دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

تخریب خاک و بازسازی خاک Soil Degradation and Rstoration

۱-۱ مقدمه

خاک یک جسم سه بعدی است که لایه فوقانی پوسته زمین را تشکیل می دهد. این لایه از تمام حیات موجود بر روی زمین پشتیبانی می کند، آب را تصفیه و تمیز می کند، آلاینده ها را از بین می برد و تبادل گازی بین اکوسیستم های آبی-خاکی و جو را تعدیل میکند. خاک اساسی ترین منبع طبیعی و واسطه اصلی تولید مواد غذایی است. علاوه بر منبع مواد خام صنعتی و پایه و اساس سازه های مدنی، همچنین آرشیوی از تاریخ سیارات و مخزن بزرگی از تنوع ژنی و بانک بذر است. اصطلاح منبع خاک به عنوان دارایی ها و خواص سودمند در رابطه با کاربردی که خاک برای آن در نظر گرفته شده تعریف می شود.

مدیریت پایدار خاک بستگی به درک کاملی از ویژگی های آن، فرآیندهای تقویت کننده و تخریب کننده کارکردهای مهم آن در زیستبوم و همچنین تحولاتی است که از طریق تعامل آن با محیط رخ می دهد. ویژگی های مهم خاک شامل موارد زیر است:

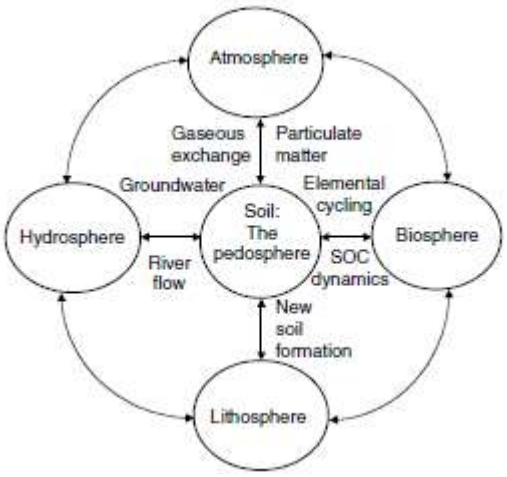
- در مقیاس زمانی عمر انسان از چند دهه تا چند قرن قابل تجدید نیست.
- به طور نابرابری در چشم انداز ها و بین بیوم/ مناطق محلی توزیع شده است.
- نسبت به سو استفاده و سو مدیریت حساس است.

اصطلاح حساس Susceptible زمانی که برای خاک استفاده می شود، به معنی احتمال ایجاد تغییرات نامطلوب در خصوصیات و فرآیندهای خاک است که منجر به کاهش توانایی خاک برای انجام عملکردهای اکوسیستم می شود. پیامدهای این تغییرات نامطلوب در خاک در مجموع تخریب خاک Soil Degradation نامیده می شود. بنابراین، تخریب خاک به معنی تغییرات نامطلوب در خ صو صیات و فرآیندهای آن در طول

Shahid Chamran University

زمان بوده که نتیجه آن کاهش اختلال یا ضعف در یک یا چند کارکرد خاک است. به عبارت دیگر، کاهش کیفیت خاک را تخریب گویند. این تغییرات نامطلوب از طریق ایجاد اختلال در تعادل پویای خاک با محیط (شکل ۱)، توسط عوام طبیعی یا انسانی (انسان) رخ می‌دهند.

خاک در حالت طبیعی با محیط خود در یک تعادل پویا قرار دارد. این ماده به شدت با بیو سفر (زیست کره) تعامل دارد و مملو از میکرو و ماکرولایف (جانداران ریز و درشت) است. فعالیتهای زیستی خصوصیات خاک را تغییر می دهند، و خواص خاک نیز به نوبه خود از شکل(های) حیات سازگار با این تغییرات ایجاد شده پشتیبانی می کند. بدون وجود بخش زنده، خاک از انجام بسیاری از خدمات اکوسیستم باز می ماند. ویژگی های مهمی که از طریق تعامل با زیست کره بوجود می آیند شامل ذخیره کربن آلی خاک (SOC) و پویایی آن، چرخه عناصر غذایی (به عنوان مثال C، N، P) ، مصرف اکسیژن (O2) و تولید گازهای گلخانه ای (GHG) از جمله کربن دی اکسید (CO2) ، متان (CH4) و اکسید نیتروژن (N2O) است.



شکل 1- تعادل پویای خاک با محیط اطراف

تعامل خاک با جو منجر به تبادل گازی می شود. جو خاک حاوی غلظت های بیشتری از چندین گاز کمیاب و گازهای گلخانه ای مانند CO2 و N2O نسبت به جو است. در اکوسیستم های طبیعی (مانند پوشش گیاهی طبیعی، شرایط زهکشی شده و غیره) ، خاک مصرف کننده CH4 است و آن را به CO2 و H2O اکسید می کند. با این وجود تحت اکوسیستم های مدیریت شده (تک کشتی، شرایط کم زهکشی شده)، خاک می تواند تولید کننده CH4 باشد.

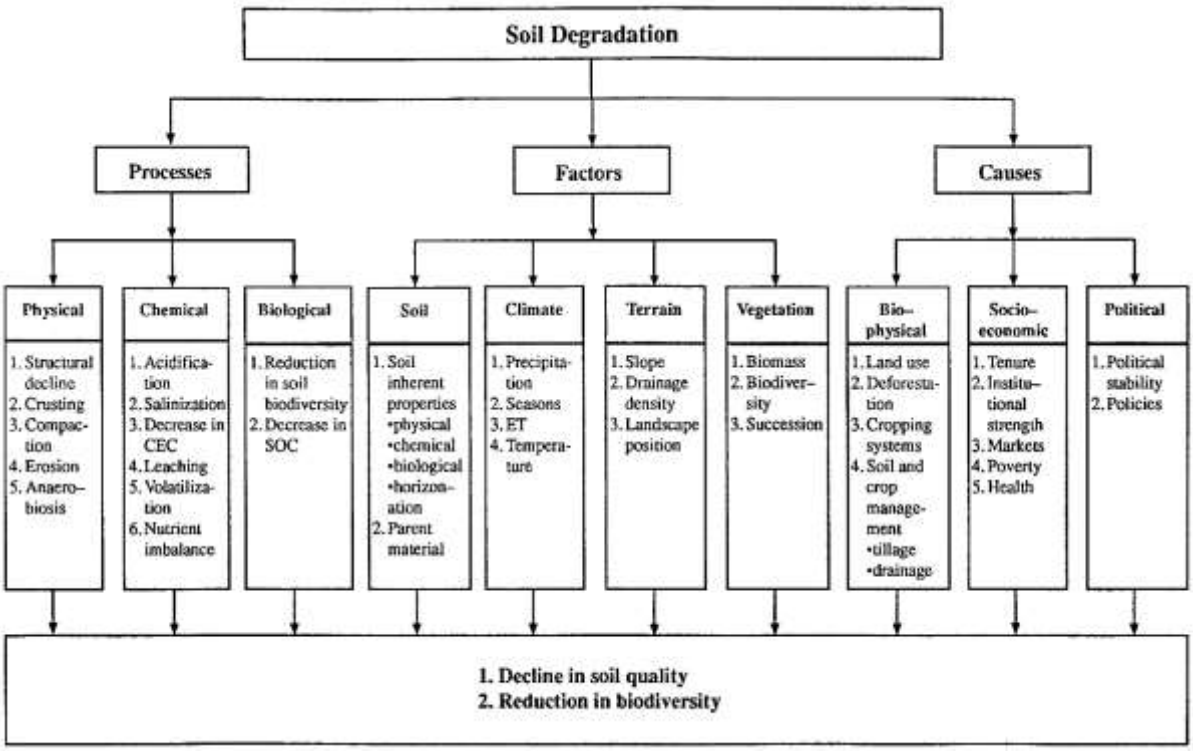
تعامل خاک با هیدروسفر بر کمیت و کیفیت آبهای زیرزمینی کم عمق، سفره های زیرزمینی عمیق، چشمه ها و جریان رودخانه تأثیر می گذارد. خاک مخزن اصلی آب شیرین است که تمام زندگی گیاهان به آن بستگی دارد.

تغییرات لیتوسفر با گذشت زمان منجر به تشکیل خاک جدید و فرسایش زمین شناسی شده که دشت های آبرفتی و رسوبات لسی را بوجود می آورند که جزء حاصلخیزترین خاکها محسوب می شوند.

در حالت طبیعی، خاک قادر است خود را با تغییراتی که در مقیاس زمانی زمین شناسی در محیط رخ می‌دهد سازگار کند. اختلالات طبیعی (به عنوان مثال، تغییر در پوشش گیاهی، یخبندان، تغییر آب و هوا)

اغلب کند بوده، و به خاک فرصت دارد تا شرایط جدید را تنظیم کند و سازگار شود. برخی از اختلالات طبیعی با تغییرات شدید و سریع (به عنوان مثال، فعالیت‌های تکتونیکی، فوران آتشفشان) همراهند. اما در مقابل تغییرات سریع نا شی از دخالت ها و اختلالات انسانی این توانایی را ندارد. فعالیت های انسانی خیلی سریع تعادل حساس و ظریف بین خاک و محیط آن را بر هم می زند و منجر به تغییرات شدیدی در خصوصیات و فرآیندهای خاک می شود. این نوع تخریب یکی از نگرانی های مهم عصر مدرن است.

دلایل (Causes)، عوامل (Factors) و فرایندهای (Process) تخرب خاک به طور خلاصه در شکل زیر نشان داده شده است که در ادامه تشریح شده اند.



جدول 1- انواع تخریب خاک

Type	Degradation Process
Physical	Breakdown of soil structure
	Crusting and surface sealing
	Compaction, surface, and subsoil
	Reduction in water infiltration capacity
	Increase in runoff rate and amount
	Inundation, waterlogging, and anaerobiosis
	Accelerated erosion by water and wind
	Desertification
Chemical	Leaching of bases
	Acidification
	Elemental imbalance with excess of Al, Mn, Fe
	Salinization, alkalinization
	Nutrient depletion
	Contamination, pollution
Biological	Depletion of the soil organic carbon pool
	Decline in soil biodiversity
	Increase in soil-borne pathogens

انواع تخریب خاک

به طور کلی سه نوع فرآیند تخریب خاک - فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی- وجود دارد که در جدول ۱ نشان داده شده است (لال و همکاران ، ۱۹۸۹).

۱-۲-۱ تخریب فیزیکی خاک

تخریب فیزیکی شـــامل اخلال در روابط حجمی-وزنی توده خاک، رابطه هوا با آب، تبادل گازی بین خاک و جو و مقاومت در برابر نیروهای تخریب کننده بادی و آبی اســـت. فرایندهای مخرب فیزیک خاک بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، رئولوژیکی (جریان) و هیدرولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارند. فرآیندهای اصلی تخریب کننده فیزیکی به شرح زیر است:

تخریب ساختمان خاک - کاهش نسبت و مقاومت/پایداری خاکدانه ها

پراکنش (*Slaking*) – منهدم شدم خاکدانه ها هنگام غوطه وری سریع در آب

پوسته ای شدن *Crusting* یا سله بستن سطحی *surface scaling* – تشکیل پوسته نازک در سطح خاک با مقاومت بالا و نفوذ پذیری کم به آب و هوا

تراکم *Densification* – افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک منجر به کاهش تخلخل کل و تخلخل درشت خاک می شود.

بی هوازی *Anaerobiosis* – کاهش تخلخل تهویه ای کمتر از ۱۰٪ حجمی که منجر می شود به کمبود اکسیژن (O2) برای ریشه گیاهان

فرسایش *Erosion* – جدا شدن، پراکنش، انتقال و توزیع مجدد ذرات خاک توسط نیروهای آب (باران ، جریان غلیظ ، جریان ، یخچال های طبیعی) ، باد یا گرانش. فرسایش آب ممکن است به شکل فرسایش ورقه ای، فرسایش شیاری، فرسایش توسط جریانه ای متمرکز یا تغییر شکل زمین در اثر فرسایش شدید خندقی باشد.

بیابان زایی *Desertification* – تخریب خاک (توسط فرسایش تشدیدی آب، باد و سایر فرایندها) در مناطق خشک و نیمه خشک منجر به پیشروی شرایط کویر-مانند می شود

۱-۲-۲ تخریب شیمیایی خاک

تخریب شـــیمیایی به تغییرات نامطلوب در واکنش خاک یا pH، کاهش ذخایر و قابلیت جذب مواد مغذی گیاه، توانایی غیرفعال سازی ترکیبات سمی و کاهش تجمع بیش از حد نمک در منطقه ریشه اشاره دارد. فرآیندهای شیمیایی اصلی به شرح زیر است:

اسیدی شدن *Acidification* – کاهش pH خاک ناشی از شسته شدن بازها یا افزودن کودهای تولید کننده اسید

Shahid Chamran University

تخلیه مواد مغذی *Nutrient depletion* – حذف مواد مغذی ضروری گیاه (به عنوان مثال ، N، P، K، Ca، Mg ، Zn) با برداشت گیاهان یا شستشوی بیش از حد بدون جایگزین کردن آنها از طریق بهبود دهنده های غیر آلی یا آلی

مسمومیت *Toxification* – تجمع بیش از حد برخی از عناصر (به عنوان مثال ، Al، Mn، Fe) تا حدی که برای گیاهان سمی باشد.

شور شدن *Salinization* – تجمع بیش از حد نمک های محلول در منطقه ریشه به گونه ای که هدایت الکتریکی پایه اشباع بیش از ۴ ds / cm باشد

قلیایی (سدیمی) شدن *Alkalinization* – غلظت نمک های سدیم (یون Na) در منطقه ریشه منجر به افزایش نسبت جذب سدیم 15 (SAR) و PH خاک> ۸,۵ می شود

آلودگی های شیمیایی *Pollution/contamination* – اضافه شدن زباله های صنعتی ، معدنی و آلاینده های شهری به خاک

۱-۲-۳ تخریب بیولوژیکی خاک

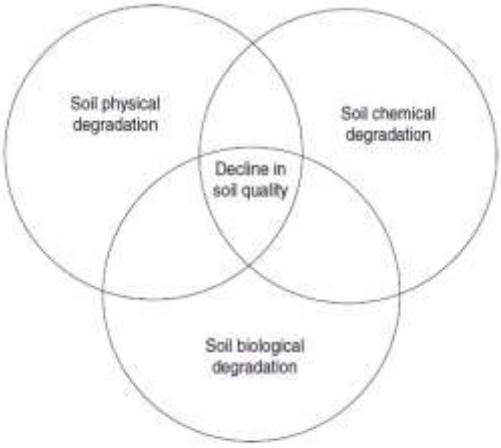
هرگونه تغییرات نامطلوب در فرآیندهای بیولوژیکی خاک که بر کمیت و کیفیت فعالیت SOC ذخیره شده و تنوع گونه ای زیست کره خاک تأثیر بگذارد و عوامل بیماری زای خاک را افزایش دهد، تخریب زیستی در نظر گرفته می‌شود. مهمترین فرایندهای تخریب زیستی خاک عبارتند از:

تخلیه کربن آلی خاک *Soil organic carbon depletion* – کاهش کربن کل و کربن زیست توده میکروبی، تغییر در نرخ بازگشت ذخیره SOC

کاهش تنوع زیستی خاک *Decline in soil biodiversity* – کاهش فعالیت و تنوع گونه ای ارگانیسم های مطلوب (به عنوان مثال، کرم های خاکی) و تغییر در ترکیب گونه ها

Shahid Chamran University

فرآیندهای تخریب فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک با یکدیگر در ارتباط هستند و میتوانند اثرات سوء یکدیگر بر تولید زیست توده و محیط زیست را تشدید کنند (شکل ۲). تخریب خاک علاوه بر کاهش محصولات زراعی، مرتع و بهره‌وری جنگل، می تواند باعث افزایش آلودگی منابع آب و کاهش کیفیت هوا شود.



شکل۲- اثرات متقابل بین فرایندهای تخریب خاک منجر به کاهش کیفیت خاک میشود.

۱-۳ عوامل موثر بر تخریب خاک

عوامل تاثیرگذار بر تخریب خاک شامل محیط های بیوفیزیکی است که نوع (به عنوان مثال، فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی) فرایند تخریب را تعیین می کنند (جدول ۲ ؛ لال ، ۱۹۹۷). عوامل تخریب خاک با عوامل تشکیل خاک جنی مشابه می باشد (جنی ، ۱۹۴۱) (معادله ۱):

$$S_d = f(S, C, T, V, M)_t$$

که S_d تخریب خاک، S خصوصیات خاک، C پارامترهای آب و هوایی است، T پارامترهای زمینی، V پوشش گیاهی، M مدیریت و t زمان است. از عوامل مهم تخریب خاک می توان به موارد زیر اشاره کرد:

خصوصیات خاک: خصوصیات ذاتی خاک که بر نوع تخریب خاک تأثیر می گذارند. این خصوصیات شامل بافت، کانی های رسی، ساختمان، نوع افق سازی و غیره می باشند. ماهیت مواد مادری (نوع سنگ) عامل مهمی در تخریب خاک است.

جدول ۲- عوامل تخریب خاک

Factor	Degradation Process
Soil	Erosion, compaction, crusting, anaerobiosis, nutrient depletion
Parent material	Salinization, alkalinization, nutrient reserve and availability, hard-setting
Climate	Desertification, acidification, leaching, SOC depletion, toxification
Terrain	Anaerobiosis, erosion, SOC depletion, nutrient imbalance
Vegetation	Type and quality of biomass returned to soil, soil biodiversity, nutrient cycling, water and energy balance

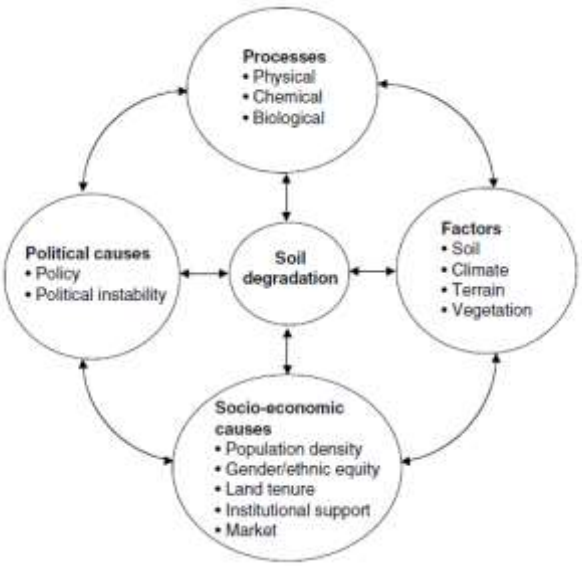
آب و هوا: پارامترهای مهم آب و هوایی که بر نوع تخریب خاک تأثیر می گذارد، بارندگی، دما، فصلی بودن و تبخیر و تعرق است. جهت و سرعت باد بر سرعت و شدت فرسایش باد تأثیر می گذارد، همانطور که میزان بارندگی و شدت آن میزان فرسایش آب را تعیین می کند. آبشویی و اسیدی شدن به میزان بارندگی بستگی دارد.

زمین: پارامترهای مهم زمین که بر نوع تخریب خاک تأثیر می گذارد شامل تندی شیب و طول شیب است. جهت شیب (رو به شمال یا جنوب) دمای خاک، پو شش گیاهی، هوازدگی و رژیم آب و خاک را تعیین می کند. شکل شیب (به عنوان مثال، منظم، محدب، مقعر یا پیچیده) بر میزان فرسایش و رسوب تأثیر می گذارد. زمین همچنین بر تراکم زهکشی و خصوصیات هیدرولوژیکی تأثیر می گذارد.

پوشش گیاهی: پارامترهای مهم پوشش گیاهی که بر نوع تخریب خاک تأثیر می گذارد، شامل درصد پوشش زمین و ارتفاع تاج پو شش که بر فر سایش خاک تاثیر دارند و ترکیب و توارث گونه ها که بر چرخه عنا صر و پویایی SOC و خرداقلیم تأثیر می گذارند.

۱-۴ علل تخریب خاک

تخریب خاک در اصل یک فرایند بیوفیزیکی محسوب می شود اما، علل اقتصادی- اجتماعی و سیاسی میتواند آن را تشدید کند (شکل ۳ ؛ لال ، ۱۹۹۷). دلایل در حالی که نوع تخریب خاک تحت تأثیر عوامل و فرایندهای تخریب خاک قرار دارد، میزان و شدت فرایندهای تخریب توسط علل تخریب خاک تعیین می شود. تخریب خاک ممکن ا ست برای انواعی از فرآیندها اختصاصی باشند (جدول ۳).



شکل۳- تعامل بین عوامل، دلایل و فرایندهای تخریب خاک

علل بیوفیزیکی شامل کاربری و مدیریت زمین، جنگل زدایی، آتش زدن زیست توده، زهکشی و آبیاری، سیستم های زراعی/ کشت، استفاده از کود، روش های خاکورزی، شدت چرای دام، روش های قطع درخت، توسعه شهری، و استخراج است. اینها باعث تراکم، فرسایش، رواناب آب، بی هوازی، کاهش مواد مغذی، کاهش ذخیره SOC و غیره می شوند.

علل اقتصادی-اجتماعی شامل پارامترهای جمعیت شناختی (مانند تراکم جمعیت، تحصیلات، برابری جنسیتی/قومی)، تصرف در زمین، حمایت نهادی و دسترسی به بازار است.

علل سیاسی شامل بی ثباتی سیاسی که دلیل مهمی در تخریب خاک است. در مقابل، مشوق‌های سیاستی قرار دارند که باعث افزایش سرمایه گذاری در خاک می شوند، و میزان و سرعت تخریب خاک را کاهش می دهند.

Table 1.3 Causes of Soil Degradation

Type	Causes
Physical	Deforestation
	Biomass burning
	Denudation
	Tillage up and down the slope
	Excessive animal, human, and vehicular traffic
	Uncontrolled grazing
	Monoculture
Chemical	Excessive irrigation with poor quality water
	Lack of adequate drainage
	No, little, or excessive use of inorganic fertilizers
	Land application of industrial/urban wastes
Biological	Removal and/or burning of residues
	No or little use of biosolids (e.g., manure, mulch)
	Monoculture without growing cover crops in the rotation cycle
	Excessive tillage

پایایی خاک Soil Stability

پایداری یک اکو سیستم نتیجه مهم پایایی آن است. بنابراین، ارزیابی پایداری سیستم‌ها مستلزم تخمین پایایی آنها در هنگام فشار یا به‌هم خوردگی میباشد، پایایی خاک عبارت است از استقامت در برابر تغییرات که نتیجه ترکیبی از ویژگی های فیزیکی-شیمیایی خاک و ویژگی‌های جامعه میکروبی است. ساختار و عملکرد یک اکوسیستم سالم، با گذشت زمان، حتی در صورت بروز اختلال، باید نسبتاً پابرجا باقی بماند و اگر تنش یا اختلال باعث تغییر در اکوسیستم شود، باید بتوانید به سرعت به حالت اول برگردد. پایایی سیستم توانایی ادامه کارکرد در شرایط جدید که ممکن است از طریق فرآیندهای طبیعی یا اختلالات ناشی از انسان رخ دهد را تعیین می کند. پایایی سیستم خاک به طور خاص بر نرخ بازگشت آن و همچنین فرآیندها و خدمات اکوسیستم مرتبط با خاک تأثیر می‌گذارد (واردل و پارکینسون، ۱۹۹۰).

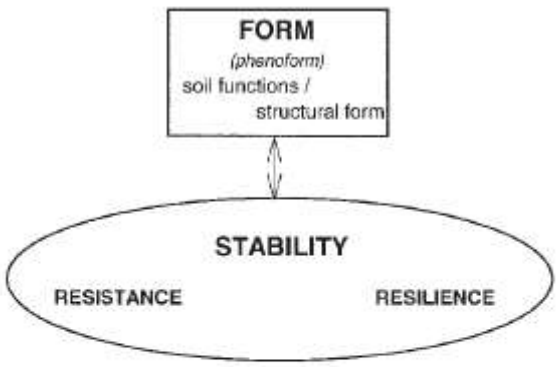


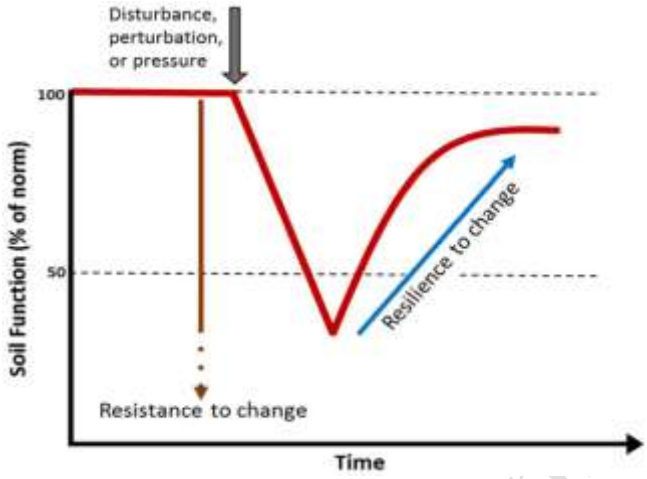
Fig. 1.3. Soil stability in terms of resistance and resilience as related to the suggested term *form* comprising soil functions as well as structural form. A stable form may be due to a high resistance and/or a high resilience. The arrow indicates that a given stability is assigned to a given form, but also that the stability may change with a change in (pheno)form. Based on Kay (1990) and Droogers and Bouma (1997).

پایایی خاک از دو مولفه مقاومت و انعطاف پذیری در برابر تنش تشکیل شده است. مقاومت به مقدار تغییر ناشی از ایجاد اختلال و انعطاف پذیری به سرعت بازگشت سیستم پس از ایجاد اختلال به

سطح قبل از اختلال ا شاره دارد. درک تفاوت بین مقاومت و انعطاف پذیری مهم ا ست. در اکولوژی جمعیت، مقاومت به عنوان "توانایی یک سیستم در برابر جابجایی از حالت تعادل" تعریف شده است، در حالی که انعطاف پذیری به عنوان "ظرفیت یک جمعیت (یا سیستم) برای بازگشت به تعادل پس از جابجایی در پاسخ به یک اختلال" (Swift، 1994).

انعطاف پذیری خاک **Soil Resilience**

انعطاف‌پذیری یک مفهوم اکولوژیکی است که توانایی بازیابی کارکردها و ساختار اولیه را نشان میدهد. انعطاف پذیری همچنین به عنوان اثر برگشت به عقب Bounce-Back یا اسنپ بک Snap-Back Effect شناخته می شود (کوک و جانسون ۲۰۰۲). انعطاف پذیری از دو جنبه یکی در صد بازیابی و دیگری سرعت برگشت یک سیستم به حالت تعادل پس از اختلال قابل ارزیابی ا ست. انعطاف پذیری خاک از نظر سرعت و میزان باز یابی عملکرد خاک با کیفیت خاک ارتباط دارد (Seybold et al. 1999). خاک های انعطاف پذیر از کیفیت خاک بالایی برخوردار هستند و بالعکس (معادله ۴). انعطاف پذیری خاک (Sr) را می‌توان از طریق بیلان جرمی یک یا چند ویژگی مرتبط به هم ارز یابی کرد (لال ، ۱۹۹۳ ؛ ۱۹۹۷) همانطور که در معادله زیر نشان داده شده است:



شکل ۴- مقاومت و انعطاف پذیری خاک در برابر تنش ها

$$S_r = S_a + \int_0^t (S_n - S_d + I_m)dt$$

که در آن Sa شرایط اولیه یا پیشین خاک، Sn نرخ تجدید خاک، Sd نرخ تخریب خاک، Im ورودی مدیریت و t زمان است. ارزیابی Sr با استفاده از معادله فوق اغلب برای یک ویژگی خاص خاک (به عنوان مثال، محتوای SOC، ذخیره مواد مغذی) قابل استفاده است تا برای کل سیستم خاک.

انعطاف پذیری از دیدگاه های مختلف برای اهداف مختلف تعریف شده است (Szabolcs، 1994). یک جنبه مهم مقیاس زمانی است. میزان تشکیل خاک از سنگ مادر در مقایسه با میزان بالقوه از دست دادن خاک در سیستم های کشاورزی ناپایدار بسیار کم است (لال ، ۱۹۹۴ ؛ پناک، ۱۹۹۷). لال (۱۹۹۴) تخمین میزان تشکیل خاک را برای تعدادی از انواع خاک بررسی کرد و نتیجه گرفت که بیشتر خاک ها را می توان به عنوان یک منبع تجدید ناپذیر در طول حیات انسان در نظر گرفت. با این حال، اگر در چارچوب بازه زمانی

زمین شناسی (صدها یا هزاران سال) مورد بررسی قرار گیرد، ممکن است خاکی که تحت فرسایش شدید رودخانه قرار دارد نیز در برابر این اختلال مقاوم باشـــد. بنابراین، هنگام بحث در مورد انعطاف پذیری خاک، باید فاکتور زمان در نظر گرفته شود.

باید تأکید کرد که بیان انعطاف پذیری بدون بیان صـریح عوامل، نیروها یا تأثیرات (آشـفتگی) وارد شـده به خاک معنایی ندارد (Szabolcs، 1994). بلوم (۱۹۹۸) "اختلالات" بالقوه را مورد بحث قرار داد و "نوع" انعطاف پذیری مربوطه را در سـه گروه طبقه بندی کرد: (i) تاب آوری در برابر اختلالات فیزیکی (ii) انعطاف پذیری شیمیایی ؛ و (III) تاب آوری در برابر اختلالات بیولوژیکی.

مقاومت خاک Soil Resistance

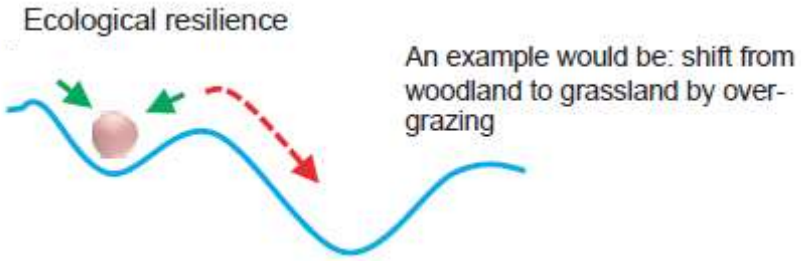
مقاومت خاک که از انعطاف پذیری خاک متمایز می شـــود، به عنوان توانایی یک خاک برای حفظ عملکرد و سـاختار خود با وجود یک اختلال یا تنش تعریف می شـود (Pimm 1984؛ Herrick and Wander 1998؛ Seybold et al. 1999). میزان کاهش در توانایی کارکرد خاک، درجه مقاومت را مشـــخص می کند. هرچه خاکی تحت یک فشار معین کمتر افت کند، مقاومت بیشتری دارد. مقاومت خاک نیز همانند انعطاف‌پذیری با کیفیت خاک در ارتباط است. مقاومت خاک در طی ایجاد یک اختلال یا بلافاصله پس از آن است تابعی از کیفیت خاک اســت، در حالی که پس از ایجاد اختلال، انعطاف پذیری خاک به تابعی از کیفیت خاک تبدیل می شود (Seybold et al. 1999).

یک خاک ممکن است به لحاظ یک ویژگی مشخص مقاومت بالایی داشته باشد اما انعطاف پذیر نباشد. این مورد می‌تواند هنگام تردد ماشین آلات کشاورزی سنگین وزن بر روی یک خاک رسی خشک اتفاق افتد. در این حالت مقاومت خاک در برابر تراکم زیاد است. اما زمانی که تحت فشار زیاد " ساختمان خاک" فرو می ریزد، برگشت آن به حالت اول ضعیف است. بالعکس، یک خاک ممکن است برای برخی از ویژگی ها مقاومت ضعیفی از خود نشان دهد، اما از انعطاف پذیری بالایی برخوردار باشد. برخی از عملکردهای میکروبی هنگام کاربرد سموم دفع آفات، نمونه ای از این موارد را نشان می دهند. سموم دفع آفات ممکن است بیش از ۹۰٪ کارکرد میکروبی خاک را از بین ببرد اما میتواند به سرعت به سطح اصلی خود بازگردد به طوری که می توان اثر اکوتوکسیکولوژیک را در مقایسه با اثرات تنش طبیعی ناچیز دانست (Domsch et al.، 1983).

خاکهایی که از تنوع زیســتی بالاتری برخوردارند مقاومت و انعطاف پذیری ذاتی در برابر تغییر دارند (شـکل ۴). از دســت دادن تنوع زیســتی می تواند منجر به کاهش مقاومت خاک در برابر اختلال و کاهش ظرفیت انعطاف پذیری شود. به طور کلی کاهش تنوع زیستی خاک به کاهش اشکال مختلف زندگی در خاک (هم از نظر کمی و هم از نظر تنوع) اشاره دارد (جونز و همکاران ، ۲۰۰۵). هرجا کاهش تنوع زیستی خاک رخ دهد،

می تواند به طور قابل توجهی بر توانایی عملکرد طبیعی خاک، پاسخ به اختلالات و ظرفیت بازیابی تأثیر بگذارد. مهمترین تهدیدات خاک که اثرات منفی بر تنوع زیستی خاک دارند از جمله بهره برداری فشرده انسان، تغییر کاربری زمین و کاهش مواد آلی خاک ذکر شده است.

اگرچه پایایی سیستم های خاک باید از نظر مقاومت و انعطاف پذیری ارزیابی شود، اما هنگام ارزیابی کیفیت خاک در اکوسیستم های مدیریت شده خاصیت انعطاف پذیری شایسته توجه بیشتری است. از آنجا که هر نوع کشاورزی (ارگانیک، حفاظتی، مرسوم، و غیره) تعادل اصلی اکوسیستم بومی را بر هم می زند، بدیهی است که در هنگام قضاوت درباره پایایی سیستم های کشاورزی، انعطاف پذیری یک پارامتر کلیدی است. از انعطاف پذیری خاک می‌توان برای ارزیابی توانایی مدیریت در حفظ عملکرد خاک و همچنین ارزیابی روش‌های بازیابی خاک‌های تخریب شده استفاده کرد (اسواران ، ۱۹۹۴). سیستم‌های انعطاف پذیر تحت سیستم‌های مدیریتی مختلف سطوح تعادلی مختلفی را نشان می‌دهند (شکل ۵). هر حالت تعادلی ممکن است یکپارچگی ساختاری و عملکردی کیفی سیستم را حفظ کند اما خصوصیات کمی ممکن است در هر تعادل متفاوت باشد. این درک از مفهوم انعطاف‌پذیری هنگام کار با اکوسیستم های مدیریت شده بسیار مهم است. این تفسیر ممکن است بحث برانگیز باشد، اما هنگام کار با اکوسیستم‌های مدیریت شده منطقی است. مدیریت جزیی از سیستم زراعی بوده و انعطاف پذیری باید با تعادل موجود در سیستم مدیریت شده ر ارتباط باشد ، نه با عملکرد یا وضعیتی که در اکوسیستم اصلی و بومی حاکم بوده است (بلوم ، ۱۹۹۸).

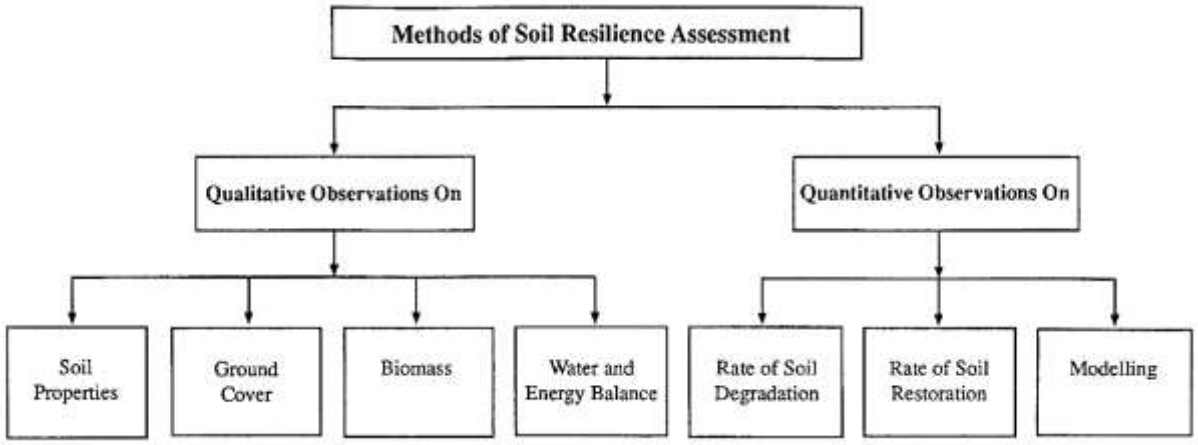


شکل ۵- تغییر نقطه تعادلی یک سیستم پس از یک مدیریت جدید. دامنه ها محدوده پایایی و توپ نشان دهنده سیستم می باشد.

ارزیابی انعطاف پذیری خاک

توسعه روشهای کمی برای تعیین انعطاف پذیری خاک در راستای برنامه‌های کاربردی و عملیاتی بسیار مهم است. رویکردهای مختلفی برای تعیین کمی انعطاف پذیری خاک وجود داردکه به طور خلاصه در شکل زیر نشان داده شده است. به طور کلی دو نوع رویکرد وجود دارد: رویکرد کیفی و کمی.

رویکرد کیفی، مبتنی بر مشاهدات و ارزیابی کیفی وضعیت خاک، وضعیت پوشش گیاهی و وضعیت بیلان آب و انرژی هستند.



در رویکرد کمی، روش‌های مختلفی وجود دارد که به چند مورد اشاره میشود:

الف) ارزیابی نرخ تخریب خاک

میزان تخریب خاک تحت یک تنش اکولوژیکی خاص مانند میزان فرسایش خاک، کاهش SOC، تغییر در خصوصیات شیمیایی و غذایی خاک، محتوای رس و کلوئید و تغییر تخلخل می تواند برای ارزیابی انعطاف پذیری نسبی خاک استفاده شود. همانطور که در معادله زیر نشان داده شده است، انعطاف پذیری خاک از طریق میزان تغییر کیفیت خاک قابل محاسبه است. مقدار منفی معادله به میزان تخریب خاک اشاره دارد.

$$Sr = \frac{SQ}{dt}$$

که در آن Sq کیفیت خاک و t زمان است. انتخاب مقیاس زمانی بسیار مهم است و به عوامل مختلفی بستگی دارد (Lal 1994a).

(ب) ارزیابی میزان احیای خاک

در مقابل تخریب، می توان از میزان بازسازی خاک برای ارزیابی انعطاف پذیری خاک استفاده کرد. به دلیل وجود پدیده هیستر سیس (پسماند) شدید، ممکن است در مسیرهای تخریبی و ترمیمی تفاوت‌هایی وجود داشته باشد. همانطور که در معادله فوق نشان داده شد، سرعت احیای خاک نیز می‌تواند به تغییر در کیفیت خاک در طول زمان مربوط باشد. مقدار مثبت معادله به میزان احیای خاک اشاره دارد.

همچنین توسعه تجربی توابع انتقالی وابسته به زمان در ارزیابی تغییرات مثبت (انعطاف پذیری) یا منفی (تخریب) در کیفیت خاک مفید است.

(ج) مدل سازی

تغییرات زمانی در کیفیت خاک و انعطاف پذیری خاک را میتوان مدل ســـازی کرد. برخی از روشـــهای پیشنهادی شامل موارد زیر است:

(i) نرخ بازسازی خاک

در این مدل، خصوصیات و مدیریت خاک بر میزان انعطاف پذیری خاک تأثیر می گذارد. لال (a۱۹۹۴) مدل زیر را ارائه داد:

$$S_r = S_a + \int_0^t (S_n - S_d + I_m)\, dt,$$

که Sa حالت اولیه یا پیشینی، Sn میزان تجدید خاک، Sd میزان تخریب خاک و Im ورودی مدیریت ا ست. معادله فوق اغلب برای یک خاصیت معین خاک (محتوای SOC، ظرفیت آب موجود، ظرفیت تبادل کاتیونی، تخلخل) کاربرد دارد. برای ارزیابی انعطاف پذیری کل خاک می‌توان خصـوصـیات فردی خاک را در پایان با هم ترکیب کرد.

(ii) قیاس فیزیکی

روزانوف (۱۹۹۴)، با قیاس یک فنر، پیشنهاد کرد که نیروی لازم برای بازگشت فنر به حالت قبل را می توان با نیروی مورد نیاز برای بازگرداندن خاک به سطح قبل از آن برابر دانست (معادله (زیر)).

$$dA/dx = -kx,$$

که در آن A مقدار کار مورد نیاز برای تغییر کیفیت خاک، x متغیر منعکس کننده تغییر خاک و k ضـــریب انعطاف پذیری است که در خاک متفاوت است و ممکن است با کاربری و مدیریت زمین تغییر یابد.

(III) ظرفیت استقامت در برابر تنش

النبرگ (۱۹۷۲) ا ستفاده از مفهوم «ظرفیت بار یا ف شار» آ سیب پذیری سی ستم را پی شنهاد کرد. (معادله (زیر)):

$$\text{stress capacity } (S) = \frac{(100 - D \times L) \times R}{10},$$

Shahid Chamran University

که D وضعیت یا سهولت وارد شدن اثر تنش به یک سیستم، L فاکتور آسیب پذیری، و R میزان ترمیم یا بازسازی است. همه فاکتورها در مقیاس یک تا ده برآورد می شوند. انعطاف پذیری خاک معکوس ظرفیت تنش است (معادله زیر):

$$S_r = (S)^{-1}.$$

(iv) زمان بازگشت مشخصه

زمان بازگشت مشخصه (Tr) زمانی است که ممکن است طول بکشد تا یک سیستم یا یک مولفه از سیستم پس از ایجاد اختلال به تعادل برسد (می و همکاران ۱۹۷۴ ؛ بیدینگتون و همکاران ۱۹۷۶)

$$T_r = 1/r,$$
$$dN/dt = rN(1-N/K).$$

N معیاری از یک جامعه یا جمعیت است، t زمان است و K و r ثابت هستند. عامل 1-N/K "ظرفیت تنظیم کننده" نامیده می شود.

کیفیت خاک و انعطاف پذیری خاک

کیفیت خاک و انعطاف پذیری خاک ویژگی های به هم وابسته اما متفاوتی هستند. کیفیت خاک بیشتر به باروری و سایر عملکردها مربوط است تا به مقاومت خاک به تخریب. کیفیت، باروری و توان تنظیم کنندگی محیط زیستی خاک، بر انعطاف پذیری خاک تأثیر می گذارد. خاک های انعطاف پذیر از کیفیت خاک بالایی برخوردار هستند و بالعکس. با این حال، شاخص های کیفیت و انعطاف پذیری خاک ممکن است برای کارکردهای مختلف (جدول ۴)، و همچنین ممکن است بین خاک ها متفاوت باشد. در رابطه با باروری خاک، شاخص های کیفیت خاک شامل عمق خاک و کارایی استفاده از آب و مواد مغذی است. شاخص های قابل مقایسه انعطاف پذیری خاک در رابطه با باروری پاسخ به نهاده یا مدیریت و میزان تغییر خصوصیات خاک با اقدامات احیایی است.

کیفیت خاک را می توان با توسعه توابع انتقالی مناسب که عملکرد محصول را به خصوصیات خاک مرتبط میسازند ارزیابی کرد. این توابع انتقالی برای هر خاک و گیاهی متفاوت می باشند. در مقابل، آگاهی از انعطاف پذیری خاک و ویژگی های تأثیرگذار بر خروجی برای کنترل تنش یا اختلال با طرح سوالات زیر محقق می‌شود: (ii) میزان سرعت احیای کیفیت خاک چقدر است؟ (iii) آیا می توان کیفیت خاک را به دنبال تنش های پی در پی بازیابی کرد؟ (iv) آیا می توان از طریق توابع انتقالی خاک احیای کیفیت خاک را پیش بینی کرد؟ (v) هزینه ترمیم خاک چقدر است؟

کیفیت و انعطاف پذیری خاک به لحاظ حدود بحرانی و مقادیر آستانه ای ویژگی های اصلی خاک متفاوت هستند. حدود بحرانی به دامنه ای از خصوصیات خاک اشاره دارد که برای حفظ سطح مطلوب عملکرد بالقوه بدون به خطر انداختن باروری از طریق تخریب خاک لازم است. مفهوم حد بحرانی در انعطاف پذیری خاک نیز اعمال می شود: حد آ ستانه خ صو صیات کلیدی خاک برای بازیابی آنها از طریق اقدامات منا سب چقدر است؟ به عنوان مثال، سطح آستانه SOC برای حفظ انعطاف پذیری خاک، احیای تنوع زیستی خاک یا حفظ انعطاف پذیری ساختمانی خاک چقدر است (کی و همکاران ۱۹۹۴) و یا سطح بحرانی و قابل تحمل فرسایش برای حفظ سطح تولید چقدر است.

Table 4. *Indicators of soil quality and soil resilience*

soil function	indicators of soil quality	indicators of soil resilience
1. productivity	(i) soil depth	(i) response to input
2. environment regulation	(ii) water and nutrient use efficiencies	(ii) change in soil properties with restorative measures
3. urban use	(iii) soil erosivity	(iii) buffering capacity
4. industrial use	(iv) SOC content	(iv) SOC accretion rate, high surface area and charge density
	(v) swell–shrink capacity for strong foundation	(v) horizonation, uniformly deep profile with high productivity of subsoil, e.g. brick making, road construction
	(vi) texture to facilitate waste disposal	(vi) bioremediation, elemental transformations

نتیجه گیری

تخریب خاک از طلوع تمدن، بشریت را به چالش کشیده است، اما از دهه ۱۹۳۰ به بعد مسئله مهمی شده است. تخریب خاک و پیامدهای زیست محیطی آن همچنان مسئله مهمی در طول قرن ۲۱ باقی مانده است. به شکل ساده به عنوان کاهش کیفیت خاک ناشی از سو استفاده توسط انسان تعریف می شود. در حالی که عوامل طبیعی ممکن است باعث ایجاد یا حتی تشدید روند شوند، تخریب خاک عمدتا به مواردی اشاره دارد که صریحاً از اعمال انسان ناشی می شوند. سه نوع اصلی از فرایندهای تخریب کننده خاک وجود دارد: فیزیکی ، شیمیایی و بیولوژیکی. با هم، اثرات متقابل این سه فرآیند با گذ شت زمان منجر به کاهش کیفیت خاک می شود. تخریب خاک ممکن است موقتی باشد و از طریق تغییر در کاربری و مدیریت زمین معکوس شود، یا ممکن ا ست دائمی یا غیرقابل برگ شت با شد. با تغییر در کاربری و مدیریت زمین می توان کیفیت خاکهای تخریب شده به مقدار کم یا متو سط را بازیابی کرد. توانایی خاک برای احیا یا بازیابی کیفیت آن، از لحاظ تولید زیست توده و ظرفیت تعدیل محیط، "انعطاف پذیری خاک" نامیده می شود.

Shahid Chamran University