Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Soil Quality Monitoring: An Undeniable Necessity

Saeed Saadat[a*], Leila Esmaeelnejad[a], Hamed Rezaei[a], and Maliheh Madanian[b]

[a] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

[b] Department of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran.

Article Info

Article Type
Review Article

Received
September 28, 2025
Revised
December 15, 2025
Accepted
December 15, 2025
Published online
March 16, 2026

Keywords
Soil Pollution,
Soil Degradation,
Soil Health,
Evaluation Models,
Soil Properties

***Corresponding author's email**
saeed_saadat@yahoo.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil integrity is facing serious challenges worldwide due to multiple pollution sources, including industrial effluents, municipal and domestic waste, agricultural chemicals, and pathogenic organisms. According to the Food and Agriculture Organization (FAO), roughly one-third of the global soil resource is affected by varying degrees of degradation, with annual economic losses estimated to exceed €50 billion. To safeguard soil functions, continuous and systematic monitoring of soil properties is essential. Despite growing awareness of its importance, a consolidated review of global soil monitoring experiences has been lacking. This study addresses this gap through a structured literature review.

Methodology: This research used databases such as Science Direct and Scopus. The review is divided into two main sections: the first discusses the advantages and necessity of soil monitoring networks, and the second examines the experiences of several countries, including Europe, China, Canada, Japan, New Zealand, Latin America, and Iran.

Results: Many countries have established soil monitoring programs; however, considerable differences exist in the approaches used. These include observation density, frequency of sampling, sampling depths, measured parameters, and analytical techniques. Such diversity complicates comparisons across regions and highlights the need for harmonized protocols. In China, the initial nationwide agricultural soil survey in 1958 aimed to evaluate soil fertility and guide crop production using 13 chemical and physical parameters. A subsequent survey in 1979 expanded the analysis to include nutrient status, trace elements, and chemical composition, resulting in detailed provincial soil maps. Presently, China operates 107 national and provincial monitoring sites. Canada launched soil monitoring and the selection of benchmark sites in 1989. Sites were chosen to represent major soil zones or agro-ecological regions, typical physiographic units, and dominant agricultural production systems. Soil parameters were classified based on sensitivity and systematically measured at each site. Japan initiated a nationwide soil identification and performance monitoring program in 1999 across 5,500 sites. In 2008, a national program for monitoring soil carbon content and management practices added approximately 3,500 sites to the network. New Zealand implemented two soil quality monitoring initiatives between 1995 and 2001 to evaluate methodologies and provide data for sustainable land use reporting. Over 500 sites were assessed using seven core indicators encompassing physical, chemical, and biological soil properties. Iran's soil monitoring program began in 2011 in three phases, covering 18.5 million hectares across 3,278 sites. Sampling depths were 0–30 and 30–60 cm for croplands and 0–30, 30–60, and 60–90 cm for orchards. The second phase focused on approximately 10% of sites as reference locations for detailed biological, chemical, and physical measurements. By 2025, the third phase will cover all provinces and monitoring sites nationwide.

Conclusion: Comparative evaluation of national soil monitoring programs demonstrates that, despite their widespread implementation, these initiatives continue to face notable constraints, including technical challenges, incomplete soil datasets, and limited continuity in financial support. Variability in selected indicators and monitoring strategies reflects differences in environmental conditions, land management practices, and institutional capacities among countries. While such heterogeneity is context-dependent, it restricts data interoperability and limits the potential for broader regional and global assessments. The findings emphasize the necessity of developing an integrated and flexible framework that allows for methodological harmonization while accommodating local ecological and managerial conditions. Establishing consistent criteria for indicator selection, sampling design, and analytical procedures would enhance data comparability and strengthen long-term soil assessments. Existing monitoring infrastructures provide a valuable foundation for advancing sustainable land management; however, their effectiveness depends on systematic coordination and long-term commitment. Overall, sustained and well-designed soil monitoring systems are critical for tracking changes in soil condition, supporting adaptive management strategies, and informing policy decisions. Strengthening collaboration among monitoring networks and adopting standardized yet adaptable methodologies can significantly improve the reliability of soil information, thereby contributing to soil conservation efforts, agricultural sustainability, and broader environmental objectives.

Cite this article: Saadat, S., Esmaeilnejad, L., Rezaei, H., Madanian, M., 2026. Soil Quality Monitoring: An Undeniable Necessity. Review Article, *Journal of Soil Research, 39 (4)*, pp 383-399.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijsr.2025.370748.793
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

پایش کیفیت خاک، ضرورتی انکارناپذیر

سعید سعادت[1*]، لیلا اسماعیل‌نژاد[1]، حامد رضایی[1] و ملیحه مدنیان[2]

[1] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[2] مرکز تحقیقات کشاورزی و آموزش منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

واژه‌های کلیدی

آلودگی خاک،
تخریب خاک،
سلامت خاک،
مدل‌های ارزیابی،
ویژگی‌های خاک

***ایمیل نویسنده مسئول**

saeed_saadat@yahoo.com

چکیده

خاک نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌نماید. آلودگی و تخریب خاک از بزرگترین تهدیدها برای سلامت محیط زیست و انسان در دهه‌های آینده خواهد بود. از این رو، برای تضمین سلامت خاک و نیز برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، نیاز مبرم به پایش ویژگی‌های خاک وجود دارد. پایش خاک می‌تواند ابزاری مناسب برای بررسی توانایی و وضعیت خاک و نیز تغییرات آن با گذشت زمان باشد. افزون بر این، پایش خاک با ارائه نقشه‌ها و آماره‌ها، یکی از بهترین ابزارها برای دانستن تغییرات و محدودیت‌های مربوط به خاک است که می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان و سیاستمداران باشد و در مورد عواقب و اثرات تخریب خاک هشدار دهد. پایش خاک به متولیان خاک و نیز کشاورزان کمک می‌کند تا تصمیم‌های بهتری برای انتخاب محصول، کوددهی، آبیاری و مدیریت تولید اتخاذ کنند. در بخش اول این مقاله، با مرور فواید پایش خاک از جمله جلوگیری از تخریب و آلودگی خاک، حفظ کیفیت خاک و دستیابی به اهداف توسعه پایدار، بر لزوم وجود شبکه‌های پایش خاک تأکید شده و در بخش دوم به تشریح تجربه کشورهای مختلف از جمله ایران، اروپا، چین، کانادا، آمریکای لاتین، ژاپن و نیوزیلند در زمینه پایش خاک پرداخته شده است.

استناد: سعادت، س.، اسماعیل‌نژاد، ل.، رضایی، ح.، مدنیان، م.، ۱۴۰۴. پایش کیفیت خاک، ضرورتی انکارناپذیر. مقاله مروری، *نشریه پژوهش‌های خاک*، *(۴)* ۳۹، ص ۳۹۹-۳۸۳.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijsr.2025.370748.793

CC BY NC

مقدمه

خاک از طریق تعاملات پیچیده با هوا، آب و موجودات زنده، نقشی حیاتی در زیست‌بوم ایفا می‌کند که شامل ذخیره آب و مواد مغذی، کمک به تنوع زیستی، تأمین آنتی‌بیوتیک‌های مورد استفاده برای مبارزه با بیماری‌ها، بهبود تاب‌آوری در برابر سیل و خشکسالی و محافظت از سیاره زمین در برابر تغییرات اقلیمی، می‌شود (Bünemann et al., 2018). آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده، ارتقای سلامت خاک را با توجه به چرخه مواد مغذی، نفوذ آب، زیست‌پالایی، حذف آلودگی و ترسیب کربن در اولویت قرار داده است (FRRCC Report, 2015). سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو[1]) نیز بر اهمیت سلامت خاک برای حفظ جامعه‌ای متنوع از موجودات خاک، کنترل بیماری‌های گیاهی، حشرات و علف‌های هرز و در نهایت بهبود تولید محصولات کشاورزی تأکید می‌کند (Bristol Food Network Website, 2022). تعریف سلامت خاک عبارت است از: وضعیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، که ظرفیت آن را برای عملکرد به‌عنوان یک سیستم حیاتی زنده و ارائه خدمات اکوسیستم تعیین می‌کند (Panagos et al., 2025a).

سلامت خاک در سطح جهانی توسط منابع آلودگی متعدد از جمله مواد شیمیایی صنعتی، پسماندهای خانگی و شهری، مواد شیمیایی کشاورزی، داروها، عوامل بیماری‌زا و محصولات مشتق شده از نفت به خطر افتاده است (Lehmann et al., 2020). این آلاینده‌ها یا به طور تصادفی (مانند نشت نفت و یا شسته شدن از محل‌های دفن زباله) (Dumitran & Onutu, 2010) یا از روی عمد (مانند استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها) (Prashar & Shah, 2016)، آبیاری با پساب تصفیه نشده (Dalkmann et al., 2014) و کاربرد بیوسالیدها[2] (Sepulvado et al., 2011) در محیط‌زیست آزاد می‌شوند. برای تضمین سلامت خاک، نیاز مبرم به پایش ویژگی‌های خاک وجود دارد. پایش خاک عبارت است از بررسی سیستماتیک تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک (GSP[3] & FAO, 2014). هدف از پایش خاک در چارچوب استراتژی خاک اتحادیه اروپا برای سال ۲۰۳۰، شناسایی خاک‌های سالم و ناسالم (تخریب‌شده) است تا میزان دستیابی به هدف خاک‌های سالم تا سال ۲۰۵۰، قابل‌اندازه‌گیری باشد. از این رو، پایش، موفقیت در توقف تخریب خاک ناشی از مدیریت ناپایدار (و تغییرات اقلیمی) و نیز موفقیت در اقدامات بازسازی‌کننده (مدیریت پایدار خاک) را بررسی می‌کند (EEA[4], 2023).

منابع خاک جهان در معرض بهره‌برداری بیش از حد قرار دارند که با فشارهای محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی و رویدادهای شدید آب و هوایی که به طور فزاینده‌ای تکرار می‌شوند، تشدید می‌شود (Eugenio et al., 2020). تخریب خاک چالشی است که پیامدهایی فراتر از مرزهای ملی دارد و می‌تواند بر ارائه خدمات اکوسیستمی در سایر کشورها نیز تأثیر بگذارد. تخریب خاک گاهی اوقات به عنوان یک مسئله محلی تلقی شده و اثرات فرامرزی آن دست کم گرفته می‌شود. از این رو، ضروری است که اقدامات مؤثری برای مقابله با تخریب خاک در همه کشورها انجام شود. شایان ذکر است که خاک‌های معدنی زیر کشتزارها سالانه حدود ۷/۴ میلیون تن کربن از دست می‌دهند (De Rosa et al., 2024)، در حالی که زهکشی پیت‌زارها در اروپا به تنهایی حدود ۵ درصد از تمامی انتشار گازهای گلخانه‌ای اتحادیه اروپا را به خود اختصاص می‌دهد (Tanneberger et al., 2022).

برخی از شیوه‌های مدیریتی، مانند کشاورزی فشرده، مدیریت ناپایدار جنگل‌ها و زهکشی زمین‌های باتلاقی ممکن است بر تخریب خاک تأثیر بگذارند و منجر به از بین رفتن مواد آلی، اسیدی شدن، شور شدن و فرسایش خاک شوند. این امر به نوبه خود، ممکن است آسیب‌پذیری خاک‌ها در سراسر مرزها را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، سیل‌های ناشی از رویدادهای شدید آب و هوایی مانند رویدادهای سال ۲۰۲۴ در والنسیا (اسپانیا) و امیلیا رومانیا (ایتالیا) و سیل سال ۲۰۲۳ در تسالی (یونان) می‌توانند کل یک منطقه با تخریب بالای خاک را در معرض بلایای طبیعی قرار دهند (Saco et al., 2021). از این رو، ارزیابی نقش خاک‌ها به عنوان یک جزء کلیدی اکوسیستم، برای تنظیم خطرات بحرانی مانند سیل، خشکسالی، رانش زمین و طوفان‌های گرد و غبار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Smith et al., 2013).

با توجه به اهمیت و ضرورت پایش خاک، این پژوهش با مرور مطالعات مربوطه در دو بخش انجام شد. در بخش اول این مقاله، با مرور فواید پایش خاک از جمله جلوگیری از تخریب و آلودگی خاک، حفظ کیفیت خاک و دستیابی به اهداف توسعه پایدار، بر لزوم وجود شبکه‌های پایش خاک تأکید شده و در بخش دوم به تشریح تجربه کشورهای مختلف از جمله ایران، اروپا، چین، کانادا، آمریکای لاتین، ژاپن و نیوزیلند در زمینه پایش خاک پرداخته شده است.

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
2. Biosoilds
3. Global Soil Partnership (GSP)
4. European Environment Agency (EEA)

هزینه‌های تخریب خاک

برآوردهای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) نشان می‌دهد حدود یک سوم خاک‌های جهان دچار تخریب هستند و هزینه‌های سالانه آن بیش از ۵۰ میلیارد یورو برآورد شده است (Eugenio et al., 2020; European Commission, 2023) این رقم بر اساس تخمین‌های انجام‌شده در سال ۲۰۰۶[5]، سالانه حدود ۳۸ میلیارد یورو بوده است (European Commission, 2006).

فرسایش خاک دارای اثرات در محل[6] (کاهش بهره‌وری، کاهش عملکرد و مواد مغذی، از بین رفتن گیاهان و تنوع زیستی) و خارج از محل[7] (رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، تخریب زیرساخت‌ها و از دست رفتن تنوع زیستی) است. در اتحادیه اروپا، فرسایش شدید، ۱۲ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده و حدود ۱/۲۵ میلیارد یورو سالانه خسارت ایجاد می‌کند(Panagos et al., 2018). در مقیاس جهانی، فرسایش ۷۵ میلیارد تن خاک خساراتی بالغ بر ۴۰۰ میلیارد دلار ایجاد می‌کند و در ایران این رقم حدود ۱۰/۷ میلیارد دلار است (Soleimani & Cheraghi, 2024). در ایران مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است نتایج حاصل از مطالعه Mousavi و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که سه نوع کارکرد حفظ حاصلخیزی، کنترل رسوبات و کاهش میزان از دست رفتن اراضی در مراتع نیمه‌استپی حوزه آبخیز طالقان به عنوان مهمترین کارکردهای اکوسیستمی در منطقه مورد مطالعه هستند که ارزش کل حفاظت خاک برابر ۴۱۵/۲۵ میلیون ریال در سال برآورد شده است (Mousavi et al., 2011). همچنین نتایج حاصل از بررسی خدمات اکوسیستم بخش شمالی منطقه حفاظت شده البرز مرکزی شامل کارکرد حفاظت آب و خاک نشان داد که میزان کل ارزش کارکرد حفاظت آب در اکوسیستم منطقه، ۴۰۰۷۶۸۸ تومان به ازای هر هکتار برآورد شد که کارکرد مقدار ذخیره آب با مقدار ۳۲۴۴۷۲۲ تومان، بالاترین ارزش را در بین سایر خدمات داشته است. همچنین دیگر نتایج تحقیق در مورد حفاظت خاک نشان داد، ارزش اقتصادی این کارکرد به وسیله هر هکتار از اکوسیستم منطقه برابر ۶۰۳۰۶/۵ تومان در سال برآورده شده، به گونه‌ای که در این کارکرد نیز، جلوگیری از افزایش رسوب و گل و لای، بیشترین ارزش را در بین جنبه‌های دیگر داشته است (Asaadi & Najafi Alamdarlo, 2023).

انتشار سالانه N_2O خاک معادل ۱۰۳ مگاتن CO_2 (۲۴۷ کیلوتن نیتروژن) تخمین زده شده و با قیمت ۱۰۰–۶۰ یورو به ازای هر تن، هزینه‌ای بین ۶ تا ۱۰ میلیارد یورو ایجاد می‌کند. همچنین تلفات نیتروژن ناشی از فرسایش و آبشویی به ۴۴۰۰ کیلوتن می‌رسد که با قیمت کود نیتروژنی حدود ۴/۱ میلیارد یورو ارزش دارد (Panagos et al., 2025b). شوری خاک عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد و با آبیاری و تغییر اقلیم در مناطق نیمه‌خشک شدت می‌یابد؛ هزینه این پدیده در اتحادیه اروپا ۱/۵–۰/۵ میلیارد یورو و در ایالات متحده ۰/۳–۰/۱ میلیارد یورو است (Zörb et al., 2019; Mondal et al., 2023; Stavi et al., 2021). فعالیت‌های انسانی خاک را به آلاینده‌های شیمیایی و فلزی آلوده کرده و مدیریت مکان‌های آلوده در اتحادیه اروپا ۵/۵–۴/۵ میلیارد یورو در سال هزینه دارد؛ که در نتیجه برای پاکسازی ۳۰۰۰ مکان آلوده ۳–۰/۳ میلیارد یورو سالانه لازم است (Eugenio et al., 2020; Panagos et al., 2013; Wilson et al., 2004; EEA et al., 2013). به‌طور کلی، مجموع هزینه سالانه تخریب خاک در اتحادیه اروپا ۱۴۰–۸۰ میلیارد یورو برآورد شده است (Panagos et al., 2025b). از این رو، با توجه به هزینه‌های سنگین ناشی از تخریب خاک، پایش مداوم ویژگی‌های خاک می‌تواند گامی بسیار مؤثر به منظور حفظ ویژگی‌ها و کارکردهای خاک (به‌عنوان یکی از ارکان مهم اکوسیستم)، آگاه‌سازی به موقع از روند تغییرات منفی و نیز اتخاذ تصمیمات بهینه در سریعترین زمان ممکن باشد. در این رابطه، اجرای یک سیستم قوی برای پایش خاک ضرورت دارد. با پایش مداوم تغییرات و ارزیابی نتایج، مدیریت منابع به صورت مؤثری انجام شده و در نهایت هزینه‌های مرتبط با تخریب خاک کاهش یافته و باعث تقویت و پایداری بلندمدت آن خواهد شد (Eugenio et al., 2020).

ضرورت پایش خاک

کیفیت خاک، پایه تولید پایدار محصولات کشاورزی است و پایش آن برای شناخت وضعیت و مدیریت بهینه ضروری است. پایش منظم خاک به کشاورزان کمک می‌کند تا درباره انتخاب محصول، کوددهی و آبیاری تصمیمات دقیق‌تری بگیرند (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Shah & Wu, 2019). همچنین کمبود یا عدم تعادل مواد مغذی را شناسایی می‌کند (Jones et al., 2013; Hirte et al., 2021; Muntwyler et al., 2024) و امکان شناسایی و پیشگیری از تخریب خاک مانند فرسایش، آلودگی، کاهش تنوع زیستی و اختلال در چرخه کربن و مواد مغذی را فراهم می‌آورد و نقش مهمی در کاهش پیامدهای بلایایی مانند سیل، خشکسالی و رانش زمین دارد (Panagos et al., 2025b). برنامه‌های پایش مناسب می‌توانند تغییرات زمانی ویژگی‌های خاک را نشان دهند و

5. 2006 Soil Thematic Strategy
6. On-site effects
7. Off-site effects

مشخص کنند که کیفیت خاک در اثر مدیریت‌های مختلف بهبود یافته یا رو به وخامت است (Jones et al., 2005). پایش مداوم، به ویژه در مقیاس وسیع، مبنایی برای ارزیابی قابلیت و وضعیت خاک فراهم می‌کند و امکان تشخیص تغییرات شدید آن را نیز ارائه می‌دهد. سنجش از دور ابزار مفیدی است، اما تنها بخشی از عملکردهای خاک را پوشش می‌دهد؛ در مقابل، نقشه‌های پایشی می‌توانند آگاهی‌بخشی درباره سرعت و پیامدهای تخریب خاک را تقویت کنند (Arrouays et al., 2021).

تحقق اهداف توسعه پایدار نیازمند پایش ویژگی‌هایی مانند خصوصیات هیدرولیکی، وضعیت مواد مغذی، آلودگی، تنوع زیستی و کربن آلی خاک است. اهداف ۲، ۳، ۶، ۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مستقیماً به خدمات اکوسیستمی وابسته به خاک مرتبط هستند؛ از جمله امنیت غذایی (اهداف ۲ و ۶)، سلامت (هدف ۳)، آلودگی خشکی به دریاها (هدف ۱۴)، توسعه شهری (هدف ۱۱) و حفاظت از اکوسیستم‌های زمینی (هدف ۱۵). هدف ۱۵/۳ نیز بر بی‌طرفی در برابر تخریب زمین و احیای خاک‌های آسیب‌دیده تا سال ۲۰۳۰ تأکید دارد و هدف ۱۳ بر نقش خاک در کاهش و سازگاری با تغییرات اقلیمی متمرکز است (Keesstra et al., 2016). بهره‌وری خاک، شاخصی کلیدی در چندین هدف توسعه پایدار (اهداف ۲/۳ و ۲/۴)، اساساً به حاصلخیزی خاک و شرایط اقلیمی وابسته است و کاهش آن بخشی از تخریب زمین محسوب می‌شود (UNCCD, 1994). ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (نگهداری و نفوذ آب)، چرخه مواد مغذی، ویژگی‌های عمودی خاک و توپوگرافی از شاخص‌های اصلی بهره‌وری هستند. بافت خاک مهم‌ترین ویژگی فیزیکی است، اما به دلیل پایداری نسبی آن، پایش معمولاً بر ویژگی‌های متغیر مانند کربن آلی، چگالی ظاهری و شوری تمرکز دارد. کربن آلی نقش مهمی در وضعیت آب، مواد مغذی و تنظیم اقلیم دارد. آلودگی و تنوع زیستی خاک نیز باید به عنوان اجزای مستقل کیفیت خاک پایش شوند. پایش این مؤلفه‌ها امکان پیگیری بسیاری از اهداف توسعه پایدار را فراهم می‌کند (Tóth et al., 2018).

شبکه پایش خاک[8]

دستیابی به یک چارچوب قانونی الزام‌آور برای حفاظت از خاک در سطح ملی، در وهله اول به اجرای یک شبکه پایش خاک متکی است که قادر به تشخیص تغییرات کیفیت خاک در طول زمان باشد. پایش منابع خاک باید برای تسهیل مدیریت مؤثر خاک و پشتیبانی از انجام عملکردهای متعدد آن اجرا شود. شبکه پایش خاک، مجموعه‌ای از مکان‌ها یا مناطقی است که این ارزیابی دوره‌ای در آنها انجام و مستند می‌شود (Morvan et al., 2008). پایش خاک با چالش‌هایی مانند ارزیابی مناطق بزرگ و اینکه کدام ویژگی‌های خاک باید اندازه‌گیری شوند و با وجود عوامل کنترل‌کننده متعدد با مقیاس‌ها و منشأهای مختلف، چگونه این کار انجام گیرد، روبرو است (Arrouays et al., 2012).

شبکه پایش خاک بر داده‌های کمی متمرکز است که می‌توانند به راحتی با شناسایی تغییرات در طول زمان، اندازه‌گیری شوند. به طور کلی، هنگام طراحی یک شبکه پایش خاک، برخی از ملاحظات کلیدی شامل پوشش و مقیاس جغرافیایی، روش نمونه‌برداری و متغیرهای مورد اندازه‌گیری باید مدنظر قرار گیرد. در مقیاس ملی، ابتدا باید مجموعه داده‌های موجود بررسی شوند و چون ذینفعان برای جمع‌آوری اطلاعات خاک هزینه‌ای پرداخت نمی‌کنند، در نتیجه گزینه‌های سرمایه‌گذاری برای پایش خاک کاهش می‌یابد (FAO & ITPS, 2015). از این رو، یک شبکه پایش خاک باید تعادلی بین هزینه و دقت تخمین‌ها ایجاد نماید. ایجاد شبکه‌های پایش خاک ممکن است چندین هدف داشته باشد:

۱) تعیین ویژگی‌های فعلی خاک‌ها که می‌تواند به‌عنوان ارزیابی اولیه وضعیت خاک در نظر گرفته شوند،

۲) تعیین طولانی‌مدت و یا زودهنگام تغییر در ویژگی‌های خاک‌ها به عنوان نتیجه عوامل مکان ویژه طی بررسی‌های دوره‌ای،

۳) ارزیابی حساسیت خاک‌ها به تغییرات و پیش‌بینی توسعه آینده آنها،

۴) توسعه و اعتبارسنجی مدل‌هایی برای شبیه‌سازی پاسخ‌های اکوسیستم و استفاده از آنها برای تخمین پاسخ‌ها به تغییرات و تنش‌های واقعی یا پیش‌بینی‌شده و انجام ارزیابی‌های منطقه‌ای هماهنگ با داده‌های نظرسنجی،

۵) ایجاد مکان‌های مرجع برای واسنجی اندازه‌گیری‌ها؛ و

۶) جمع‌آوری اطلاعات در مورد روند تغییرات خاک برای آگاهی بخشی در مورد سیاست‌های ملی آینده برای حفاظت از خاک (Arrouays et al., 1998).

شاخص‌های پایش خاک

تدوین سیاست‌های ملی و بین‌المللی در مورد کیفیت خاک نیازمند داده‌هایی در مورد وضعیت فعلی است تا با ایجاد یک خط مبنا بتوان سیاست‌های جدید را اعمال کرد. اجرای این سیاست‌ها به نوبه خود نیازمند پایش با استفاده از شاخص‌های از پیش تعریف شده، برای شناسایی بهبود یا تخریب خاک است (Turbé et al., 2010). در سال ۲۰۰۱، سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[9] مجموعه‌ای از معیارها را برای شاخص‌های تنوع زیستی کشاورزی وضع کرد. این شاخص‌ها باید قابل اندازه‌گیری، مبتنی

8. Soil Monitoring Network (SMN)

9. Organization for Economic Co- Operation Development (OECD)

بر علم صحیح، قابل تفسیر توسط سیاست‌گذاران و قابل استفاده برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری باشد. همچنین باید امکان پایش در مقیاس‌های مکانی و زمانی متعدد را فراهم کنند (OECD, 2002). با این حال، پایش خاک در مقیاس بزرگ، به منظور به دست آوردن داده‌های کافی برای نتیجه‌گیری دقیق، هم از نظر نیروی کار و هم از نظر سرمایه مورد نیاز پرهزینه است. از این رو، انتخاب بهترین گروه از شاخص‌ها برای کاهش هزینه‌ها و ارائه داده‌هایی که برای هدف مناسب باشند و بتوانند سیاست‌گذاری و اجرای سیاست‌ها را در رابطه با کیفیت خاک در آینده ممکن سازند، مهم است. نیل به این هدف کار آسانی نیست. به‌عنوان مثال، پروژه ENVASSO که برای ایجاد مجموعه‌ای عملیاتی از معیارها و شاخص‌های پایش خاک در سراسر اتحادیه اروپا فعالیت می‌کرد، به‌دلیل پیچیدگی زیست‌بوم و عملکردهای خاک، دستیابی به مجموعه‌ای کوچک از شاخص‌ها را دشوار یافت (Bispo et al., 2009). شاخص‌های مختلف پایش خاک از کشوری به کشور دیگر متفاوت است (Faber et al., 2013). لذا برای انتخاب شاخص‌های پایش خاک، ویژگی‌هایی نظیر قابلیت اندازه‌گیری، سهولت اندازه‌گیری، تغییرات کمی و کیفی، هزینه اندازه‌گیری و نیز پویایی آن می‌تواند مد نظر قرار گیرد.

وضعیت مطالعات پایش کیفیت خاک در جهان

برخی کشورها از پیش برنامه‌هایی را برای پایش خاک آغاز کرده‌اند، اما هر کشور از پروتکل‌های متفاوت (مانند تراکم مشاهدات یا تناوب زمانی) و ویژگی‌های خاصی (مانند عمق نمونه‌برداری، پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، روش‌های مشاهده و تحلیل) استفاده می‌کند که این تفاوت‌ها، مقایسه میان کشورها را دشوار می‌سازد و هماهنگی و یکسان‌سازی این پروتکل‌ها ضرورت دارد (FAO, 2024). در ادامه چند نمونه از مطالعات پایش در کشورهای مختلف آورده شده است.

اروپا

در کشورهای اروپایی، پایش خاک معمولاً توسط چندین سازمان مختلف انجام می‌شود، زیرا اهداف پایش متنوع است؛ از جمله سلامت جنگل‌ها، آلودگی زمین، حاصلخیزی کشاورزی، ارزیابی ریسک محیط‌زیستی، اثرات باران اسیدی و تخریب زمین؛ بنابراین، ضروری است که برنامه‌های پایش به سیستم‌های ملی اطلاعات خاک متصل شوند تا نتایج به‌تدریج در آن‌ها گنجانده شده و با داده‌های اکولوژیکی، کاربری اراضی، اقلیمی، کاداستر و جمعیت‌شناسی تعامل داشته باشند (Jones et al., 2005). در سطح اتحادیه اروپا، پایش علاوه بر شبکه‌های ملی، توسط دفتر آمار اتحادیه اروپا[10] (Eurostat) نیز انجام می‌شود. Eurostat بررسی منظم LUCAS را برای پایش وضعیت و تغییرات کاربری و پوشش زمین در سراسر اتحادیه اروپا انجام می‌دهد(Eurostat, 2012). از سال ۲۰۰۶ فاصله زمانی بررسی به سه سال کاهش یافت و از ۲۰۰۸، این برنامه از نظر قانونی در برنامه کاری و بودجه Eurostat گنجانده شد. نمونه‌برداری بر اساس شبکه ۲ × ۲ کیلومتر انجام می‌شود و حدود یک میلیون نقطه زمین مرجع ایجادشده است؛ از این تعداد، تقریباً ۲۷۰ هزار نقطه توسط نقشه‌برداران در محل بازدید می‌شود تا اعتبار مشاهدات سنجش از دور تأیید و اطلاعات تکمیلی جمع‌آوری شود (van Leeuwen et al., 2017).

در سال ۲۰۰۹، LUCAS با افزودن نمونه‌برداری خاک سطحی توسعه یافت تا مجموعه داده‌ای هماهنگ از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک برای ارزیابی سیاست‌های مرتبط با زمین ایجاد شود(Tóth et al., 2016). آزمون اجزاء خاک[11] در حدود ۱۰ درصد از نقاط بازدید شده (۲۷۰۰۰ نمونه) انجام شد و بررسی ۲۰۱۵ شامل ۲۷۳۴۰۱ نقطه بود که نمونه‌برداری خاک همچنان در ۱۰ درصد سایت‌ها انجام شد (van Leeuwen et al., 2017). نمونه‌های خاک همچنین از کشورهای همسایه مانند آلبانی، بوسنی و هرزگوین، کرواسی، مقدونیه، یوگسلاوی، مونته‌نگرو، صربستان و سوئیس جمع‌آوری شد تا با استاندارد LUCAS هماهنگ باشد. توزیع جغرافیایی شبکه‌های پایش خاک در اروپا یکنواخت نیست (جدول ۱). برخی کشورها مانند انگلستان، ولز، ایرلند شمالی، اتریش، دانمارک و مالت پوشش متراکم دارند، در حالی که کشورهای بزرگی مانند اسپانیا، ایتالیا و یونان سایت‌های کمتری دارند. داخل هر کشور، پوشش می‌تواند همگن (شبکه‌های سیستماتیک مانند انگلستان و دانمارک) یا ناهمگن (بر اساس انتخاب نامنظم یا قضاوت کارشناسی، مانند آلمان و لهستان) باشد. برخی کشورها چندین شبکه ناهماهنگ دارند (بلژیک، اسپانیا)، در حالی که برخی دیگر یک شبکه سیستماتیک دارند که هنوز تکمیل نشده است (فرانسه) (Morvan et al., 2008).

میانگین پوشش سایت‌ها در اتحادیه اروپا حدود ۱۳۳ کیلومترمربع به ازای هر سایت است و مقدار میانه تقریباً ۳۰۰ کیلومترمربع است. تقریباً ۹۰ درصد خاک‌ها و طبقات پوشش زمین حداقل یک مکان پایش دارند، اما تراکم سایت‌ها در واحدهای نقشه‌برداری خاک بسیار متغیر است؛ حدود ۷ درصد از مساحت تحت پوشش، هیچ مکان پایشی ندارد. بیشترین تراکم در مراتع و کمترین در زمین‌های زراعی، جنگل‌ها، تاکستان‌ها و فضاهای باز با پوشش گیاهی کم مشاهده می‌شود (Morvan et al., 2008).

10. Statistical Office of the European Union (Eurostat)

11. Soil component

جدول ۱- مدل‌های طرح نمونه‌برداری اروپایی (O'Sullivan et al., 2017)

Table 1. European Sampling Design Models

کشور / Country	برنامه نمونه‌برداری / Sampling programme	طرح نمونه‌برداری / Sampling design	فراوانی نمونه‌برداری / Sampling frequency	تعداد سایت‌ها / Number of sites
فرانسه / France	شبکه اندازه‌گیری کیفیت خاک / Reseau de Mesures de la Qualite des Sols (RMQS)	شبکه 16×16 کیلومتر / Grid 16 × 16 km	12 سال / 12 yrs	2200
بریتانیای کبیر / Great Britain	بررسی حومه شهر / Countryside Survey	سیستم طبقه‌بندی اراضی / Land classification system	1978, 1998, 2007	591
انگلیس و ولز / England and Wales	فهرست برداری ملی خاک / National Soil Inventory (NSI)	شبکه 5 × 5 کیلومتر / Grid 5 × 5 km	1983, 1995	6127 با 1800 نمونه‌برداری مجدد در دهه 6127 with / 1990 1800 resampled in 1990s
اسکاتلند / Scotland	فهرست برداری ملی خاک / National Soil Inventory (NSI)	شبکه 10 × 10 کیلومتر / Grid 10 × 10 km	1978 – 1988 2007–2010	721 خاکرخ خاک / 721 soil profiles 195 مورد بازدید مجدد / 195 revisited
هلند / The Netherlands	شاخص‌های بیولوژیکی برای کیفیت خاک / Biological Indicators for Soil Quality (BISQ)	نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده بر اساس کاربری زمین × نوع خاک / Stratified random sampling based on land use x soil types	1999	300 سالانه 60 سایت بازدید می‌شود / 60 sites are revisited per yr.
آلمان / Germany	سایت‌های پایش دائمی خاک / Permanent Soil Monitoring Sites	رویکرد طبقه‌بندی‌شده برای پوشش انواع شرایط خاص سایت / Stratified approach to cover a variety of specific site conditions	1986، هر 10 سال / every 10 yrs	829
اروپایی / European	بررسی آماری چارچوب پوشش و کاربری اراضی / Land-use / Cover Area frame statistical Survey (LUCAS Soil)	شبکه 2 × 2 کیلومتری که با داده‌های کاربری زمین در 23 کشور عضو نمونه‌برداری شده است / 2 × 2 km grid which is sampled by land use data across 23	2009, 2014	20000
اروپایی / European	نقشه‌برداری ژئوشیمیایی خاک زمین‌های کشاورزی و چراگاهی در اروپا / Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil in Europe (GEMAS)	1 سایت / 2500 کیلومتر مربع، از 33 کشور اروپایی / 1 site /2500 km2, from 33 European countries	2009	2108 مکان در زمین‌های زراعی (0-20 سانتی‌متر) و 2023 مکان در علفزار (0-10سانتی‌متر) / 2108 sites on arable land (0–20 cm) and 2023 sites on grassland (0–10 cm)

چین

صنعتی شدن و شهرنشینی موجب افزایش قابل‌توجه فلزات بالقوه سمی در چین شده است (He et al., 2013)، که عمدتاً ناشی از آبیاری با فاضلاب و فعالیت‌های استخراج و فرآوری فلزات است. فعالیت‌های کشاورزی در یک سال به ترتیب ۷۹/۶، ۵۶ و ۶۳ درصد از کل مس، روی و کادمیوم خاک‌های کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند (Luo et al., 2009). درک کیفیت خاک برای تضمین امنیت غذایی در چین اهمیت بالایی دارد. اولین بررسی عمومی خاک در چین (۱۹۵۸–۱۹۶۰) بر حاصلخیزی و طبقه‌بندی خاک تمرکز داشت و ۱۳ پارامتر شیمیایی و فیزیکی (pH، کربن آلی کل، نیتروژن کل، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده، کربنات کلسیم، نیاز آهک، چگالی، رطوبت، کلر، شوری، سولفات و کربنات یا بیکربنات) را شامل شد (National Soil Survey Office, 1964; Chen & Gao, 1989). دومین بررسی ملی خاک در سال ۱۹۷۹ علاوه بر توصیف میدانی، ترکیب شیمیایی، مواد مغذی و عناصر کمیاب خاک را تحلیل و نقشه خاک چین را بر اساس استان‌ها تهیه کرد. در سال

۱۹۹۲، سیستم طبقه‌بندی خاک بر اساس داده‌های دومین بررسی ایجاد شد.

از سال ۱۹۹۹، چین برنامه سیستماتیک بررسی ژئوشیمیایی منطقه‌ای چندمنظوره را اجرا کرده است (Li et al., 2014) که شامل پایش خاک، ارزیابی اکولوژیکی و وضعیت مواد مغذی در خاک‌های سطحی (۲۰–۰ سانتی‌متر) و عمیق (۱۸۰–۱۵۰ سانتی‌متر) است (Yang et al., 2014). بررسی ملی کیفیت و آلودگی خاک (۲۰۱۰–۲۰۰۶) تمام استان‌ها به جز تایوان، هنگ کنگ و ماکائو را پوشش داد و اهدافی مانند ارزیابی کیفیت خاک، منابع آلودگی، خطرات، وضع مقررات و انتخاب تکنیک‌هایی برای پاکسازی خاک‌های آلوده داشت (Wu, 2006). سیستم پایش کیفیت خاک چین توسط وزارتخانه‌های مختلف سازماندهی می‌شود: وزارت کشاورزی (زمین‌های کشاورزی)، وزارت منابع آب (فرسایش خاک)، وزارت زمین و منابع (رانش زمین) و وزارت حفاظت از محیط‌زیست (کیفیت محیط‌زیستی خاک) (Li, 2005) . شبکه پایش زمین‌های کشاورزی شامل ۱۰۷ سایت ملی و استانی است و شاخص‌ها شامل محصولات زراعی، عملیات زراعی، عملکرد محصول، مقادیر کود، مواد مغذی خاک (مواد آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده، آهن قابل‌استفاده، منگنز قابل‌استفاده، مس قابل‌استفاده، روی قابل‌استفاده، بور قابل‌استفاده و مولیبدن قابل‌استفاده) و آلاینده‌های خاک (آرسنیک، کادمیوم، کروم، جیوه و سرب) می‌شوند (Lu & He, 2013). شاخص‌های فعلی شامل pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، نقره، ارسنیک، کادمیوم، کبالت، کروم، مس، جیوه، منگنز، نیکل، آنتیموان، تالیوم، سرب، وانادیوم، روی، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای[12] و بی فنیل پلی کلره[13]است. اصول پایش شامل انجام سالانه در مناطق کلیدی، هر ۵ سال در همه مناطق، پایش ویژه برای نگرانی‌های محیط زیستی و پایش ملی و استانی متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی و آلودگی محلی است (Wang et al., 2012).

کانادا

فرسایش آبی و بادی، شورشدن و اسیدی شدن از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک در اراضی کشاورزی کانادا هستند(Coote et al., 1981). و تنها در سال ۱۹۸۴ بیش از یک میلیارد دلار خسارت به کشاورزان وارد کردند. در کارگاه پایش کیفیت خاک در سال ۱۹۸۸ در اتاوا، ضرورت ایجاد یک سیستم پایش و تعیین مکان‌های معیار برای ثبت داده‌های پایه مورد تأکید قرار گرفت (Wang, 1988). پیش از آن، هیچ شبکه معیار رسمی برای پایش کیفیت خاک در جهان وجود نداشت. در سال ۱۹۸۹، بر مبنای پیشنهاد شبکه پایش خاک فرانسه (Lavelle, 1988)، ایجاد حدود ۱۰۰ مکان پایش مطرح شد (Wang et al., 1994). به دلیل محدودیت منابع، در سال ۱۹۸۹ پنج سایت آزمایشی و دو سایت ماهواره‌ای در شرق کانادا نمونه‌برداری شدند و تا سال ۱۹۹۳ شانزده سایت دیگر به شبکه افزوده شد. پایش باید حداقل ده سال ادامه می‌یافت تا روند تغییرات کیفیت خاک آشکار شود. هفت معیار برای انتخاب سایت‌ها تدوین شد که سه معیار اصلی شامل: نمایندگی یک زون خاک یا ناحیه اکولوژیکی کشاورزی، نمایندگی یک منطقه فیزیوگرافیک اصلی، و پوشش یک سیستم تولید کشاورزی غالب بود. سایر معیارها شامل هماهنگی با اولویت‌های استانی، پتانسیل تأثیرپذیری از تخریب، وسعت ۵ تا ۱۰ هکتاری (یا یک حوزه آبخیز کوچک)، و محدود بودن به اراضی کشت‌شده باشند، بودند (Wang et al., 1994). در نهایت، ۲۳ سایت تا سال ۱۹۹۲ انتخاب و نمونه‌برداری شدند.

نمونه‌برداری شامل: (۱) نمونه‌های خاکرخ، (۲) نمونه‌های خاک سست[14] برای داده‌های پایه و (۳) نمونه‌برداری برای آنالیز Cs۱۳۷ بود. ویژگی‌های خاک عمدتاً در افق AP ارزیابی و در سه گروه طبقه‌بندی شدند: ۱) ویژگی‌های حساس با تغییرات قابل‌انتظار طی کمتر از ۱۰ سال (pH، فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده، کربن آلی، نیتروژن کل، توزیع Cs۱۳۷، آهن و آلومینیوم قابل‌استخراج، جرم مخصوص ظاهری)؛ ۲) ویژگی‌های نسبتاً حساس با تغییرات در مقیاس دهه‌ها (کاتیون‌های قابل‌تبادل، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات‌ها، ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک)؛ و ۳) ویژگی‌های غیرحساس با ثبات بلندمدت بیش از ۱۰۰ سال (اندازه ذرات، کانی‌شناسی رس، سطح کل[15]، کل عناصر (آلومینیوم، کلسیم، کبالت، کروم، مس، آهن، پتاسیم، لیتیوم، منیزیوم، سدیم، نیکل، سرب و روی) (Wang et al., 1994). افزون بر این، مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی در محل اندازه‌گیری شد که شامل هدایت هیدرولیکی اشباع و نزدیک به اشباع، رطوبت خاک، هدایت الکترومغناطیسی، تعداد منافذ زیستی، تعداد کرم‌های خاکی و عملکرد محصول بود. همچنین در ۸ سایت، ایستگاه‌های هواشناسی خودکار نصب شد (Wang et al., 1994).

ژاپن

در سال ۱۹۹۹، ژاپن بررسی شناسایی خاک برای پایش عملکرد خاک را آغاز کرد که در ابتدا حدود ۲۰۰۰۰ سایت را شامل می‌شد، اگرچه این تعداد به حدود ۵۵۰۰ سایت کاهش یافت. در سال ۲۰۰۸، برنامه ملی شناسایی خاک برای پایش محتوای کربن خاک و مدیریت خاک راه‌اندازی شد که شامل تقریباً ۳۵۰۰ سایت

12. Benzo[a]anthracene (BAH)
13. Polychlorinated biphenyls (PCBs)
14. loose samples
15. Total surface area

پایش اضافی بود. این برنامه‌ها با هدف پایش سلامت خاک و شیوه‌های مدیریت آن طراحی‌شده‌اند تا استفاده پایدار از منابع خاک تضمین شود (FAO, 2024).

نیوزیلند

نیوزیلند بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ دو برنامه پایش کیفیت خاک را برای آزمایش روش‌ها و ارائه داده‌ها در مورداستفاده پایدار از زمین برای گزارش وضعیت محیط‌زیست اجرا کرد. در این پروژه تأکید بر ویژگی‌های شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی خاک بود، نه آلودگی یا فرسایش. یک استراتژی نمونه‌برداری و حداقل مجموعه داده‌ها تعریف شد. یک چارچوب تفسیری برای ارزیابی کیفیت خاک بر اساس دسته‌بندی‌های کاربری زمین و رده خاک ایجاد گردید و کیفیت خاک در بیش از ۵۰۰ سایت ارزیابی شد (Sparling et al., 2004). در این پروژه ابتدا مجموعه‌ای از ۱۷ شاخص کیفیت خاک مورد آزمایش قرار گرفت (Cornforth, 1999; Doran & Parkin, 1994, 1997; Karlen & Stott, 1994) و در نهایت به ۷ شاخص کلیدی (کربن کل، نیتروژن کل، نیتروژن قابل معدنی شدن، pH، فسفر اولسن، چگالی ظاهری و نسبت حفره‌های بزرگ خاک[16]) کاهش یافت (Sparling et al., 2004).

آمریکای لاتین

سیستم اطلاعات خاک آمریکای لاتین و کارائیب[17](SISLAC)، که توسط GSP فائو ایجاد شده، جامع‌ترین پایگاه داده خاک در منطقه با حدود ۵۰ هزار خاکرخ و ۱۴۰ هزار افق است و شامل اطلاعات مکانی، توصیفی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌هاست (SISLAC, 2013) . با این حال، به دلیل ناهمگونی منابع، بخشی از داده‌ها ناسازگار هستند و می‌توانند موجب عدم‌قطعیت در تحلیل‌ها شوند (Garg et al., 2020). به همین دلیل پروژه‌ای برای ارزیابی کیفیت داده‌ها و تولید نسخه‌ای سازگار و کامل‌تر از SISLAC اجرا شد. این فرآیند در سه مرحله انجام شد: بررسی انطباق مکانی خاکرخ‌ها، اصلاح داده‌های سایت و اعتبارسنجی توصیف افق‌ها. خروجی نهایی، پایگاه داده‌ای هماهنگ بود که حداقل الزامات یکپارچگی را برای کاربردهایی مانند توصیف خاک، ارزیابی عملکرد، تحلیل فرآیندهای خاک و شناسایی نقش خاک در اکوسیستم‌ها برآورده می‌کند. در نهایت، تحلیل مؤلفه‌های اصلی با استفاده از متغیرهایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی مؤثر، pH، کربن آلی، رس و شن انجام شد و داده‌های قابل اعتمادی درباره خاک‌های منطقه فراهم کرد. نسخه اصلاح‌شده SISLAC شامل حذف ۱۵ درصد خاکرخ‌های ناسازگار (مانند موارد تکراری یا دارای همپوشانی) و استانداردسازی ۴/۵ درصد از آنها بود و با ادغام پایگاه‌های موجود، امکان افزایش حجم پایگاه داده بیش از ۵۰ درصد فراهم شد (Díaz-Guadarrama et al., 2024).

ایران

در ایران، مطالعات پایش خاک از سال ۱۳۹۰ با پیشنهاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب و همکاری معاونت آب‌وخاک وزارت جهاد کشاورزی در قالب جمع‌آوری اطلاعات از کل ۱۸/۵ میلیون هکتار اراضی کشاورزی کشور و در ۳۲۷۸ پایگاه (سایت) مطالعاتی (به ازاء حداقل هر ۶۰۰۰ هکتار یک پایگاه مطالعاتی) توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب و بخش‌های خاک و آب مراکز استانی آغاز شد. انتخاب این نقاط ترکیب متناسبی از اراضی زراعی، باغی و آیش در شرایط آبی و دیم است. همچنین نقاط و مکان‌های خاص نظیر اراضی آلوده، شور، ماناب که دارای سطح قابل‌توجهی در منطقه می‌باشند نیز افزون بر نقاط پیش‌بینی‌شده، در نظر گرفته شد. برای انتخاب این پایگاه‌های نمونه‌برداری، از داده‌های جانبی دیگری نظیر نوع کاربری اراضی، نقشه خاک‌های ایران، اقلیم، داده‌های زمین‌شناسی و غیره نیز استفاده‌شده است. انتخاب هر پایگاه به‌گونه‌ای است که حتی‌الامکان قطعه‌ای ۳-۱ هکتاری با مدیریت واحد بوده و تغییرات شدید همانند تغییر کاربری و تسطیح اراضی در طول انجام مطالعه در آن صورت نخواهد گرفت. برای انجام مطالعات دقیق‌تر حدود ۱۰ درصد این پایگاه‌ها به‌عنوان پایگاه شاهد انتخاب‌شده و ویژگی‌های بیولوژیکی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی که اندازه‌گیری آنها مستلزم صرف وقت زیاد و هزینه سنگین است در این پایگاه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از انتخاب پایگاه‌های مطالعاتی، نمونه‌برداری از آنها حداقل یک‌بار در سال انجام گرفت و ویژگی‌های فیزیکی (بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری خاک (در کلیه پایگاه‌ها) و نفوذپذیری، ساختمان، پایداری خاکدانه‌ها و منحنی رطوبتی خاک (در پایگاه‌های شاهد) شیمیایی (عناصر پر مصرف، عناصر کم مصرف، هدایت الکتریکی، pH، محتوای کربن آلی، مقدار کل نیتروژن در خاک، گچ، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم تبادلی، بیکربنات، کربنات سدیم باقیمانده در همه پایگاه‌ها و ظرفیت تبادلی کاتیونی خاک و عناصر آلاینده در پایگاه‌های شاهد) و ویژگی‌های زیستی (در پایگاه‌های شاهد) اندازه‌گیری شد و پرسشنامه مشخصات نیز برای هر پایگاه تکمیل شد. این پرسشنامه شامل اطلاعاتی نظیر مشخصات کشاورز و پایگاه، نوع محصول، سیستم آبیاری، میزان و نوع کودها و سم‌های مصرفی،

16. Macroporosity

17. Latin America and Caribbean Soil Information System (SISLAC)

عملکرد محصول و عملیات خاک‌ورزی بود. پس از انتخاب پایگاه-های نمونه‌برداری که در نقشه با طول و عرض جغرافیایی مشخص‌شده‌اند، نمونه‌برداری خاک در هر پایگاه انجام گرفت. نمونه‌برداری از خاک برای اراضی زراعی از دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتیمتر و برای اراضی باغی از سه عمق۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتیمتر انجام شد (در موارد خاص و در صورت وجود شرایط ویژه در لایه‌های پایین‌تر، از این لایه‌ها نیز نمونه‌برداری شد). فاز اول مطالعه پایش کیفیت خاک‌های کشاورزی از سال ۱۳۹۰ در تمامی اراضی کشاورزی کشور و فاز دوم به مطالعه در پایگاه‌های شاهد (۱۰ درصد پایگاه‌های اصلی) اختصاص پیدا کرد و اکنون (سال ۱۴۰۴) فاز سوم مطالعه در کل استان‌های کشور و در تمامی پایگاه‌های مطالعاتی آغاز شده است. با توجه به وسعت کار و محدودیت‌های مالی، مطالعات در این فاز در پنج سال متوالی و هر سال در تعدادی از نواحی زراعی- زیستگاهی انجام خواهد شد. در این فاز در مرحله اول؛ منطقه مرکزی و سواحل شمالی، در مرحله دوم؛ مناطق زاگرس جنوبی، سواحل جنوبی، خشک مرکزی، خراسان، خشک جنوبی، زاگرس مرکزی، خوزستان و در مرحله سوم؛ منطقه شمال غرب مطابق با جدول زیر مطالعه می‌شود (جدول ۲). پس از جمع‌آوری داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها، شاخص‌های مورد اندازه‌گیری در سال‌های مختلف مقایسه و تغییرات آن اندازه‌گیری و به صورت آمار و نقشه ارائه می‌شود (Saadat & Rezaei, 2018).

جدول ۲- تعداد پایگاه‌های مطالعاتی بر اساس مناطق آگرواکولوژیک ایران

Table 2. Number of Study Stations by Agroecological Regions of Iran

ردیف / Number	منطقه آگرواکولوژیک / Agroecological Region	تعداد پایگاه‌ها / Number of Stations
1	سواحل شمالی (گیلان، مازندران و گلستان) و مرکزی (تهران، البرز، قزوین، قم، مرکزی، سمنان) / Northern Coastal Region (Gilan, Mazandaran, and Golestan) and Central Region (Tehran, Alborz, Qazvin, Qom, Markazi, and Semnan)	599
2	زاگرس جنوبی (فارس،کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری)، سواحل جنوبی (بوشهر و هرمزگان) و خشک مرکزی (یزد، اصفهان) / Southern Zagros Region (Fars, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, Chaharmahal and Bakhtiari), Southern Coastal Provinces (Bushehr and Hormozgan), and Central Arid Region (Yazd, Isfahan)	561
3	خراسان (خراسان جنوبی، رضوی و شمالی) و خشک جنوبی (کرمان و سیستان و بلوچستان) / Khorasan Region (South, Razavi, and North Khorasan) and Southern Arid Region (Kerman and Sistan and Baluchestan)	627
4	شمال غرب (اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان و زنجان) Northwestern Region (Ardabil, East Azerbaijan, West Azerbaijan, Kurdistan, and Zanjan)	772
5	زاگرس مرکزی (همدان، ایلام، لرستان، کرمانشاه) و خوزستان (استان خوزستان) Central Zagros Region (Hamedan, Ilam, Lorestan, and Kermanshah) and Khuzestan Province (Khuzestan)	719
مجموع / Total		3278

مقایسه برنامه پایش خاک ایران با سایر کشورها و پیشنهادات

اگرچه ایران در مقایسه با کشورهای دارای سابقه طولانی‌تر در پایش خاک، دوره شروع نسبتاً جدیدتری دارد، اما در این زمینه اقدامات ارزشمندی صورت گرفته است: راه‌اندازی شبکه نمونه‌برداری در سطح کشور، پوشش مناسب اراضی کشاورزی، سنجش دوره‌ای شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی، آلاینده‌ها و غیره. این امر نشان می‌دهد که ایران در مسیر توسعه و ارتقای پایش کیفیت خاک گام‌های بسیار مؤثری برداشته و ظرفیت برای گسترش این برنامه وجود دارد. ایران به دلیل تنوع منحصر به فرد اقلیمی، از مناطق خشک و نیمه‌خشک گرفته تا مناطق مرطوب و کوهستانی، با تنوع خاک گسترده‌ای مواجه است. این شرایط موجب شده که برنامه پایش کیفیت خاک در ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. هرچند تعداد نقاط نمونه‌برداری در ایران نسبت به برخی از کشورهای با وسعت بزرگ‌تر، بیشتر است، اما برای بهبود پوشش مکانی و افزایش دقت پایش، لازم است هماهنگی بین دستگاه‌ها، تخصیص بودجه کافی و بهره‌گیری از ظرفیت‌های علمی و انسانی تقویت شود. چنین رویکردی افزون بر ارتقای قابلیت تحلیل و پایش بلندمدت، امکان هم‌راستایی بیشتر با استانداردهای بین‌المللی و بهره‌گیری مؤثر از داده‌ها برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار را فراهم می‌آورد.

به طور کلی، برخی از اقدامات مطلوب که هر راهبرد پایش خاک باید آن‌ها را اتخاذ کند، به شرح زیر هستند:

- تعیین مجموعه‌ای حداقلی از شاخص‌ها (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) برای پایش که در ارتباط با ابزارهای حکمرانی خاک در سطح محلی یا جهانی تعریف‌شده باشند.
- تعیین دوره زمانی پایش برای هر شاخص، با توجه به سرعت تغییر آن‌ها در طول زمان.

- اطمینان از تأمین منابع لازم برای نگهداری بلندمدت برنامه پایش.
- ایجاد سامانه‌هایی برای مدیریت داده‌ها (اعم از داده‌های میدانی، دورسنجی یا آزمایشگاهی).
- نگهداری نمونه‌های خاک در بانک‌های خاک (مشابه با بانک‌های ژن یا بذر)(FAO, 2024).

نتیجه‌گیری

پایش کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری ضروری برای مدیریت پایدار منابع خاک و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی، نقشی کلیدی در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی و کشاورزی ایفا می‌کند. پایش خاک، دستیابی به اهدافی نظیر مدیریت تولید مواد غذایی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از آب و تنوع زیستی را میسر می‌کند. تلاش‌های هماهنگ و مداوم در پایش خاک می‌تواند دستاوردهای ارزشمندی داشته باشد، از جمله: تحقق اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه پایان دادن به گرسنگی، دستیابی به امنیت غذایی، بهبود تغذیه و ترویج کشاورزی پایدار، حفاظت، بازیابی و ترویج استفاده پایدار از اکوسیستم‌های زمینی، مدیریت پایدار جنگل‌ها، مبارزه با بیابان‌زایی، توقف و معکوس کردن تخریب زمین، محافظت از منابع طبیعی در برابر تخریب بیشتر و حفظ عملکردهای اکوسیستم خاک.

بررسی وضعیت پایش خاک در کشورهای مختلف نشانگر وجود شکاف‌های قابل‌توجهی در بسیاری از کشورها است از جمله: چالش‌هایی در زمینه توانایی‌های فنی، داده‌ها و اطلاعات مربوط به خاک و عدم وجود منابع مالی قابل اتکا به‌منظور پشتیبانی از برنامه‌های پایش خاک در طول زمان؛ شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت خاک در کشورهای مختلف، بسته به شرایط اقلیمی، نوع کاربری اراضی، اهداف مدیریتی و ظرفیت‌های علمی، متفاوت هستند. این تفاوت‌ها اگرچه بازتابی از تنوع اکولوژیکی و مدیریتی است، اما در عین حال ضرورت ایجاد یک چارچوب نظام‌مند و هماهنگ جهانی یا ملی برای انتخاب شاخص‌ها، روش‌های نمونه‌برداری و تحلیل داده‌ها را برجسته می‌کند. وجود این برنامه‌ها خود بازتابی از پذیرش اهمیت پایش خاک برای مدیریت پایدار محیط‌زیست و افزایش بهره‌وری کشاورزی است که از این طریق کشورها قادر خواهند بود اقدامات مؤثری را انجام دهند از جمله ردیابی تغییرات وضعیت سلامت خاک در طی زمان، شناسایی تهدیدها، جلوگیری از تخریب منابع خاک مانند فرسایش و کاهش کربن آلی خاک و اتخاذ تصمیم‌های جامع و مهم برای حفاظت از خاک. چنین نظام یکپارچه‌ای می‌تواند امکان مقایسه‌پذیری نتایج، پایش بلندمدت و تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینه حفظ و بهبود کیفیت خاک را فراهم آورد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد.

References

1. Arrouays, D., Marchant, B. P., Saby, N. P. A., Meersmans, J., Orton, T. G., Martin, M. P. and Kibblewhite, M. 2012. Generic Issues on Broad-Scale Soil Monitoring Schemes: A Review. *Pedosphere*, *22(4)*, pp.456-469. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60031-9
2. Arrouays, D., Mulder, V. L. and Richer-de-Forges, A. C. 2021. Soil mapping, digital soil mapping and soil monitoring over large areas and the dimensions of soil security – A review. *Soil Security*, *5(100018)*. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100018
3. Arrouays, D., Vogel, H., Eckelmann, W., Armstrong-Brown, S., Loveland, P. and Coulter, B. 1998. Soil monitoring networks in Europe 16th World Congress of Soil Science.
4. Asaadi, M.A. and Najafi Alamdarlo, H. 2023. Estimation of Economic Value of Water and Soil Conservation Function in Northern Central Alborz Protected Area. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, *11(22)*, pp. 130-142. http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-891-en.html. (In persian)
5. Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P. H. and Winding, A. 2009. Indicators for monitoring soil biodiversity. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *5(4)*, pp.717-719.
6. Bristol Food Network Website (2022). Save and grow: A policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production; https://www.bristolfoodnetwork.org/blog/save-and-grow-apolicymaker%E2%80%99s-guide-to-the-sustainable-intensification-ofsmallholder-crop-production/
7. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R. and Moder, P. 2018. Soil quality–A critical review. *Soil biology and biochemistry*, *120*, pp.105-125.
8. Chen, Y., and Gao, Z. 1989. Development and achievement of soil survey and mapping in China. *Soils Fertility*, *4*, pp.7–12.
9. Coote, D. R., Dumanski, J. and Ramsey, J. F. 1981. *An assessment of the degradation of agricultural lands in Canada*. Land Resource Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, ON. 86pp. http://hdl.handle.net/10214/15132
10. Cornforth, I. 1999. Selecting indicators for assessing sustainable land management. *Journal of Environmental Management*, *56(3)*, pp.173-179.
11. Dalkmann, P., Siebe, C., Amelung, W., Schloter, M. and Siemens, J. 2014. Does Long-Term Irrigation with Untreated Wastewater Accelerate the Dissipation of Pharmaceuticals in Soil? *Environmental Science & Technology*, *48(9)*, pp.4963-4970. https://doi.org/10.1021/es501180x
12. De Rosa, D., Ballabio, C., Lugato, E., Fasiolo, M., Jones, A. and Panagos, P. 2024. Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade? *Global Change Biology*, *30(1)*, e16992. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.16992
13. Díaz-Guadarrama, S., Varón-Ramírez, V. M., Lizarazo, I., Guevara, M., Angelini, M., Araujo-Carrillo, G. A., Bolivar, A. 2024. Improving the Latin America and Caribbean Soil Information System (SISLAC) database enhances its usability and scalability. *Earth System Science Data*, *16(3)*, pp.1229-1246.
14. Doran, J. W. and Parkin, T. B. 1994. *Defining and assessing soil quality* [1-21]. Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA, Madison, WI, USA, pp. 3–21.
15. Dumitran, C. and Onutu, I. E. C. 2010. Environmental Risk Analysis for Crude Oil Soil Pollution. *Journal of Earth & Environment Science*, *5*, pp.83−92.
16. EEA report. 2023. Soil monitoring in Europe- Indicators and thresholds for soil health assessments. Available at https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/soil-monitoring-in-europe.
17. Ernst and Young. 2013. Evaluation of expenditure and jobs for addressing soil contamination in Member States,

final report to European Commission Directorate-General for Environment.
18. Eugenio, N. R., Naidu, R. and Colombo, C. M. 2020. Global approaches to assessing, monitoring, mapping, and remedying soil pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192(9)*, p.601. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08537-2
19. European Commission. 2006. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. In Thematic Strategy For Soil Protection (COM 2006.231). Brussels: Commission of the European Communities 2006. [Online]. Available at https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231
20. European Commission. 2023. "Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience. 416 (final), Available at https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directivesoil-monitoring-and-resilience_en.
21. Eurostat. 2012. LUCAS-a multipurpose land use survey. Available at http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/LUCAS_%E2%80%94_a_multi-purposeland_use_survey
22. Faber, J. H., Creamer, R. E., Mulder, C., Römbke, J., Rutgers, M., Sousa, J. P. and Griffiths, B. 2013. The practicalities and pitfalls of establishing a policy-relevant and cost-effective soil biological monitoring scheme. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *9(2)*, pp.276-284. https://doi.org/10.1002/ieam.1398
23. FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. Available at http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf (http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf); accessed 26/02/2016.
24. FAO. 2024. Time to address global soil monitoring. ITPS (Intergovernmental Technical Panel On Soils).
25. FRRCC Report to the Administrator (2015). EPA's Potential Role in Supporting Soil Health.
26. Garg, P. K., Garg, R. D., Shukla, G. and Srivastava, H. S. 2020. *Digital mapping of soil landscape parameters*. Poland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3238-2
27. GSP and FAO. 2014. Plan of action for pillar four of the global soil partnership. FAO, Rome. Available at http://www.fao.org/3/az921ehttp://www.fao.org/3/az921e); accessed: 25/01/2016.
28. He, B., Yun, Z., Shi, J. and Jiang, G. 2013. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity. *Chinese Science Bulletin*, *58(2)*, pp.134-140. https://doi.org/10.1007/s11434-012-5541-0
29. Hirte, J., Richner, W., Orth, B., Liebisch, F. and Flisch, R. 2021. Yield response to soil test phosphorus in Switzerland: Pedoclimatic drivers of critical concentrations for optimal crop yields using multilevel modelling. *Science of the Total Environment*, *755*, *143453*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143453
30. Jones, D. L., Cross, P., Withers, P. J. A., DeLuca, T. H., Robinson, D. A., Quilliam, R. S., Haris, L.M., Chadwick, D.R and Edwards-Jones, G. 2013. Review: Nutrient stripping: the global disparity between food security and soil nutrient stocks. *Journal of Applied Ecology*, *50(4)*, pp.851-862. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2664.12089
31. Jones, R. J. A., Houskova, B., Bullock, P. and Montanarella, L. 2005. *Soil Resources of Europe second edition*. No.9, EUR 20559 EN, (2005), 420pp. Office for Official. Publications of the European Communities, Luxembourg.
32. Karlen, D. L., and Stott, D. E. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication Number 35.

SSSA, Madison, WI, USA. (Vol. 35). https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c4

33. Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A. and Fresco, L. O. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*, *2(2)*, pp.111-128. https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016
34. Lavelle, P. 1988. Paramètres biologiques à mesurer dans le cadre de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Rapport intermediaire Novembre, 1988. Secretariat D'etat A L'environnement.
35. Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I. and Rillig, M. C. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1(10)*, pp.544-553. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8
36. Li, G. 2005. The status and development needs of soil environmental monitoring in China. *Journal of Environmental Monitoring and Technology*, *17(1)*, pp.8-10.
37. Li, M., Xi, X., Xiao, G., Cheng, H., Yang, Z., Zhou, G., Jiayu, Y. and Li, Z. 2014. National multi-purpose regional geochemical survey in China. *Journal of Geochemical Exploration*, *139*, pp.21-30. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.06.002
38. Lu, S., and He, L. 2013. On the developing of soil environmental monitoring in China. *Adm Tech Environ Monit*, *25(3)*, pp.6-12.
39. Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., Wei, D., and Zhu, Y.-G. 2009. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *Journal of environmental management*, *90(8)*, pp.2524-2530. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.011
40. Mondal, P., Walter, M., Miller, J., Epanchin-Niell, R., Gedan, K., Yawatkar, V. and Tully, K. L. 2023. The spread and cost of saltwater intrusion in the US Mid-Atlantic. *Nature Sustainability*, *6(11)*, pp.1352-1362. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01186-6
41. Morvan, X., Saby, N. P. A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R. J. A., Verheijen, F. G. A. and Kibblewhite, M. G. 2008. Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. *Science of The Total Environment*, *391(1)*, pp.1-12. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.046
42. Mousavi, S.A. Arzani, H. Sharzei, Gh. Azarnivand, H. Farahpour, M., Engel, S., Alizadeh, S., and Nazari Samani, A.A. 2014. Economic valuation of the role of rangeland plant cover in soil conservation (case study: Middle Taleghan Basin). *Scientific-Research Journal of Rangeland and Watershed Management*, *67(2)*, pp. 317-331. 10.22059/jrwm.2014.51835. (In persian)
43. Muntwyler, A., Panagos, P., Pfister, S., and Lugato, E. 2024. Assessing the phosphorus cycle in European agricultural soils: Looking beyond current national phosphorus budgets. *Science of The Total Environment*, *906*, *167143*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167143
44. National Soil Survey Office. 1964. Agricultural soils in China. Ministry of Agriculture. (In Chinese)
45. OECD (Organization for Economic Co-Operation Development). 2002. Report on the OECD expert meeting on agri-biodiversity indicators. November 2001: Summary and recommendations. In: OECD Paris. Available at https://www.oecd.org/en/publications/agriculture-and-biodiversity_9789264199217-en.html
46. O'Sullivan, L., Bampa, F., Knights, K., and Creamer, R. E. 2017. Soil protection for a sustainable future: options for a soil monitoring network for Ireland. *Soil Use and Management*, *33(2)*, pp.346-363. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/sum.12351
47. Panagos, P., Jones, A., Lugato, E., and Ballabio, C. 2025a. A Soil Monitoring Law for Europe. *Global Challenges*, *9(3)*, *2400336*. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gch2.202400336

48. Panagos, P., Jones, A., Lugato, E., and Ballabio, C. 2025b. *A Soil Monitoring Law for Europe. 9(3), 2400336*. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gch2.202400336
49. Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., and Bosello, F. 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation & Development*, *29*, pp.471-484.
50. Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y. and Montanarella, L. 2013. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of Environmental and Public Health*, *158764*. https://doi.org/10.1155/2013/158764
51. Prashar, P. and Shah, S. 2016. Impact of Fertilizers and Pesticides on Soil Microflora in Agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp.331-361). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_8
52. Saadat, S. and Rezaei, H., 2018. Agricultural Soil Quality Monitoring Plan: Investigating Changes in Soil Chemical Properties in Soil Quality Monitoring Study Bases. Soil and Water Research Institute. (In persian)
53. Saco, P. M., McDonough, K. R., Rodriguez, J. F., Rivera-Zayas, J. and Sandi, S. G. 2021. The role of soils in the regulation of hazards and extreme events. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological*. *376(1834)*, 20200178. https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0178
54. Saiz-Rubio, V. and Rovira-Más, F. 2020. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, *10(2)*. https://doi.org/10.3390/agronomy10020207
55. Sepulvado, J. G., Blaine, A. C., Hundal, L. S., and Higgins, C. P. 2011. Occurrence and Fate of Perfluorochemicals in Soil Following the Land Application of Municipal Biosolids. *Environmental Science & Technology*, *45(19)*, pp.8106-8112. https://doi.org/10.1021/es103903d
56. Shah, F. and Wu, W. 2019. Soil and Crop Management Strategies to Ensure Higher Crop Productivity within Sustainable Environments. *Sustainability*, *11(5)*.
57. SISLAC. 2013. Sistema de Información de Suelos de Latinoamérica –SISLAC. Available at http://www.sislac.org/# (last access: 2 October 2017).
58. Smith, P., Ashmore, M. R., Black, H. I. J., Burgess, P. J., Evans, C. D., Quine, T. A. and Orr, H. G. 2013. The role of ecosystems and their management in regulating climate, and soil, water and air quality. *Journal of Applied Ecology*, *50(4)*, pp.812-829.
59. Soleimani Morchekhorti, A. and Cheraghi, M., 2024. Investigating the implementation process of the soil protection law with emphasis on the country's soil erosion crisis (from an environmental perspective). *Research Center of the Islamic Consultative Assembly*, pp. 1-35. 10.22034/report.mrc.2024.1403.32.8.20191. (In persian)
60. Sparling, G., Schipper, L., Bettjeman, W. and Hill, R. 2004. Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Agriculture, Ecosystems Environment*, *104(3)*, pp.523-534.
61. Stavi, I., Thevs, N. and Priori, S. 2021. Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. *Frontiers in the Environmental Sciences*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831
62. Tanneberger, F., Birr, F., Couwenberg, J., Kaiser, M., Luthardt, V., Nerger, M. and Närmann, F. 2022. Saving soil carbon, greenhouse gas emissions, biodiversity and the economy: paludiculture as sustainable land use option in German fen peatlands. *Regional Environmental Change*, *22(2)*, p.69. https://doi.org/10.1007/s10113-022-01900-8
63. Tóth, G., Antofie, T. E., Jones, A. and Apostol, B. 2016. The LUCAS 2012 topsoil survey and derived cropland and grassland soil properties of Bulgaria and Romania. *Environmental Engineering Management Journal*, *15(12*). p.

2651-2662. http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/

64. Tóth, G., Hermann, T., da Silva, M. R. and Montanarella, L. 2018. Monitoring soil for sustainable development and land degradation neutrality. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190(2)*, p.57. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6415-3
65. Turbé, A., De Toni, A., Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Camacho, N. R. Van Der Putton, W.H., Labouze, E. and Mudgal, S.H. 2010. *Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers*. https://hal-bioemco.ccsd.cnrs.fr/bioemco-00560420
66. UNCCD. 1994. United Nations convention to combat desertification. (Part I. Article 1.) Available at http://www.unccd.int/en/about-theconvention/Pages/Text-Part-I.aspx. Accessed 25 Apr 2017.
67. van Leeuwen, J. P., Saby, N. P. A., Jones, A., Louwagie, G., Micheli, E., Rutgers, M. and Creamer, R. E. 2017. Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. *Environmental Research Letters*, *12(12)*, *124007*. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c5c
68. Wang, C., Walker, B., Rees, H., Kozak, L., Nolin, M., Michalyna, W., WebB, K.T., Holmstorm, D.A., King, D, Kenny, E.A. and Woodrow, E. F. 1994. Benchmark sites for monitoring agricultural soil quality-Soil Quality Evaluation Program Report 1. (0660159473). Agriculture and Agri-Food Canada. http://hdl.handle.net/10214/15192
69. Wang, C. 1988. Minutes of workshop on soil quality monitoring (January 19-20), Land Resource Research Institute, Agriculture Canada, Ottawa.
70. Wang, Y., Zhao, X. and He, L. 2012. The research of technique route for national soil environment monitoring. *Environmental Monitoring in China*, *28(3)*, pp.116–120. [In Chinese].
71. Wilson, B. H., Hattan, G., Kuhn, J., McKay, R. and Wilson, J. T. 2004. Costs and issues related to remediation of petroleum-contaminated sites 2004 NGWA Remediation Conference, New Orleans, LA.
72. Wu, X. 2006. Arrangement and requirements of national soil pollution survey. *Environment Protection*, *14*, pp.7-10.
73. Yang, Z., Yu, T., Hou, Q., Xia, X., Feng, H., Huang, C. and Zhang, M. 2014. Geochemical evaluation of land quality in China and its applications. *Journal of Geochemical Exploration*, *139*, pp.122-135. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.014
74. Zörb, C., Geilfus, C. M. and Dietz, K. J. 2019. Salinity and crop yield. *Plant Biology*, *21(S1)*, pp.31-38. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/plb.12884