{-bC}$$

که در آن SL هدررفت نسبی خاک، RL رواناب، C پوشش گیاهی (٪)، و b ثابت است که بین ۰,۰۲۳۵ و ۰,۰۸۱۶ برای هدررفت خاک و بین ۰,۰۱۰۳ و ۰,۰۸۴۳ برای رواناب متغیر است.

محصولات پوششی COVER CROP

محصولات پوششی "محصولاتی سریع الرشد هستند که حفاظت از خاک و بهبود خاک را در دوره‌هایی که زمین هنوز کشت نشده است یا بین درختان در باغات و انگور در تاکستان ها فراهم می کنند" (SSSA، 2008). به این محصولات کود سبز نیز گفته می شود. استفاده از محصولات پوششی به تمدن های باستانی یونان، روم، چین و سایرین برمی گردد (Magdoff, 1992). مدیریت و نقش محصولات پوششی با گذشت زمان تغییر کرده است. در گذشته از محصولات پوششی یا به عنوان علوفه حیوانات استفاده می شد و یا به عنوان کود سبز شخم زده می شد. امروزه، محصولات پوششی به عنوان یک گزینه مهم در سیستمهای کشت بدون خاکورزی، خاک ورزی حداقل، کشت کوچه ای، زراعت‌جنگلی و سایر شیوه های حفاظتی که برای کاهش فرسایش خاک و بهبود کیفیت منابع خاک و آب طراحی شده اند، ترویج می شود. روند جدید استفاده از محصولات پوششی به عنوان مالچ به جای مخلوط کردن آن در خاک است.

محصولات پوششی شیوه های حفاظتی نوآورانه ای هستند و به طور خاص برای موارد زیر استفاده میشوند:

- محافظت از خاک در برابر فرسایش،
- بهبود خواص خاک،
- افزایش حاصلخیزی خاک
- کنترل علف های هرز
- رفع کمبود N،
- افزایش محتوای مواد آلی خاک،
- افزایش بازده محصول،
- بازچرخش مواد مغذی،
- بهبود کیفیت آب

دانشگاه شهید چمران اهواز

کشت گیاهان پوششی یکی از روش‌های حفاظتی برتر برای کاهش رواناب و فرسایش خاک از خاک‌های کشاورزی است . گیاهان پوشی انرژی فرسایشی قطرات باران را از طریق تاج پوشش متراکم خود مهار کرده و از طریق ریشه های خود خاک را تثبیت می کنند. این عملکرد دوگانه محصول پوششی آن را به یک روش استراتژیک کنترل فرسایش تبدیل می کند. گیاهان پوششی خاک را با مواد آلی تثبیت و غنی می کنند. گیاهان پوششی از طریق ورودی زیست توده و به دام انداختن مواد مغذی، حاصلخیزی خاک را افزایش می دهند، ساختار خاک را بهبود می بخشند و فرسایش پذیری خاک را کاهش می دهند. در شیب‌های تند و در خاک‌های فرسایش‌پذیر، گیاهان پوششی می‌توانند فرسایش خاک را در مقایسه با تک‌کشت حدود ۵۰ درصد کاهش دهند. گیاهان پوششی هنگامی که در ارتباط با سایر پوشش های گیاهی دائمی (مانند درختان) استفاده می شوند، پایداری و استحکام خاک های کم عمق را بهبود می بخشد و رانش زمین را کاهش می دهد.

به دلیل مزایای چندوجهی، استفاده از گیاهان پوششی بسیار مطلوب است. محصولات پوششی عمدتاً بین فصول زراعی کشت می شوند. آنها همچنین می توانند به عنوان محصولات تناوب و همراه با محصولات اصلی رشد کنند. محصولات پوششی متعلق به گونه‌های گرامینا یا علوفه ای به سرعت جوانه می‌زنند و می‌توانند مواد مغذی محصولات اصلی قبلی را به دام بیاندازند و از هدررفت مواد مغذی از طریق شسته شدن بکاهند. در مناطق معتدل، گیاهان یکساله زمستانه رایج ترین محصولات پوششی هستند. گیاهان یکساله و چند ساله تابستانی نیز در برخی از خاک ها کشت می شوند. تبدیل شیوه‌های کشت تکی به تناوب‌های پیچیده/متنوع شامل محصولات کود سبز مقرون‌به صرفه و یک الگوی نسبتاً جدید برای کاهش فرسایش خاک، افزایش عملکرد محصول و افزایش ترسیب خاک است. استفاده از محصولات پوششی به دلیل شرایط اقتصادی و اجتماعی محلی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، تا حدودی محدود است.

Table 6.2 Rates of soil erosion from croplands with and without cover crops

Cover crop	Soil erosion (Mg ha^{-1})	
	Without cover	With cover
Velvet bean[1]	3.3	0.35
Crimson clover[2]		4.42
Rryegrass[2]	11.31	4.08
Lespedeza[2]		5.55
Tall fescue[2]		7.08
Rye and hairy vetch[3]	41.3	3.70
Winter wheat and hairy vetch[4]	74	20
Canada bluegrass[5]		0.42
	2.45	
Downy brome[5]		0.24

فرسایش بادی

مانند کاهش فر سایش آبی، گیاهان پو ش شی فر سایش بادی را نیز کاهش می دهند. ک شت پو ش شی برای کنترل فر سایش بادی در مناطق خ شک و نیمه خ شک که پو شش خاک ناچیز ا ست مفید ا ست. ر شد یک گیاه پو ششی باعث تثبیت دانه های خاک می شود و ذرات منعقد شده به راحتی توسط باد حمل نمیشوند. گیاهان پو ششی از خاک در برابر فر سایش باد در بین فصول ر شد که خاک ها معمولاً برهنه و لخت هستند محافظت می کنند. وجود گیاهان پو ششی باعث افزایش زبری سطح و کاهش جهش و خزش سطحی ذرات خاک در هنگام فرسایش بادی می شود. گیاهان پوششی را می توان بین ردیف های محصول عمود بر جهت باد غالب کا شت تا مانع فیزیکی در برابر باد شود. کاهش اندک سرعت باد تو سط گیاهان پو ش شی منجر به کاهش قابل توجهی در فرسایش باد می شود. فرسایش بادی از خاک های محافظت شده با گیاهان پوششی می تواند تا ۵۰ درصد خاک های بدون گیاهان پوششی کم باشد (دلگادو و همکاران، ۱۹۹۹). گیاهان پوششی همراه با روش‌های بدون خاک‌ورزی مؤثرترین ابزار برای کنترل فرسایش بادی هستند.

مدیریت محصولات پوششی

انتخاب یک محصول پو ششی و مدیریت آن برای استفاده از حداکثر مزایا بسیار مهم است. گیاهان پو ششی شامل علف‌ها یا حبوبات یکساله، دو ساله و چندساله هستند. انتخاب گونه و مدیریت به اهداف خاص (مانند

کنترل فرسایش، تجمع نیتروژن، سرکوب علف های هرز) بستگی دارد. برای به دست آوردن توده های متراکم، محصولات پوششی اغلب با تراکم بالایی کاشته می شوند. استفاده از گیاه پوششی به عنوان کود سبز قبل از گلدهی توصیه می شود. زیر خاک کردن گیاهان پوششی در حالی که شاخ و برگ سبز است باعث بهبود تجزیه، افزایش فعالیت بیولوژیکی، آزادسازی سریع مواد مغذی و کاهش نسبت C:N مواد آلی می شود. از آنجایی که گیاهان پوششی اغلب محتوای آب خاک را کاهش می دهند، باید چندین هفته قبل از کاشت محصولات اصلی در خاک گنجانده شوند تا خطرات تنش خشکی در مناطق نیمه خشک و خشک به حداقل برسد. زیر خاک کردن گیاهان پوششی مزیت آنها را برای کنترل فرسایش خاک کاهش می دهد، در مقابل باقی ماندن گیاهان پوششی روی سطح خاک که از خاک در برابر فرسایش محافظت می کند، محتوای مواد آلی خاک را افزایش می دهد، منبع مواد مغذی را افزایش می دهد و علف های هرز را سرکوب می کند.

بقایای گیاهی Crop Residues

بقایای گیاهی باقیمانده در سطح مزارع جزو دارایی های ارزشمند خاک های کشاورزی هستند و خدمات اکوسیستمی متعددی مانند کاهش فرسایش خاک، بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، افزایش تولید محصول و بهبود محیط زیست را ارائه می دهند. به طور خاص، بقایای گیاهی برای کاهش رواناب و فرسایش خاک، بهبود خواص هیدرولیکی خاک، افزایش ذخیره آب خاک، تعدیل دمای خاک، افزایش یا حفظ مواد آلی خاک، و بهبود حاصلخیزی خاک حیاتی هستند. بقایای گیاهی برای اهداف مختلفی استفاده می شود، اما وظیفه اصلی آنها حفظ خاک و آب است. در برخی از اکوسیستم ها، بیشتر بقایای گیاهی به عنوان علوفه برای حیوانات استفاده می شود، در حالی که در برخی موارد بقایای سطح خاک،سوزانده یا برداشت می شوند. اخیرا نیز از بقایا برای تولید سوخت زیستی استفاده میشود. مدیریت بقایا برای حفظ خاک و آب، چرخه مواد مغذی (مانند N، P، K، S، ریز مغذی‌ها) و ترسیب C ضروری است. شیوه های مدیریتی (به عنوان مثال، بدون خاک ورزی) که تمام یا بیشتر بقایای محصول را در سطح خاک باقی می گذارد، ترجیح داده می شوند.

مقدار بقایای محصول تولید شده با سیستم کشت، نوع خاک و منطقه بوم متفاوت است. چهار کاربرد اصلی رقابتی از بقایای گیاهی عبارتند از: حفاظت از خاک و آب، خوراک دام، مواد اولیه سوخت زیستی و مواد خام صنعتی.

بقایای گیاهی سطح خاک را در برابر عناصر آب و هوایی و تردد ماشین آلات محافظت می کند و تغییرات نامطلوب ناشی از ترافیک در خواص مکانیکی خاک مانند شاخص مخروط، مقاومت برشی، چگالی ظاهری و تخلخل را کاهش می دهند. پوشش بقایا حساسیت خاک سطحی به فشردگی و سله بستن را کاهش می دهد (شکل ۶,۳). در حالی که چگالی ظاهری خاک کاهش می یابد، نگهداشت آب و پایداری خاکدانه ها با استفاده از بقایای گیاهی افزایش می یابد. هدایت هیدرولیکی اشباع شده و ظرفیت نفوذ آب را افزایش می دهد. هدایت هیدرولیکی در خاک های بدون خاکورزی با پوشش کامل از بقابا می تواند ده برابر در مقایسه با خاک های بدون پوشش باقیمانده افزایش یابد (Blanco-Canqui et al., 2007). مهمترین اثر مدیریت بقابا بر پویایی تعادل انرژی است. پوشش بقابا نوسانات ناگهانی رژیم های آب و دمای خاک را کاهش می دهد. خاک های دارای بقایا اغلب دارای ذخایر آب بیشتری نسبت به خاک های بدون بقایای گیاهی هستند. دمای خاک‌های دارای بقایای در بهار و تابستان در مقایسه با خاک‌های بدون مالچ بقایای گیاهی کمتر است. تبخیر در سیستمهای بدون خاک‌ورزی با افزایش میزان بقایا کاهش می‌یابد، در نتیجه ذخایر آب در دسترس گیاه افزایش می‌یابد.

مدیریت بقایا می‌تواند به شـــدت بر خواص دینامیکی خاک تأثیر بگذارد، اما میزان تغییر به نوع خاک، مقدار باقیمانده، سیستم‌های خاک‌ورزی و آب و هوا بستگی دارد. باقی ماندن بقایای گیاهی روی سطح خاک به طور قابل توجهی رواناب و فرسایش خاک را کاهش می دهد. حذف کامل بقایا منجر به شروع سریع رواناب و افزایش سرعت رواناب می شود. بدون توجه به نوع خاک، رواناب و فرسایش کل از خاک های شخم زده بدون بقایای چندین مرتبه بزرگتر از خاک های بدون خاکورزی با بقایای خاک اســت. کاهش رواناب در خاک های دارای بقایای گیاهی به دلیل نرخ نفوذ آب بالا و تخلخل درشت است. کاهش رواناب آب و فرسایش خاک در خاک های مالچ شـــده همچنین انتقال آلاینده های غیر نقطه ای (مانند کودها، آفت کش ها و علف کش ها) را به رودخانه ها و نهرها کاهش می دهد. وجود بقایای گیاهی در کاهش فرســـایش خاک و مواد شـــیمیایی همراه رسوبات موثرتر از کاهش رواناب است. حفظ پوشش باقیمانده به طور قابل توجهی تلفات مواد مغذی گیاه ($NO3-N$، $NH4-N$ و $PO4-P$) را در رواناب کاهش می دهد. غلظت مواد مغذی در رواناب به صورت خطی با افزایش مقدار مالچ بقایای گیاهی کاهش می یابد. بقایای گیاهی مورد استفاده همراه با سیستم های خاکورزی حفاظتی (به عنوان مثال، بدون خاکورزی) روش های بســـیار موثری در کاهش فرســـایش خاک از خاک های کشاورزی هستند.

سطح آستانه بقایا

در برخی از خاک‌ها و اکوسیستم‌ها، ممکن است بتوان بخشی از بقایای گیاهی را برای تولید انرژی و سایر اهداف بدون تأثیر نامطلوب بر عملکرد خاک از مزرعه حذف کرد. اطلاعات در مورد حداکثر میزان حذف مجاز باقیمانده ها با حفظ ســطح مطلوب بهره وری خاک، تولید محصــول و حفاظت از محیط زیســت وجود ندارد. داده های برخی آزمایش ها نشان می دهد که حدود ۳۰ و ۴۰ در صد از کل تولید بقایای برای کاهش خطرات فرسایش خاک موثر است.

اصلاح کننده‌های خاک Soil Amendments

هر ماده ای که با هدف بهبود خواص خاک و کاهش رواناب و فر سایش خاک به سطح یا داخل خاک ا ضافه شود، بهبود دهنده یا اصلاح کننده گفته میشود (SSSA, 2008). کاربرد بهبوددهنده ها روی سطح خاک به ویژه زمانی که با سیستم های بدون خاکورزی استفاده شوند، بر خلاف شیوه های سنتی که در آن بهبوددهنده ها تحت شخم زدن قرار می گیرند، موثرتر خواهد بود. برخی از بهبوددهنده های خاک (به عنوان مثال، کودهای حیوانی، بقایای گیاهی، کودهای سبز) از آغاز کشاورزی استفاده شده اند (جدول ۶,۱). آنها مزایای بی شماری از جمله کاهش فرسایش خاک و بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را ارائه می دهند.

مواد اصلاح کننده خاک را می توان به مواد آلی، طبیعی و مصنوعی طبقه بندی کرد. اصلاح کننده‌های ارگانیک طبیعی شامل بقایای گیاهی تجزیه نشده، تا حدی تجزیه شده و تجزیه شده می باشند. ضایعات صنعتی (مانند خاک اره)، ضایعات شهری (مانند ضایعات مواد غذایی) و مواد طبیعی (مانند گچ) نیز اصلاح‌کننده‌های مهمی هستند. به عنوان مثال، پسماندهای غذایی زمانی که به درستی کمپوست شوند می توانند یک اصلاح کننده مهم خاک باشند (Miller, 2002). ضایعات مواد غذایی کمپوست شده فرآیندهای میکروبی را تحریک می کند، مواد مغذی ضروری گیاه را تولید و بازیافت می کند، خاکدانه‌سازی خاک را بهبود می بخشد، فرسایش خاک را کاهش می دهد و گرمایش جهانی را کاهش می دهد. بازیافت محصولات جانبی ارگانیک علاوه بر اصلاح خاک، هزینه های دفع مواد را کاهش می دهد.

همه اصلاح کننده های خاک عملکرد یکسانی را انجام نمی دهند، اما همه به کنترل فرسایش خاک و بهبود کیفیت خاک و رشد گیاه کمک می کنند. اصلاح کننده ها ارگانیک رشد گیاه را از طریق بهبود ساختار خاک، افزایش احتباس آب و تامین مواد مغذی گیاه افزایش می دهند. برخی از اصلاح کننده ها عملکردهای خاصی را انجام می دهند مانند آهک که اسیدیته خاک را کاهش می دهد یا pH را افزایش می دهد. اصلاح کننده ها دیگر، مانند بقایای گیاهی، در کنترل فرسایش خاک، تکمیل مواد مغذی، بهبود ساختار خاک، و ترسیب C آلی خاک مفید هستند.

اصلاح کننده‌های ارگانیک

استفاده از کود دامی یکی از شیوه های قدیمی برای بهبود تولید محصول و افزایش حاصلخیزی خاک است. کود حاصل از گوسفند، گاو و طیور از جمله انواع کود حیوانی رایج هستند. کود را قبل از کاشت گیاهان در خاک می ریزند یا روی سطح خاک پخش می کنند. کود دامی نه تنها تولید محصول را بهبود می بخشد، بلکه خواص خاک را بهبود می بخشد و فرسایش خاک را کاهش می دهد. کود دامی با افزایش تشکیل، پایداری و استحکام خاکدانه ها، فرسایش خاک را کاهش می دهد. خاکدانه های غنی شده با مواد آلی کمتر مستعد ریزش هستند و دارای تخلخل بالاتری هستند که منجر به نرخ نفوذ آب بیشتر می شود. کود دامی می تواند رواناب آب را ۷۰-۹۰٪ و از هدررفت رسوب را ۸۰-۹۵٪ در نتیجه افزایش محتوای مواد آلی کاهش دهد (Grande et al., 2005). استفاده از کود دامی در ترکیب با سایر روش‌های حفاظتی، مانند عدم خاک‌ورزی با میزان بالای بقایای گیاهی، یک استراتژی موثر برای کاهش فرسایش خاک است. استفاده بی رویه از کود ممکن است اثرات مخربی بر کیفیت آب داشته باشد. بنابراین، بهینه سازی میزان کاربرد کود برای کاهش فرسایش خاک و به حداقل رساندن آلودگی مهم است. انتقال مواد مغذی محلول از خاک‌های بدون کود دامی اغلب کمتر از خاک‌های کوددهی شده است.

مواد تخلخل ساز خاک SOIL CONDITIONER

مواد تخلخل ساز خاک به هر ماده‌ای گفته می شود که به طور قابل توجهی ویژگی های فیزیکی یا فرآیندهای فیزیکی خاک را برای استفاده معین یا به عنوان محیط رشد گیاه بهبود می بخشد. (SSSA، 2008). این ماده طبیعی یا مصنوعی است که در مقادیر کم به خاک اضافه می شود و معمولاً به سرعت با ذرات خاک واکنش نشان می دهد تا یک یا چند ویژگی خاک را بهبود بخشد. پلیمرها بهترین نمونه از تخلخل سازهای خاک هستند. در طول ۵۰ سال گذشته، بسیاری از مواد پلیمری مصنوعی محلول در آب (به عنوان مثال، پلی آکریل آمیدها) برای تثبیت خاک و کاهش فرسایش توسعه یافته اند. پلیمرهای جدید از اولین پلیمرهایی که در اوایل دهه ۱۹۵۰ ساخته شدند مقرون به صرفه تر، در دسترس تر و موثرتر هستند.

پلیمرها نه تنها در کاهش فرسایش خاک در زمین‌های زراعی مفید هستند، بلکه در تثبیت مکان‌های ساخت‌وساز شهری و جاده‌ای نیز مفید هستند. پلیمرها در کاهش فرسایش خاک، کاهش آلودگی غیر نقطه ای، بهبود خواص خاک و افزایش رشد گیاه مفید هستند.

پلیمر یک ترکیب طبیعی یا مصنوعی با وزن مولکولی بالا است که از میلیون‌ها مونومر به هم پیوسته یا زنجیره‌های بلند مولکول تشکیل شده است (مارتین، ۱۹۵۳). پلیمرها معمولاً به عنوان پلاستیک یا رزین تولید شده از گاز طبیعی شناخته می شوند. پتانسیل پلیمرها برای بهبود کیفیت خاک سطحی بالا ست. استفاده از پلیمرها ابتدا در ایالات متحده آمریکا در اوایل دهه ۱۹۵۰ شروع شد (Allison, 1952). وینیل استات مالئیک اسید (VAMA) معروف به کریلیوم یا CRD 186، پلی اکریلونیتریل هیدرولیز شده (HPAN) یا CRD 189 و ایزوبوتیلن مالئیک اسید (IBM) برخی از اولین پلیمرهای محلول در آب هستند که در دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ به عنوان تخلخل ساز مورد استفاده قرار گرفتند. ، ۱۹۹۸). این پلیمرها در اوایل دهه ۱۹۵۰ به عنوان راه‌حلی شیمیایی برای تمام مشکلات تخریب خاک مانند تراکم، پوسته‌سازی، سله بستن سطحی، رواناب آب و فرسایش خاک معرفی شدند، با این وجود، هزینه بالا، مشکلات در استفاده، روش‌های گران‌قیمت کاربردها و نتایج میدانی مختلط منجر به ناامیدی‌هایی شد که در نهایت منجر به رها شدن این پلیمرها گردید. در سال های بعد تحقیقات بیشتری بر توسعه پلیمرهای کاربرپسندتر متمرکز شد. پلیمرها از جمله قیر و ساریا در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ معرفی شدند و به خصوص در تثبیت شیب در امتداد جاده ها و بزرگراه ها نسبتاً محبوب شدند (والاس و والاس، ۱۹۸۶). دو امولسیون قیر پرکاربرد برای تثبیت خاک، کاهش فرسایش خاک و بهبود رشد گیاه، فرم های آنیونی و کاتیونی هستند. امولسیون قیری آنیونی "Bituplant" همراه با "بازدارنده تبخیر ساریا" تبخیر خاک را کاهش می دهد، خاک های فشرده را متخلخل می کند، خاکدانه‌سازی را افزایش می دهد و حفظ آب خاک، جوانه زنی، رشد ریشه و عملکرد محصول را بهبود می بخشد. پلی ساکاریدهای کاتیونی (PSDs) نیز که از تبدیل مواد آلی به دست می‌آیند، تخلخل سازهایی هستند که برای تثبیت خاک و کنترل فرسایش استفاده می‌شوند (Graber et al., 2006).

پلی آکریل آمیدها (PAMs)، پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا، برای کاهش فر سایش خاک به ویژه فر سایش آبی اســتفاده می شــوند (والاس و والاس، ۱۹۸۶) (شــکل ۶,۷). PAM ها دارای طیف گســترده ای از وزن مولکولی و انواع فرمول ه ستند و می توانند کاتیونی، آنیونی و غیریونی با شند. PAM های آنیونی، ترکیبات محلول در آب با حدود ۱۵۰۰۰۰ مونومر در هر مولکول، برای کنترل فرســایش و رواناب اســتفاده می شــوند (Sojka et al., 2004). بیش از ۴۰۰۰۰۰ هکتار از خاک های آبی در ایالات متحده آمریکا با PAM ها محافظت می شود و بزرگترین منطقه تحت PAM در آیداهو است (Sojka، 2006). توسعه PAM های با وزن مولکولی بالا، هزینه های خرید و نرخ کاربرد را کاهش داده و روش های کاربرد را بهبود بخ شیده ا ست. نرخ بالای کاربرد (۵۰۰-۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) از PAM مورد اســتفاده در مطالعات اولیه به ۱۰-۲۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافته ا ست در حالی که نتایج یکسانی در کنترل فر سایش خاک حا صل می شود. کاهش در میزان کاربرد PAM به پیشــرفت در شــیمی پلیمرهای مصــنوعی نســبت داده می شــود (تری و نلسون، ۱۹۸۶). در مقایسه با Krilium، PAM تخلخل ساز بهتری است زیرا مقدار PAM مورد نیاز برای دســتیابی به نتایج مشــابه یا حتی بهتر حفاظت از خاک ۱۰-۱۰۰ برابر کمتر اســت. در دهه ۱۹۵۰، پلیمرها معمولاً در عمق ۱۰ یا ۲۰ سانتی متری شخم زده می شدند. در حال حاضر، PAM به طور معمول بر روی سطح خاک اعمال می شود و در کل لایه شخم گنجانده نمی شود. کاربرد سطحی نرخ کاربرد را کاهش می دهد، هزینه ها را کاهش می دهد و PAM را از نظر اقتصادی برای مدیران زمین جذاب تر می کند. PAM لایه های نازک و متخلخلی را بر روی سطح خاک تشکیل می دهد و به عنوان یک پو شش برای محافظت از خاک در برابر نیروهای فرسایشی خاک عمل می کند. PAM آنیونی یک پلیمر بی خطر برای محیط زیست بوده و تهدیدی برای موجودات خاک و آبزیان ایجاد نمی کند (Sojka، 2006). پلی آکریل آمیدها همچنین برای انعقاد و حذف مواد مغذی، آفت کش ها، میکروارگانیســم ها و دانه های علف های هرز از روان آب مهم هستند.. علاوه بر کاهش کنترل فر سایش، PAM می تواند زهکشی را بهبود بخشد، حذف املاح، ر سوب و آلاینده های غیرنقطه ای را افزایش دهد (Sojka، 2006)، و آب قابل دسترس گیاه را برای سبز شدن بذر و استقرار محصول در خاک های با بافت درشت در خاک های نیمه خشک و خشک افزایش دهد، بویژه جایی

که آب برای تولید محصول بسیار کمیاب است (سیواپالان، ۲۰۰۶). PAM همچنین برای لخته سازی ر سوبات معلق و کاهش کدورت آب از مناطق شهری مفید ا ست. Blanco-Canqui و همکاران، (۲۰۰۴) نشان دادند که استفاده از PAM با نرخ ۹ کیلوگرم در هکتار به طور قابل توجهی رواناب و فرسایش خاک را کاهش می دهد (شکل ۲). ۶,۸).

پلی آکریل آمیدها فرسایش خاک را از طریق مکانیسم های زیر کاهش می دهند:

- تثبیت خاکدانه های خاک،
- کاهش انرژی جنبشی باران،
- حفظ زبری سطح خاک،
- تعامل با فضاهای بین خاکدانه ای،
- افزایش انسجام ذرات خاک،
- کاهش جداشدگی خاک،
- کاهش سله بستن و پوسته شدن سطح،
- لخته سازی ذرات معلق خاک،
- تثبیت منافذ درشت رسانای آب،
- کاهش پراکندگی ذرات رس و
- تشکیل پل های بین ذرات

افزایش پایداری خاکدانه ها، مقدار ذرات دیسپرس شده موجود برای مسدود کردن منافذ خاک و فرسایش را کاهش می دهد. فرآیندهای مرتبط با خواص هیدرولیکی خاک را بهبود می بخشد، رواناب را کاهش می دهد، سرعت نفوذ و هدایت هیدرولیکی را افزایش می دهد و رشد گیاه و عملکرد محصول را بهبود می بخشد (شکل ۶,۷). مولکول های PAM به خاکدانه ها نفوذ نمی کنند اما بیشتر روی سطح باقی می مانند. بنابراین، PAM ساختار داخلی خاک را تغییر نمی دهد. این فقط ویژگی های ساختاری سطح را بهبود می بخشد که باعث افزایش نفوذ و کاهش رواناب می شود. خاک های تیمار شده با PAM به دلیل افزایش پایداری خاکدانه ها در برابر ضربه های قطرات باران و جدا شدن مقاومت می کنند. کاربردهای سطحی پلیمرها با کاهش خشک شدن، پوسته شدن و افزایش پایداری خاکدانه ها، ظهور محصول را بهبود می بخشد. PAM ساختار خاک را تثبیت می‌کند و تداوم و فراوانی منافذ را افزایش می‌دهد، اما برخلاف

اصلاح‌کننده‌های آلی (مانند کودهای سبز، بقایای گیاهی) ساختار خاک را بهبود نمی‌بخشد. استفاده از PAM در خاک های فشرده یا تخریب شده ممکن است حرکت آب را در چند سانتی متر بالا بهبود بخشد. PAM ممکن است به طور قابل توجهی انسجام و پایداری خاک های درشت بافت را بهبود ندهد، اما می تواند نفوذ آب و ظرفیت نگهداری آب را افزایش دهد.

عوامل موثر بر عملکرد پلی آکریل آمیدها

اثربخشی PAM برای کاهش فرسایش خاک به تعدادی از عوامل تعاملی از جمله نوع خاک، ویژگی‌های PAM و ویژگی‌های بارندگی و رواناب و مدیریت خاک بستگی دارد (جدول ۶,۷).

خصوصیات خاک

بافت خاک یکی از عوامل ا صلی تاثیرگذار بر عملکرد PAM ا ست. PAM محلول در آب بهترین عملکرد را در خاک های با بافت ریز دارد زیرا مولکول های PAM به راحتی با کلوئیدهای خاک و ذرات ریز برای تشکیل لخته در تعامل هستند. مولکول های PAM توسط نیروهای کولمبیک و واندروالس به سطح ذرات ریز که دارای سطح ویژه بالاتری هستند جذب می شوند. در نتیجه انسجام ذرات و مقاومت در برابر نیروهای برشی توسط رواناب را بهبود می بخشد. کانی‌های رسی تأثیر قابل‌توجهی بر جذب PAM دارند که به ترتیب مونتموریلونیت > کائولینیت > ما سه ریز مطابق با سطح ویژه مواد خاک ا ست. وجود یون ها در غلظت های مختلف می تواند توانایی جذب PAM توسط کانی های رسی را تغییر دهد. خاکهایی که دارای کاتیونهای دو ظرفیتی فراوان مانند Ca^{2+} و Mg^{+2} هستند در جذب PAM مؤثرتر از خاکهای دارای کاتیونهای تک ظرفیتی مانند Na^{+} هستند. اندازه، ساختار داخلی و بار الکتروا ستاتیکی کانی‌های ر سی، تفاوت‌ها در جذب PAM تو سط سطح خاک را تو ضیح می‌دهند. محتوای نمک محلول خاک یا آب آبیاری عامل مهمی ا ست که بر عملکرد PAM تأثیر می گذارد زیرا افزایش شوری باعث کاهش مقدار آب جذب شده تو سط مولکول های PAM می شود. مواد آلی به دلیل کاهش مکان های جذب و افزایش دافعه الکترواستاتیک بین ذرات خاک، نرخ جذب PAM را به طور قابل توجهی کاهش می دهد.

ویژگی‌های پلی اکریل آمید

فرمولاسیون های مختلف PAM با وزن های مولکولی، بارهای یونی و اشکال مختلف وجود دارد که اثربخشی PAM را تعیین می کند. تثبیت خاک تابعی از وزن مولکولی و درجه هیدرولیز PAM است. هر چه وزن مولکولی بیشتر و درجه هیدرولیز کمتر باشد، تثبیت خاکدانه بیشتر است. فرمولاسیون PAM شامل مواد خشک دانه ای، بلوکی، پودری و مایع یا امولسیون است. چگالی بار منفی PAM بین ۲ تا ۳۰ در صد با مقدار معمولی ۱۸ در صد متغیر است. فرم های خشک حدود ۸۰ در صد ماده فعال وزنی دارند در حالی که امولسیون ها ۳۰ یا ۵۰ درصد دارند. PAM مورد استفاده برای بهبود نفوذ اغلب وزن مولکولی پایینی دارد. PAM امولسیون ممکن است فرسایش خاک را بهتر از PAM خشک در مراحل اولیه پس از شروع بارندگی کنترل کند، زیرا به دلیل برهمکنش سریع امولسیون ها با خاک است.

دو شکل رایج PAM عبارتند از: (۱) محلول در آب و (۲) PAMهای غیر محلول در آب. PAMهای محلول در آب که "خطی" و "غیر متقاطع" نامیده می شوند معمولاً برای کنترل فرسایش استفاده می شوند. اگرچه PAM های متقاطع یا غیر خطی، در آب نامحلول هستند، اما می توانند مقادیر قابل توجهی آب را جذب کنند، این خاصیت باعث بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک های شنی میشود. توسعه پلیمرهای شبکه ای باعث افزایش استفاده از پلیمرها برای افزایش احتباس آب در خاک های درشت بافت شده است. پلیمرهای متقاطع می توانند آب را ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر وزن خشک خود جذب کنند.

الگوهای بارندگی/آبیاری

اثربخشی PAM تابعی از شدت بارندگی و الگوهای آبیاری است. هر چه شدت بارندگی بیشتر باشد، طول عمر PAM برای کنترل فرسایش خاک کمتر است. از آنجایی که کارایی PAM با گذشت زمان کاهش می‌یابد، ممکن است برای کاهش فرسایش خاک و رواناب آب در یک یا فصل‌های مختلف به مقادیر بیشتری از PAM یا کاربردهای تقسیم‌شده نیاز باشد. اثرات سودمند کاربرد PAM در ۲ تا ۴ کیلوگرم در هکتار

ممکن است فقط برای یک یا دو رویداد آبیاری/باران دوام داشته باشد. اثربخشی PAM بسته به شدت بارندگی و مقدار PAM می‌تواند حتی ظرف یک ساعت پس از استفاده از PAM کاهش یابد.

مدیریت خاک

استفاده از PAM در ترکیب با سایر روش‌های کنترل فرسایش خاک، عملکرد PAM را برای کنترل فرسایش خاک بهبود می‌بخشد. روش‌های متداول شامل استفاده از PAM در ترکیب با: (۱) گچ، (۲) بقایای محصول و (۳) نوارهای بافر چمنی است. به عنوان مثال، اعمال مالچ بقایای گیاهی در خاک های تحت تیمار PAM می تواند کاهش فرسایش خاک را در مقایسه با PAM به تنهایی دو برابر کند (Bjorneberg et al., 2000). ترکیب PAM با سایر روش‌ها برای بهبود عملکرد PAM در مکان‌های بسیار حساس با شیب‌های تند بسیار مهم است. کاربردهای PAM با دوز پایین ممکن است در کاهش کدورت و تلفات رسوب از شیب‌های تند در سایت‌های ساخت‌وساز بسیار مؤثر نباشد، اما افزودن مالچ و استقرار چمن می‌تواند عملکرد PAM را بهبود بخشد. توجه به این نکته مهم است که PAM جایگزینی برای سایر اقدامات حفاظتی نیست. پلیمرها برای تثبیت موقت خاک های تازه کشت شده یا آشفته استفاده میشوند در حالی که پوشش گیاهی یا سایر اقدامات حفاظتی دائمی هستند.

نرخ بهینه کاربرد PAM به ویژگی های خاص سایت بستگی دارد. به عنوان مثال، کاربرد ۲ تا ۴ کیلوگرم در هکتار PAM می‌تواند فرسایش خاک را ۷۰ تا ۹۰ درصد در برخی از خاک‌ها کاهش دهد، اما در برخی از خاک‌ها تنها تا ۲۰ درصد یا کمتر تاثیرگذار است (بیورنبرگ و همکاران، ۲۰۰۰). در زمین‌های شیب‌دار و خاک‌هایی که به‌شدت آبیاری می‌شوند، کاربرد PAM به میزان ۲۰ کیلوگرم در هکتار یا حتی بیشتر ممکن است برای کاهش مؤثر فرسایش خاک مورد نیاز باشد. یک سطح آستانه کاربرد باید برای هر خاک تعیین شود. کاربردهای خیلی کم یا زیاد ممکن است بر میزان نفوذ آب و کنترل فرسایش خاک تأثیری نداشته باشد. ژل های حل نشده در نتیجه استفاده بیش از حد PAM باعث کاهش اثربخشی آن می شود.

جدای از خاک های کشاورزی، PAM برای کنترل فرسایش خاک از مناطق شهری، بریدگی جاده ها، دفن زباله ها و خاک های استخراج شده نیز استفاده می شود. فرسایش خاک از این مکان های آشفته می تواند تا ۱۶۰ تن در هکتار در سال باشد (دانیل و همکاران، ۱۹۷۹). مالچ پاشی، پوشش های پارچه ژئوتکستایل و سدها اغلب به عنوان اقدامات موقتی برای کنترل فرسایش در مکان های حساس استفاده می شود. استفاده از PAM می تواند یک جایگزین کوتاه مدت برای شیوه های سنتی کنترل فرسایش باشد. بر خلاف ایجاد پوشش گیاهی، PAM حفاظت سطحی فوری را پس از ایجاد اختلال در زمانی که خاک در برابر فرسایش آسیب پذیرتر است، فراهم می کند. اسپری PAM حتی می تواند باعث ظهور بذر و استقرار سریع گیاه شود (فلاناگان و همکاران، ۲۰۰۲). استفاده از PAM اغلب با گچ ترکیب می شود تا عملکرد آن را افزایش دهد. نرخ‌های بین ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم در هکتار PAM همراه با ۵ یا ۱۰ میلی‌گرم در هکتار گچ می‌تواند فرسایش و رواناب آب را تا بیش از ۵۰ در صد در سایت‌های ساختمانی با شیب‌های تند (بیش از ۱۰ در صد) کاهش دهد (Flanagan et al., 2002). استفاده از PAM می‌تواند هزینه‌های روش‌های سنتی کنترل فرسایش (به عنوان مثال، مالچ) را در مکان‌های دستخورده تا بیش از ۱۰ برابر کاهش دهد. فناوری پلی آکریل آمید یک همراه بالقوه برای سایر روش های مدیریت خاک برای احیای خاک های تخریب شده است.

سیستم‌های زراعی

سیستم زراعی به نوع و تناوب محصولات کشت شده و شیوه های مورد استفاده برای رشد آنها اشاره دارد که شامل تمام توالی‌های کشت در مکان و زمان بر اساس فن‌آوری‌های موجود در تولید محصول می‌شود (جدول ۷,۱). در گذشته، هدف از کاربرد سیستم‌های کشت به حداکثر رساندن عملکرد محصول بود. اما امروزه، نیاز شـــدیدی به طراحی ســـیســـتم‌های زراعی وجود دارد که نگرانی‌های اجتماعی، اقتصـــادی و اکولوژیکی یا زیست‌محیطی در حال ظهور را در نظر بگیرد. به عنوان مثال، استفاده بیش از حد از مواد شیمیایی (به عنوان مثال، کودها) برای رشد محصولات کشاورزی، به ویژه در کشورهای توسعه یافته، نگرانی هایی را در مورد افزایش خطرات آلودگی غیر نقطه ای ایجاد کرده اســـت. اســـتفاده هدفمند از کودهای معدنی و ســـایر مواد شیمیایی کشاورزی از طریق کشاورزی دقیق و انتخاب سیستم های زراعی مناسب، راهبردهای مفیدی برای به حداقل رساندن آلودگی محیط زیست هستند.

حفظ خاک و آب و حفظ بهره وری طولانی مدت خاک تا حد زیادی به مدیریت سیستم های زراعی بستگی دارد که بر میزان فرســـایش خاک و پویایی ماده آلی خاک تأثیر می گذارد. در حالی که زمین‌های بســـیار تخریب شده ممکن است برای احیای خود نیاز به تبدیل زمین به سیستم‌های غیرکشاورزی (مانند جنگل، چمن چند ساله) داشته باشند، سیستم‌های زراعی مناسب می‌توانند بهره‌وری خاک را حفظ یا حتی بهبود بخشند و با بهبود انعطاف‌پذیری خاک، زمین‌های با تخریب متوسط را احیا کنند. مدیریت سیستم‌های زراعی مســـتلزم مدیریت خاک ورزی، بقایای محصـــول، مواد مغذی، آفات و اقدامات برای حفاظت از خاک اســـت (جدول ۷,۱). اتخاذ کشـــاورزی ارگانیک، مدیریت مناســـب بقایا و تناوب‌های پیچیده زراعی نمونه‌هایی از سیستم های کشت و مدیریت جایگزین مناسب برای شیوه های مرسوم هستند. بهترین ترکیب از شیوه های کشت برای حفاظت از خاک باید برای هر خاک و اکوسیستم تعیین شود. سیستم های زراعی که از نظر اجتماعی قابل قبول، از نظر اقتصادی سودآور و از نظر زیست محیطی سازگار و از نظر سیاسی مجاز هستند، باید برای هر اکوسیستم طراحی شوند. هدف یک سیستم کشت باید حفظ خاک و آب و حفظ تولید محصول باشد.

تناوب زراعی

تناوب زراعی سیستم هایی هستند که در آنها محصولات مختلف به طور متوالی در یک مزرعه در فصول یا سال های متناوب رشد می کنند. کاشت سه یا چند محصول مختلف قبل از بازگشت به محصول اولیه، تناوب طولانی گفته می شود. هر چه تعداد محصولات در یک تناوب بیشتر باشد، مزایای بیشتری برای بهره وری خاک و تنوع گیاهی خواهد داشت. تناوب زراعی یکی از ساده ترین و مطلوب ترین راهبردهای حفاظت از خاک و آب است. سه نوع اصلی تناوب بر اساس مدت زمان وجود دارد (کارلن و همکاران، ۱۹۹۴): ۱. تک کشتی. ۲. تناوب کوتاه. اساساً شامل یک تناوب ۲ ساله است (به عنوان مثال، ذرت- سویا). ۳. تناوب بلندمدت. تناوب های بیش از ۲ سال (به عنوان مثال، ذرت، جو، گندم، شبدر). تناوب محصولات مختلف از نظر اکولوژیکی جایگزین مناسبی برای سیستم تک کشتی است و برای رفع نگرانی های کشاورزی و زیست محیطی مناسب است. مکانیزاسیون کشاورزی، کشاورزی در مقیاس بزرگ، در دسترس بودن تجهیزات سنگین مزرعه، استفاده فشرده از کودها و سموم دفع آفات، و بازده اقتصادی بالا، همگی باعث استفاده از سیستم کشت تک محصولی و تناوب کوتاه مدت شده است. تناوب های طولانی نسبت به تک کشت و تناوب کوتاه ترجیح داده می شوند.

تناوب‌هایی که بیومس زیادی در لایه سطحی و زیرسطحی خاک تولید می‌کنند خطر فرسایش خاک را بیشتر کاهش می دهند. به عنوان مثال کاشت غلات و حبوبات به صورت جایگزین با محصولات ردیفی، پوشش گیاهی متراکم و دائمی ایجاد می کند که خاک زیرین را تثبیت می کند و خطر فرسایش خاک را کاهش می دهد. در مناطق با پتانسیل بالای فرسایش آبی و بادی، تناوب کوتاه با محصولات ردیفی برای کاهش فرسایش خاک کافی نیست. در عوض، تناوب محصولات ردیفی در فواصل زمانی طولانی‌تر (بیش از ۲ سال) با حبوبات و علف چند ساله مانند یونجه و مرتع، یک عمل موثر حفاظت از خاک است. در خاک هایی که خطر فرسایش شدید است باید تناوب با گیاهان علوفه و غلات در ارتباط با سایر روش های حفاظتی ایجاد شود.

گونه‌های گیاهی که بیومس زیادی در سطح و زیر سطح خاک ایجاد میکنند، چگالی ظاهری خاک را کاهش می‌دهند، خاکدانه سازی را افزایش می‌دهند، تخلخل درشت خاک را بهبود می‌بخشند و خاک را تثبیت می‌کنند. بهبود در پایداری ساختاری خاک زمانی اتفاق می‌افتد که تناوب زراعی در ترکیب با کشت بدون خاک‌ورزی استفاده شود. درجه بهبود خواص خاک ناشی از تناوب به مقدار باقیمانده پس از برداشت و زیست توده ریشه بستگی دارد. محصولاتی مانند ذرت نسبت به سویا بقایای بیشتری به جا می گذارند و بنابراین خاک را در برابر انرژی فرسایشی قطرات باران و سله بستن بیشتر محافظت می کنند.

انتخاب محصولات زراعی برای تناوب

انتخاب محصولات برای یک تناوب با ویژگی های محلی و منطقه ای متفاوت است. بستگی به نوع خاک، حاصلخیزی خاک، شیب خاک، اهداف اقتصادی و بازاری، وجود آفات و نوع دام دارد. تناوب زراعی شامل یونجه، شبدر یا علف های چند ساله برای بهبود ساختار خاک، تخلخل درشت، کاهش فشردگی خاک و افزایش محتوای مواد آلی خاک توصیه می شود. کشت محصولات چند ساله در تناوب با محصولات ردیفی باعث حذف خاکورزی و کاهش رفت و آمد ادوات می شود. حبوبات یا گونه‌های علفی ریشه‌دار (بیش از ۱ متر)، لایه های خاک نسبتا فشرده یا غیرقابل نفوذ را سست می‌کنند، کفه شخم را برطرف میکنند، تخلخل خاک را بهبود می‌بخشند، سرعت نفوذ را افزایش می‌دهند و رواناب و فرسایش خاک را کاهش می‌دهند. تکثیر ریشه ها و کاهش آشفتگی خاک در گیاهان چند ساله باعث افزایش پایداری و استحکام خاکدانه ها می شود. گنجاندن گیاهان چند ساله در تناوب زراعی سنتی حاصلخیزی خاک را نسبت به تناوب تنها با گیاهان یکساله تابستانی بهبود می بخشد.

محصولات پوششی جزء جدایی ناپذیر سیستم های زراعی برای حفظ خاک و آب هستند. آنها از خاک در برابر فرسایش محافظت می کنند، ساختار خاک را بهبود می بخشند و حاصلخیزی خاک را افزایش می دهند. استفاده از گیاهان پوششی در تناوب زراعی، عملکرد تناوب را افزایش می دهد. محصولات پوششی رایج زمستانی که در چرخه های تناوب استفاده می شوند، عبارتند از چاودار، شبدر و ماشک (Lal, 2003).

تناوب زراعی و محصولات پوششی هر دو روشهای موثر حفاظتی هستند. تناوب زراعی همراه با محصولات پوشش باعث کاهش بروز حشرات، علف های هرز و بیماری ها، بهبود بهره وری خاک و افزایش پایداری و سودآوری می شود.

کشاورزی کانتوری Contour Farming

کشت کانتور، عملی است که در آن کشت، کاشت و انجام کلیه عملیات زراعی با پیروی از خطوط کانتور شیب مزرعه انجام می شود. این عمل در تضاد با کشاورزی در شیب بالا و پایین است که کمترین مقبولیت را در زمین های شیب دار بسیار فرسایش پذیر دارد. کشاورزی کانتور در سراسر جهان برای کنترل فرسایش خاک پذیرفته شده است. این سیستم شیارهایی عمود بر شیب میدان غالب ایجاد می کند. این شیارها سرعت رواناب را به تاخیر می اندازند، ظرفیت انتقال رواناب را کاهش می دهند، نفوذپذیری آب را افزایش می دهند، انتقال رسوب را کاهش می دهند و رواناب اضافی را در سرعت های غیر فرسایشی تخلیه می کنند. خاک‌های عمیق و نفوذ پذیر بهتر به کانتورینگ پاسخ می دهند. کشاورزی کانتور به طور موثر نرخ فرسایش را در خاک هایی با شیب کمتر از ۱۰ درصد کاهش می دهد (شکل ۷,۴). در شیب‌های تندتر، کشت کانتور همچنان می‌تواند برای کنترل فرسایش مورد استفاده قرار گیرد، اما باید با سایر روش‌های حفاظتی مانند آبراهه‌های چمنی برای تخلیه ایمن آب از ردیف‌های کانتور همراه با شد. در خاک های شیب دار در چین، کشت کانتور در تراس ها یک روش معمول برای حفظ خاک و آب است.

دانشگاه شهید چمران اهواز

کشت نواری Strip Cropping

کشت نواری به کشت محصولات در نوارهای متناوب از محصولات ردیفی یا علوفه/علف اشاره دارد. این سیستم زراعی یک روش موثر برای کاهش فرسایش خاک است زیرا دامنه‌های شیب دار را در نوارهایی با پوشش گیاهی متنوع می شکند که رواناب را قطع می کند و نفوذ آب را تقویت می کند و در نتیجه رواناب و فرسایش خاک را کاهش می دهد. کشت نواری اغلب با تناوب ادغام می شود که در آن هر سال نوارهایی از محصولات مختلف کاشته می شود. علوفه یونجه، مرتع یا حبوبات نیز معمولاً به صورت نواری در تناوب با محصولات زراعی ردیفی استفاده می شود. چمن یا چمن چند ساله به ویژه در کاهش رواناب و فیلتر کردن رسوب موثر است. عرض نوارها به شیب خاک، پتانسیل فرسایش، نوع محصول و اندازه تجهیزات بستگی دارد. نوارهای باریک نسبت به نوارهای پهن، طول جریان را به طور موثرتری کاهش می دهند. عرض نوارها باید با تناوب یا عرض تجهیزات برای کشت مطابقت داشته باشد. در شیب های ملایم تا ۵ درصد، عرض نوار حدود ۳۰ متر توصیه می شود، در حالی که در شیب های تندتر عرض باید کمتر از ۲۰ متر باشد.

کشت نواری روی کانتور Contour Strip Cropping

این سیستم زراعی شامل کاشت محصولات ردیفی به صورت نواری در خطوط تراز شیب مزرعه است (شکل ۷,۵). این نوع کشت کنترل فرسایش و تنوع گیاهی و محصول را افزایش می دهد زیرا کشت کانتور و نواری

را با هم ترکیب می کند. برای کاهش فرسایش خاک در مزارع با خطر فرسایش شدید، کشت نواری روی کانتور نسبت به کانتورینگ به تنهایی مؤثرتر است. سیستم‌های کشت نواری می‌توانند فرسایش خاک را تا کمتر از ۴۰٪ در مقایسه با سیستم‌های بدون این روش‌ها یا با کانتورینگ به تنهایی کاهش دهند (فرانسیس و همکاران، ۱۹۸۶). در خاک هایی با فرسایش شدید باید نوارهای دائمی چمن / حبوبات بین نوارها حفظ شود. این نوارها می توانند به عنوان خطوط ترافیکی برای عملیات زراعی استفاده شوند.

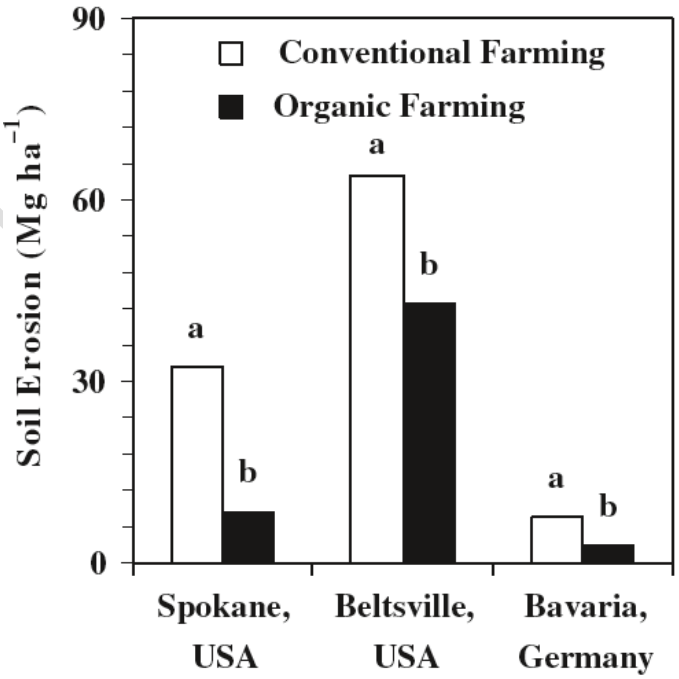
کشاورزی ارگانیک

روش مرسوم برای بهبود حاصلخیزی خاک از طریق افزودن کودهای معدنی بسیار محلول است. به همین ترتیب، مبارزه با آفات و بیماری ها به شدت به ورودی مکرر و زیاد آفت کش های تجاری متکی است. سیستم‌های کشاورزی مرسوم در حالی که کشاورزی را متحول کرده‌اند، اینها همچنین مشکلات عمده‌ای در مورد آلودگی غیر نقطه‌ای، کاهش تنوع زیستی و افزایش تخریب خاک ایجاد کرده‌اند. بنابراین، چالش در توسعه یک سیستم جایگزین است که ورودی مواد شیمیایی را کاهش دهد یا حذف کند و در عین حال بازده محصول بالا را حفظ می کند. یکی از این جایگزین های بالقوه کشاورزی ارگانیک است.

کشاورزی ارگانیک یک سیستم کشاورزی است که در آن برخلاف سیستم های کشاورزی معمولی مبتنی بر مواد شیمیایی، هیچ کود مصنوعی یا سموم دفع آفات برای تولید مواد غذایی و فیبر استفاده نمی شود. به آن کشاورزی بیولوژیکی یا بیودینامیک نیز می گویند. زیرا بیولوژی خاک را بهبود می بخشد، حاصلخیزی طبیعی خاک را افزایش می دهد و تنوع زیستی گیاهان را ارتقا می دهد. این سیستم شامل مجموعه ای از شیوه های کشاورزی سازگار با محیط زیست برای حفظ تولید محصول است. کوددهی ارگانیک برای افزودن مواد مغذی و اقدامات مکانیکی و بیولوژیکی برای کنترل آفات دو جزء کلیدی انحصاری کشاورزی ارگانیک هستند (Reganold و همکاران، ۱۹۸۷). تناوب زراعی، محصولات پوششی، کود دامی، باقی گذاشتن بقایای و کمپوست از جمله منابع جایگزین مواد مغذی در کشاورزی ارگانیک هستند. کشاورزی ارگانیک شامل تمام محصولات زراعی (به عنوان مثال، غلات، پنبه، سبزیجات، گل ها) و محصولات حیوانی (مانند گوشت، لبنیات، تخم مرغ) و غذاهای فرآوری شده است.

کشاورزی ارگانیک از محیط طبیعی تقلید می کند و محتوای مواد آلی خاک را حفظ می کند. هدف کشاورزی ارگانیک حفظ یک اکوسیستم متنوع و فعال از ارگانیسم‌های خاک برای پر کردن مواد مغذی، بهبود/حفظ خواص خاک و ارتقای تنوع بیولوژیکی و در عین حال تضمین تولید پایدار محصول است. کشاورزی معمولی مواد غذایی فراوان و کم هزینه را به قیمت زوال خاک و آلودگی محیط زیست تولید می کند و بنابراین تولید طولانی مدت آن مورد تردید است. در مقابل، کشاورزی ارگانیک مزایای زیادی نسبت به کشاورزی معمولی دارد (جدول ۷,۳). افزایش تقاضا برای محصولات ارگانیک، کشاورزی ارگانیک را به یک سیستم اقتصادی مقرون به صرفه تبدیل کرده است. با ظهور محصولات تراریخته و غذاهای فرآوری شده با افزودنی های شیمیایی، علاقه روزافزونی به کشاورزی ارگانیک وجود دارد. در برخی از کشورهای اروپایی، یارانه‌های مالی توسط دولت برای ترویج و رقابتی‌تر کردن کشاورزی ارگانیک ارائه می‌شود (زیگریست و همکاران، ۱۹۹۸). حدود ۸ درصد از سطح زمین زیر کشت در اروپا تحت کشاورزی ارگانیک است (Mader et al., 2002). تحقیقات در زمینه کشاورزی ارگانیک و بازاریابی محصولات به سرعت در حال پیشرفت است

در عمل، کشاورزی ارگانیک شامل افزودن مقادیر زیادی کود گیاهی و حیوانی است که باعث افزایش فعالیت و تنوع موجودات خاکی (مانند کرم‌های خاکی)، نفوذ آب و کاهش فر سایش‌پذیری خاک می شود (Mader et al., 2002). استفاده کمتر از خاک ورزی و تکیه بیشتر بر تکنیک های بیولوژیکی برای کنترل علف های هرز، استراتژی های کلیدی برای به حداقل رساندن فرسایش خاک در کشاورزی ارگانیک در مقابل کشاورزی معمولی است. در غیاب یا کاهش خاکورزی، مواد آلی عوامل اتصال دهنده (مانند پلی ساکاریدها) را فراهم می کنند و با تثبیت و تقویت خاکدانه ها، توسعه ساختار خاک را تقویت می کنند. کرم‌های خاکی و سایر موجودات خاک مواد آلی تولید می‌کنند (مانند صمغ‌ها، موم‌ها، مواد چسب مانند) که ذرات اولیه را به خاکدانه‌های میکرو و ماکرو پایدار متصل می‌کنند. ترکیب علوفه حبوبات با محصولات کشاورزی در کشاورزی ارگانیک مهم است زیرا موجودات خاکی به طور کلی محصولات پوششی مبتنی بر حبوبات را به عنوان منبع غذایی ترجیح می دهند. نرخ رواناب کمتر در کشاورزی ارگانیک ناشی از افزایش نرخ نفوذ آب است که توسط گونه‌های حبوبات ریشه‌دار افزایش یافته است. نرخ فرسایش خاک از خاک های تحت کشاورزی ارگانیک می تواند ۳۰ تا ۱۴۰ درصد کمتر از نرخ فرسایش خاک در کشاورزی معمولی باشد (شکل ۷,۸).



کشاورزی حفاظتی

شخم‌پذیری خاک soil tilth به «وضعیت فیزیکی خاک در ارتباط با سهولت خاک‌ورزی، مناسب بودن بستر بذر و مقاومت آن در برابر رویش نهال و نفوذ ریشه» تعریف میشود (SSSA، 2008). تعاریف کنونی از شخم‌پذیری خاک به دلیل طبیعت بسیار پویا و پیچیدگی خاک تا حدودی ذهنی و کیفی هستند. شخم‌پذیری خاک محصول فرآیندهای تعاملی پیچیده ای است که در مکان و زمان متفاوت است. خاک‌ورزی مستقیماً بر روی شخم‌پذیری تأثیر می‌گذارد، زیرا خاک را سست و مخلوط می‌کند و باعث بهبود موقتی شخم‌پذیری خاک می‌شود. خاک ورزی حفاظتی، برگشت بقایای محصول و ایجاد محصولات پوششی باعث بهبود شخم‌پذیری خاک می شود.

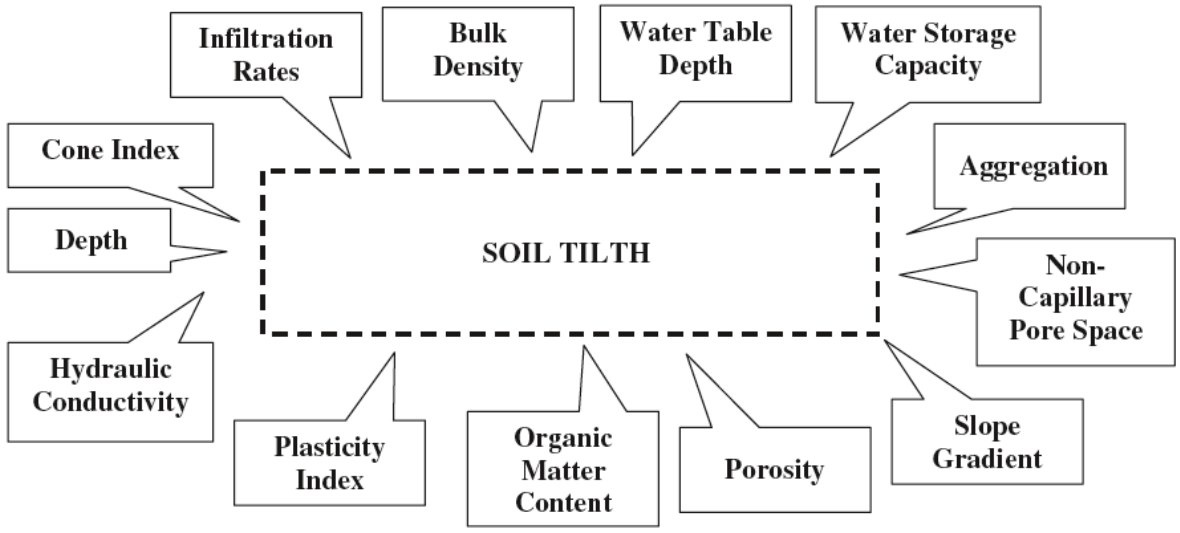
شاخص Tilth

شخم‌پذیری خاک بر اساس ویژگی هایی که به راحتی قابل اندازه گیری هستند با استفاده از یک شاخص مشخص می شود (شکل ۸,۱). شاخص شخم‌پذیری یک مقدار کمی است که شرایط فیزیکی خاک را در محدوده ۰ تا ۱ توصیف می کند. مقدار ۰ برای بدترین و ۱ بهترین شرایط فیزیکی خاک در رابطه با تولید محصول است (Singh et al., 1992). این شاخص در نقاط مختلف جهان برای پیش بینی تغییرات در بهره وری خاک و شناسایی نوع خاک ورزی مورد نیاز برای دستیابی به تولید محصول بهینه برای یک خاک خاص استفاده می شود. شاخص شخم‌پذیری برای حذف ترافیک غیر ضروری و کاهش هزینه های تولید و خطرات تخریب خاک مهم است. یکی از اولین مدل های ساده که برای تخمین شاخص tilth توسعه یافته است، به شرح زیر است (Singh et al., 1992):

$$Index = CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \ldots\ldots\ldots\ldots \times CF_n$$

که در آن n تعداد خواص خاک مورد نیاز برای ارزیابی شخم پذیری خاک است. در این مدل، مقدار هر CF برای هر کدام از ویژگی خاک در نظر گرفته شده محاسبه می شود. برای تعیین مقدار CF برای هر ویژگی خاک سه عبارت کیفی شامل سطح غیر محدود کننده، بحرانی و محدود کننده رشد محصول استفاده می

شود. به عنوان مثال، مقدار CF=0 (بیشترین عامل محدود کننده) به مقادیر چگالی ظاهری خاک بزرگتر از ۱,۸ اختصاص داده می شود در حالی که مقدار ۱ (کمترین عامل محدود کننده) به چگالی کوچکتر از ۱,۳ اختصاص داده می شود. تعداد پارامترهای خاک برای محاسبه شاخص شخم‌پذیری بسته به نوع خاک و سیستم خاکورزی متفاوت است.



خاک ورزی

خاک ورزی به عملیات مکانیکی اطلاق می شود که برای آماده سازی بستر بذر و رشد مطلوب گیاه انجام می شود. یک سیستم خاکورزی شامل مجموعه ای از عملیات مکانیکی از جمله شخم خاک، خرد کردن و ترکیب بقایای گیاهی، کاشت محصولات، کنترل علف های هرز قبل و در طول رشد گیاه، استفاده از کودها و آفت کش ها، و برداشت محصولات است. خاک ورزی، ماهیت کل سیستم خاک را تغییر می دهد. انتخاب ابزار خاکورزی مناسب برای حفظ خاک و آب بسیار مهم است. در حالی که خاک ورزی باعث افزایش عملکرد می‌شود، انتخاب و مدیریت آن برای به حداقل رساندن خطرات تخریب خاک، حفظ تولید کشاورزی و بهبود کیفیت خاک و محیط زیست اهمیت فزاینده ای پیدا می کند. روش خاک‌ورزی خاک، میزان پوشش باقی‌مانده، در دسترس بودن مواد مغذی، فشردگی خاک، پایداری ساختاری خاک، روابط خاک و آب، دمای خاک و فعالیت‌های بیولوژیکی را تعیین می‌کند.

سیستم های خاک ورزی به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: خاک ورزی مرسوم و خاک ورزی حفاظتی: ۱. خاک ورزی مر سوم هر سیستم خاک ورزی ا ست که خاک را زیر رو کرده و ساختار طبیعی خاک را تغییر میدهد. این سیستم در درجه اول به شخم زدن برگردان اشاره دارد.

۲. خاک ورزی حفاظتی به هر سیستمی گفته می شود که تعداد عملیات خاک ورزی را کاهش دهد، پوشش بقایای سطح خاک را حفظ کند و تلفات خاک و آب را نسبت به خاک ورزی معمولی کاهش دهد. این روش مجموعه ای از فن آوری های نوآورانه شامل سیستم های خاکورزی بدون شخم و یا خاکورزی حداقل مانند خاکورزی مالچ، خاک ورزی نواری و خاک ورزی پشـــته ای را در بردارد. خاک‌ورزی کاهش‌یافته یا حداقل شامل هر سیستمی ا ست که در آن خاک کمتر از خاک‌ورزی معمولی اما بیشتر از خاک‌ورزی بدون شخم زیرو رو می‌شود.

سیستم های خاکورزی حفاظتی

خاک ورزی حفاظتی جایگزینی برای خاک ورزی معمولی است. هر سیستم خاک‌ورزی که حداقل ۳۰ درصد از بقایای گیاهی را در سطح خاک بر جای بگذارد، خاک ورزی حفاظتی نامیده می شود (SSSA, 2008). مقدار حداقل ۳۰ در صد پو شش بقایا ممکن ا ست برای برخی از خاک ها منا سب با شد، اما در برخی دیگر

کافی نیست. خاکورزی حفاظتی هنگامی که با مدیریت محتاطانه بقایای محصول، تناوب زراعی و محصولات پوششی ترکیب شود، یک فناوری مفید برای حفاظت از خاک و افزایش/تداوم تولید محصول است. سیستم حفاظتی بهینه باید دارای پوشش گیاهی یا بقایای گیاهی کافی برای افزایش زبری سطح خاک و بهبود ظرفیت نفوذ، کاهش رواناب و فرسایش خاک باشد. یک سیستم خاکورزی حفاظتی باید به طور خاص برای هر خاک بر اساس معیارهای خاص سایت (به عنوان مثال، سود دهی مزرعه، شدت فرسایش خاک، نوع خاک، توپوگرافی، آب و هوا) طراحی شود.

خاک‌ورزی بدون شخم به سیستمی اطلاق می‌شود که در آن یک محصول مستقیماً بدون خاک‌ورزی اولیه یا ثانویه در خاک کاشته می‌شود (SSSA، 2008). این یک شکل افراطی از خاک ورزی حفاظتی است که در آن خاک همیشه دست نخورده باقی می ماند به جز در زمان کاشت. در این روش تمام بقایای سطحی (ساقه، لپه، برگ و غیره) پس از برداشت بر روی خاک باقی می ماند (شکل ۸,۳). علف‌های هرز معمولاً با علف‌کش‌ها کنترل می‌شوند مگر اینکه از سیستم‌های کشت مناسب مانند تناوب زراعی و محصولات پوششی به عنوان حمایت از اقدامات حفاظتی استفاده شود. یک شیار باریک و کم عمق با استفاده از اسکنه روی ردیف برای قرار دادن دانه ها ایجاد می شود. کشاورزی بدون شخم الگوی جدیدی از مدیریت خاک برای حفظ خاک و آب را نشان می دهد (جدول ۸,۲). این ن.ع خاکورزی بخشی از یک انقلاب تکنولوژیکی است که چهره کشاورزی را در بسیاری از مناطق در سراسر جهان تغییر می دهد (به عنوان مثال، ایالات متحده، برزیل، آرژانتین، پاراگوئه)، و بسیاری از کشاورزان در حال تغییر از خاکورزی معمولی (شخم برگردان) به خاک ورزی بدون شخم هستند. تفاوت‌های مشخصی بین سیستم‌های خاک‌ورزی بدون خاک‌ورزی و سنتی یا مرسوم وجود دارد (جدول ۸,۳).

Table 8.2 New and old paradigms of soil management

Old Approach (Conventional Tillage)	New Approach (No-Till Farming)
• Tillage is indispensable to crop production	• Moldboard plowing is not needed
• The goal is to produce crops	• The goal is to produce crops while conserving soil and water
• Crop residues are either burned or plowed into the soil	• Residues are left on the soil surface
• Soil often remains bare between cropping seasons	• Soil remains covered with residues and/or cover crops at all times
• Crop rotations and cover crops are optional	• Crop rotations and cover crops are part of the management system.
• Risks of soil erosion are high	• Risks of soil erosion are minimum or negligible.
• Pests are controlled with the use of chemicals.	• Biological controls (e.g., crop rotations, cover crops) are used in conjunction with other measures against pests.

شهید چمران اهواز

Table 8.3 Consequences of conventional tillage and no-till farming (After Derpsch, 2001)

Conventional Tillage	No-Till Farming
• Increases rates of runoff and soil erosion.	• Reduces runoff and soil erosion.
• Degrades soil physical conditions.	• Improves soil physical conditions.
• Increases wind erosion.	• Reduces wind erosion.
• Causes non-point source water pollution with sediments and chemicals.	• Improves surface water quality by reducing losses of suspended and dissolved loads.
• Increases soil organic matter decomposition and emission of greenhouse gases.	• Increases soil organic matter content in the plow layer.
• Depletes soil nutrients.	• Recycles nutrients through residue retention.
• Causes large fluctuations of soil temperature and water content, which negatively affects crop production.	• Reduces fluctuations of temperature (no-till soils are often warmer at night and cooler during daytime during the growing season).
• Causes loses of water by evaporation	• Decreases soil evaporation.
• Reduces soil water retention and plant available water.	• Increases soil water retention and plant available water.
• Reduces water infiltration rates.	• Increases soil macroporosity and water infiltration rate.
• Degrades soil structural properties over time.	• Improves soil structural properties (e.g., aggregate, stability).
• Decreases population and activity of soil organisms.	• Promotes microbial processes (e.g., earthworm population and activity).
• Leads to a gradual reduction in crop yields.	• Sustains crop production.
• Increases costs of production (e.g, labor, time, machines, and fuel).	• Reduces costs of production.

سویا، ذرت، جو دو سر، عدس، سورگوم، گندم، جو، آفتابگردان و لوبیا عمده‌ترین محصولاتی هستند که با سیستم بدون خاکورزی کشت می شوند. در برخی مناطق، سیستم‌های بدون خاک‌ورزی با تناوب زراعی و محصولات پوششی کود سبز ادغام می‌شوند. تولیدکنندگان در مقیاس بزرگ به دلیل کاهش هزینه ها بیشتر از فناوری‌های بدون خاک‌ورزی استقبال کرده‌اند.

بدون خاکورزی مهم ترین سیستم حفاظتی است زیرا کمترین میزان فرسایش خاک را ایجاد می کند. عملکردی دوگانه در کنترل فرسایش خاک دارد زیرا هم اثر فرسایش پذیری باران و هم فرسایش پذیری

خاک را کاهش می دهد. این عمل ترکیبی خطرات فرسایش خاک را در مقایسه با روش‌هایی که بقایای گیاهی را دفن می‌کنند (مانند شخم زدن تا شخم) کاهش می‌دهد. به دلیل پوشش باقیمانده مالچ، بدون خاک ورزی با بافر کردن انرژی فر سایشی قطرات باران و جلوگیری از تأثیر مستقیم آنها بر سطح خاک، اثر فر سایش باران را کاهش می دهد. کاهش تاثیر قطرات باران جدا شدگی و ریزش خاکدانه را کاهش می دهد. مالچ پسماند همچنین با افزایش زبری سطح خاک، فرسایش رواناب بالادست را کاهش می دهد. سطح ناهموار نفوذ را افزایش می دهد، سرعت و حجم رواناب را کاهش می دهد و رسوبات فرسایش یافته را به دام می اندازد. رواناب و فرسایش خاک با افزایش محتوای آلی در خاک های بدون خاکورزی کاهش می یابد (روتون و همکاران، ۲۰۰۲). فرسایش خاک از خاک های بدون خاکورزی می تواند به ۱۰ درصد از خاک های شخم زده کم باشد (جدول ۸,۵). تمرین بدون خاک ورزی با جلوگیری از تشکیل شیارها، فرسایش خاک را کاهش می دهد. مقداری فرسایش هنوز می تواند در سیستم های بدون خاکورزی رخ دهد، اما بیشتر به شکل فرسایش بین شیاری است. مدیریت بدون خاک ورزی در کاهش فرسایش خاک موثرتر از هدررفت آب رواناب است. رواناب خروجی مزارع بدون خاکورزی نسبت به خاک های شخم زده کمتر کدورت است زیرا ذرات رسوب در حالت تعلیق توسط مالچ باقیمانده فیلتر می شوند.

خاک ورزی کاهش یافته

خاک‌ورزی کاهش‌یافته به هر سیستم حفاظتی اطلاق می‌شود که تعداد کل عملیات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه برای کاشت بذر را از آنچه که معمولاً در مزرعه تحت خاک‌ورزی معمولی استفاده می‌شود به حداقل می‌رساند (SSSA، 2008). به آن حداقل خاکورزی نیز می گویند زیرا استفاده از خاک ورزی را به حداقل می رساند تا نیازهای رشد محصول را برآورده کند. خاک ورزی کاهش یافته یک استراتژی مدیریت حفاظتی است که حداقل ۳۰ در صد پوشش باقیمانده برای به حداقل رساندن رواناب و فرسایش خاک، بهبود عملکرد خاک و حفظ تولید محصول باقی می گذارد. خاک‌ورزی کاهش‌یافته در حال تبدیل شدن به یک عمل حفاظتی مهم مانند بدون خاک‌ورزی است. این سیستم ها رواناب و فرسایش خاک را کاهش می دهند و عملکرد محصول را در مقایسه با سیستم های معمولی بهبود می بخشند یا حفظ می کنند. رواناب و فرسایش خاک ناشی از

حداقل یا کاهش خاکورزی معمولاً بین خاک‌ورزی معمولی و بدون خاک‌ورزی اســـت (جدول ۸,۶). برخی از سیستم‌های خاک‌ورزی کاهش‌یافته شامل خاک‌ورزی مالچی، خاک‌ورزی پشته ای و خاک‌ورزی نواری است.

خاک ورزی مالچی

خاک ورزی مالچی عملی اســت که در آن حداقل ۳۰ درصــد از ســطح خاک پس از خاک ورزی پوشــیده از بقایای گیاهی باقی می ماند. خاک ورزی تحت این سیستم به گونه ای انجام می شود که بقایای گیاهی را در سطح خاک بر جای می گذارد یا حفظ می کند. خاک تحت خاکورزی مالچ اغلب با گاوآهن های اسکنه ای و دیسکی به جای گاوآهن های برگردان کشت می شود و بنابراین وارونگی خاک را به حداقل می رساند. یکی از مزایای خاک‌ورزی مالچ نسبت به خاک‌ورزی بدون خاک‌ورزی این است که می‌تواند علف‌های هرز را بهتر کنترل کند. به حداقل رســاندن خاک‌ورزی ثانویه در خاک‌ورزی مالچ برای حفظ و نگهداری بقایا مهم اســت. استفاده از خاکورزی مالچ مستلزم اصلاح ادوات و عملیات خاکورزی است. انتخاب ابزار برای خاکورزی مالچی مخصوص هر خاک و مدیریت است. برای مناطق نیمه خشک یا خشک مناسب است زیرا تبخیر را کاهش می دهد و آب قابل دسترس گیاه را افزایش می دهد. خاک ورزی مالچ می تواند به اندازه سیستم های بدون خاک ورزی برای حفظ خاک و حفظ عملکرد محصــول در زمین های دیم موثر باشــد. در مناطق مرطوب و خاک های رسی، ممکن است به طور قابل ملاحظه ای شرایط خاک را بهبود نبخشد

بیشه زراعی Agroforestry

بیشه زراعی یک سیستم مدیریت زمین است که درختان و/یا درختچه ها را با محصولات کشاورزی و تولید دام در یک قطعه زمین ترکیب می کند. این یک فناوری نوظهور برای حفاظت موثر خاک و آب است. در یک مفهوم گسترده تر، اگروفارستری شامل طیف وسیعی از اقدامات است که شامل استقرار و مدیریت درختان به طور عمدی در اطراف یا درون زمین های زراعی، زمین های مرتعی، و چراگاه ها با هدف کنترل فرسایش خاک، توسعه سیستم های تولید کشاورزی پایدار، بهبود زیستگاه حیات وحش و روستایی است.

سیستم‌های اگروفارستری نه تنها فرسایش خاک را کنترل می کنند، بلکه محصولات قابل فروش مبتنی بر درخت را نیز ارائه می دهند. آنها اصولاً برای مناطقی با شدت بارندگی بالا، شیب های تند و پوشش گیاهی کم با میزان بالای رواناب و فرسایش خاک ضروری هستند. اگروفارستری در چارچوب نظارت محیطی بهبود خاک، آب و هوا به سمت مدیریت پایدار منابع طبیعی قرار می گیرد. ترکیب درختان و/یا درختچه ها با محصولات سنتی یک رویکرد بیولوژیکی و اکولوژیکی برای متوقف کردن فرسایش آبی و بادی است. این سیستم جایگزینی برای سازه های گران قیمت کنترل فرسایش خاک (به عنوان مثال تراس) برای کاهش رواناب و فرسایش خاک است.

گونه های گیاهی Agroforestry

تعداد گونه های درختی و/یا درختچه ای مورد استفاده در زراعت جنگلی متعدد است (AFD، 2006؛ USDA-NAC، 2006). انتخاب گونه های درختی برای زراعت جنگلی برای استقرار و تولید موفق سیستم های مختلف حیاتی است (گاریتی و مرکادو، ۱۹۹۴). اولویت‌های حفاظت از خاک و آب، و ترجیحات کشاورز/مالک، انتخاب گونه مناسب را تعیین می‌کند. برخی از عوامل تعیین کننده در انتخاب عبارتند از:

۱. نرخ رشد. درختان منتخب باید به سرعت رشد کنند.

۲. پتانسیل رشد مجدد. توانایی درختان در جوانه زنی مجدد و تکثیر .

۳. مشـــخصـــات برگ و تاج پوشـــش. جهت گیری و تراکم برگ ها نقش عمده ای در رهگیری قطرات باران، فیلتر کردن نور یا کنترل ســایه برای رشــد مناســب محصــول دارد. ســرعت تجزیه برگ عامل دیگری برای بازیافت و تامین مواد مغذی است

. ۴. اســـتقرار. مقاومت در برابر علف های هرز و همچنین توانایی مقاومت در برابر آفات، خشـــکی، غرقابی و نوسانات دما پس از استقرار از ویژگی های ضروری است.

۵. سیستم ریشه. توزیع ریشه برای تثبیت خاک، بازیافت مواد مغذی و به حداقل رساندن شستشوی مواد شیمیایی و دستیابی به نقش "شبکه ایمنی" مهم است. در برخی از اکوسیستم ها، درختان با سیستم ریشه کم عمق برای کاهش آبشویی ترجیح داده می شوند.

۶. موارد استفاده. مهمترین معیار برای انتخاب درختان استفاده پیش بینی شده از مزارع شامل الوار، میوه، علوفه، کود سبز و تولید هیزم است.

سیستم سیلوپاستورال **Silvopastoral System**

سیلوپاستورال یک سیستم بیشه‌زراعی است که درختان و درختچه ها را با عملیات علوفه (مرتع یا یونجه) و دام ادغام می کند و از آن به عنوان آگروفارستری سیلوپاستورال یاد می شود. این یک سیستم چند منظوره است که در آن درختان به طور عمدی و منظم با مرتع و دام ترکیب می شوند تا تولید درخت، علوفه و دام را به طور همزمان افزایش دهند. درختان در ردیف های منفرد یا چندتایی با حیواناتی که در کوچه های عریض بین ردیف ها چرا می کنند کاشته می شوند. هدف از کشت درختان (۱) تولید چوب و (۲) پناهگاه و علوفه برای حیوانات مزرعه است. این سیستم‌ها بازده اقتصادی را از سه منبع (درخت، علوفه و دام) در زمان‌های مختلف فراهم می‌کنند و فرصـــت‌های بازاریابی و نیروی کار متنوعی را ایجاد می‌کنند. ســـیلوپاســـتورال با جنگلداری سنتی متفاوت است زیرا به طور عمدی تأسیس شده و به شدت برای بهینه سازی مزایای سیستم های درختی-علوفه-حیوانی مدیریت می شـود. این سـیسـتم بازیافت مواد مغذی را بهبود می بخشـد، روابط

خاک و آب را بهبود می بخ شد، جذب C را افزایش می دهد، انت شار گازهای گلخانه ای را کاهش می دهد و زیستگاه و حفاظت از حیات وحش را فراهم می کند.

دانشگاه شهید چمران اهواز