10/Iranian J. Soil Research (Soil and Water Sci.) Vol. 39, No 2 , 2025
DOI: 10.22092/IJSR.2025.369856.779

Assessment of some soil characteristics of apple orchards using nutrient index value approach

Aziz Majidi*

Associate Prof., Department of Soil and Water Research, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Urmia, Iran. A.majidi@areeo.ac.ir

«Research Article»

Received: July 01, 2025, and Accepted: September 20, 2025

Abstract

Evaluating soil properties is crucial for understanding soil health and optimizing apple production. This study was carried out to evaluate some physical, chemical, and fertility properties using nutrient index value (NIV) approach of apple orchards in West Azerbaijan Province, Iran. Samples were collected from 148 sampling points, each from one apple orchard, at the depths of 0–30 and 30-60 cm. Samples were analyzed for particle size distribution, saturation percentage, pH, EC, equivalent $CaCO_3$ (CCE), organic carbon (OC), available phosphorus (P_{ava}) and potassium (K_{ava}). Data generated from laboratory analysis were subjected to statistical analysis. Data interpretation was performed using the nutrient index value based on the common and Gomez classification methods. Results revealed that soils of the study area were medium to high alkaline (75%) with moderate to high calcium carbonate equivalent (89.5%). About 75% of samples were low (less than 0.9%) and medium (25%) in category of soil organic carbon (0.9-13.1%). Also, 50% of the soils had P_{ava} less than 2.6 mg/kg (low class) and 50% had optimal to high P_{ava} (more than 5.8 mg kg^{-1}). In more than 25% of the soils, the K_{ava} was low (144 mg/kg), and more than 75% were medium to high. The results indicated that 93.7%, 93%, 85.5%, 89.5%, 98.69%, 95.9%, and 83.4% of the study areas were in the high NIV classes for EC, pH, CCE, OC, P_{ava}, and K_{ava}, respectively. Similar results were obtained for all soil parameters, except for P_{ava} in the common method. In the common method, 78% of the soils showed the low NIV class. Hence, it is concluded that the soils of the region have relatively favorable characteristics for the growth of apple trees, and in the conditions of proper orchard management, high-quality apple production is achievable.

Key words: Calcareous soils, Soil fertility, Soil productivity potential.

* - **Corresponding author's email:** A.majidi@areeo.ac.ir

Cite this article: Majidi, A., 2025. Soil assessment of apple orchards using nutrient index value approach .Journal of Soil Research, 39 (2),pp.205-220.

CC BY

نشریه پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۹ / شماره ۲ / ۱۴۰۴ /۲۲۰-۲۰۵
DOI: 10.22092/IJSR.2025.369856.779

ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV)

عزیز مجیدی*

دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. A.majidi@areeo.ac.ir

« مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۰ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

ارزیابی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب، برای درک سلامت خاک و پتانسیل تولیدی آن بسیار مهم است. این پژوهش به‌منظور ارزیابی برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی با استفاده از روش شاخص ارزش غذایی (NIV) انجام شد. نمونه‌ها از ۱۴۸ نقطه مختلف، هر کدام از عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری یک باغ سیب جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها از نظر توزیع اندازه ذرات، درصد اشباع (SP)، پ‌هاش (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، کربنات کلسیم معادل (CCE)، کربن آلی (OC)، فسفر قابل‌جذب (P_{ava}) و پتاسیم قابل‌جذب (K_{ava}) مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ۷۵٪ خاک‌های مزبور در شرایط قلیایی متوسط تا زیاد با مقدار کربنات کلسیم معادل متوسط تا زیاد (۸۹/۵٪) بودند. نیز، ۷۵٪ نمونه‌ها از نظر کربن آلی خاک در محدوده تا ۱/۱۳-۰/۹٪ قرار داشتند. در ۵۰٪ خاک‌ها، فسفر قابل‌جذب کمتر از ۲/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم (کلاس پایین) و در ۵۰٪ بقیه، فسفر در شرایط بهینه تا زیاد (بیش از ۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. در بیش از ۲۵٪ از خاک‌ها محتوای پتاسیم قابل جذب در حد پایین (۱۴۴ میلی گرم بر کیلوگرم) بود و بیش از ۷۵٪ از آن‌ها در کلاس متوسط تا بالا قرار داشت. به‌طورکلی، ۹۳/۷٪، ۹۳٪، ۸۵/۵٪، ۸۹/۵٪، ۹۸/۶٪، ۹۵/۹٪ و ۸۳/۴٪ به ترتیب برای ویژگی‌های EC، pH، CCE، OC، P_{ava} و K_{ava} خاک در کلاس‌های بالای NIV قرار گرفتند؛ بنابراین، خاک‌های منطقه از ویژگی‌های نسبتاً مطلوبی برای رشد درختان سیب برخوردار بوده و با مدیریت صحیح باغ، تولید سیب باکیفیت مطلوبی قابل‌دستیابی است.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های آهکی، پتانسیل تولیدی خاک، حاصلخیزی خاک.

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: A.majidi@areeo.ac.ir

استناد: مجیدی، ع.، ۱۴۰۴. ارزیابی برخی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی (NIV). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۰۵-۲۲۰.

مقدمه

باغ‌های سیب در ایران، به‌ویژه در استان آذربایجان غربی، از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند. درختان سیب برای تأمین آب و مواد غذایی موردنیاز خود به خاک وابسته هستند .بررسی‌ها نشان داده است که ویژگی‌های خاک، نقش اساسی در رشد، نمو و عملکرد درختان سیب ایفا می‌کنند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعه ویژگی‌های خاک باغ-های سیب، ازجمله مراحل اساسی در مدیریت پایدار و بهینه باغ است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ مارشنر، ۲۰۱۲). خاک سالم و حاصلخیز زمینه‌ساز رشد بهتر درختان، مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها و تولید میوه‌های باکیفیت بالاتر است (کوچوک‌دونمزر و همکاران، ۲۰۲۵). از طرفی، عدم توجه به ویژگی‌های خاک منجر به کاهش عملکرد، مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و برهم خوردن تعادل عناصر غذایی، آلودگی منابع آب و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که درختان سیب به‌ویژه در خاک‌های با pH قلیایی و مقادیر بالای کربنات کلسیم، با محدودیت دسترسی به عناصر غذایی مواجه هستند. این شرایط می‌تواند تأثیری منفی بر جذب فسفر و سایر عناصر غذایی داشته باشد. (وانگ و لی، ۲۰۲۳). علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی، خصوصیات فیزیکی خاک نیز نقش مهمی در ارزیابی حاصلخیزی خاک ایفا می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش سال‌های کاشت علف‌های طبیعی در باغ‌های سیب، میزان ماده آلی خاک افزایش‌یافته و درنتیجه، ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی بهبود می‌یابد. این تغییرات مثبت در خصوصیات فیزیکی خاک می‌تواند منجر به بهبود وضعیت تغذیه‌ای درختان سیب شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در زمینه مدیریت تغذیه‌ای، استفاده از کودهای آلی و معدنی به‌صورت ترکیبی، به‌ویژه در خاک‌های با سطح پایین ماده آلی، می‌تواند تأثیر مثبتی بر وضعیت تغذیه‌ای درختان سیب داشته باشد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ترکیب کودهای NPK همراه با کودهای آلی مانند کود دامی پوسیده، می‌تواند موجب افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود عملکرد درختان سیب شود (من و همکاران، ۲۰۲۳).

در سال‌های اخیر، ارزیابی ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با استفاده از شاخص ارزش غذایی (NIV[1]) به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت تغذیه‌ای و بهبود حاصلخیزی خاک موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته است. این رویکرد به‌ویژه در خاک‌های آهکی و مناطق نیمه‌خشک که با چالش‌های تغذیه‌ای مواجه هستند، کاربرد فراوانی دارد (زاهری عبدهوند، ۲۰۲۲). در تحقیقی در چین، با استفاده از شاخص ارزش غذایی، وضعیت تغذیه‌ای خاک باغ‌های سیب در پنج منطقه عمده تولید سیب بررسی شد. نتایج نشان داد که در بیشتر باغ‌ها کمبودهایی در عناصر کم‌مصرف مانند روی و مس وجود دارد. این مطالعه بر لزوم توجه به کمبود عناصر کم‌مصرف و تنظیم برنامه‌های تغذیه‌ای متناسب با نیاز درختان تأکید دارد (من و همکاران، ۲۰۲۳). دورخوشان (۲۰۲۲) خاک باغ‌های سیب متراکم[2] در عمق‌های ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی-متری را از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی با استفاده از رویکرد شاخص ارزش غذایی بررسی کرده و مشاهده کرد که باغ‌های موردبررسی از نظر عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر، پتاسیم و گوگرد در محدوده متوسط تا بالا قرار داشتند. همچنین در بین عناصر کم‌مصرف نیز تنها عنصر روی مواجه با کمبود بود. مقادیر شاخص ارزش غذایی برای عنصر نیتروژن در شرایط متوسط و برای عنصر روی در محدوده ۱/۵–۱/۲ گزارش شدند. در این پژوهش مشخص شد که این شاخص ارزیابی، می‌تواند به بهینه‌سازی برنامه تغذیه‌ای باغ‌های سیب کمک کند. آداک و پندی (۲۰۲۰) در تحقیقی که با استفاده از شاخص ارزش غذایی انجام گرفت، گزارش کردند که کربن آلی خاک، نیتروژن کل و پتاسیم

[1] Nutrient Index Value

[2] High Density

قابل‌جذب خاک در وضعیت کمبود، فسفر قابل‌جذب خاک و عناصر کم‌مصرف روی، آهن و منگنز در وضعیت کفایت و عنصر مس در وضعیت کمبود قرار داشته و وضعیت حاصلخیزی خاک تأثیر مستقیمی بر میزان محصول باغ می‌گذارد. در این پژوهش چنین نتیجه‌گیری شد که کمبود عناصر غذایی در بیشتر باغ‌ها به‌طور مستقیم به کاهش بهره‌وری و پتانسیل تولیدی باغ می‌انجامد که نیازمند مدیریت هدفمند تغذیه بهینه است. آداک و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعه باغ‌های انبه با استفاده از شاخص ارزش غذایی، نشان دادند که بیشتر عناصر در محدوده پایین تا متوسط بودند. عناصر روی و مس در بیشتر مناطق در محدوده کمبود و عناصر آهن و منگنز نیز غالباً در محدوده پایین یا متوسط بودند. مطالعات انجام‌شده در باغ‌های سیب با تراکم بالا با شاخص ارزش غذایی در کشمیر نشان داد که عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب خاک به ترتیب در محدوده ۲/۵–۲/۲، ۲/۳–۱/۷، ۲/۴۵–۲/۱ و سایر عناصر غذایی شامل گوگرد، آهن، مس، روی و منگنز به ترتیب در محدوده‌های ۲/۰۵–۱/۷، ۲/۶–۲/۵، ۲/۳۵–۱/۹۵، ۱/۵–۱/۲ و ۲/۹–۲/۷ بودند. نتیجه این تحقیق نشان داد که حاصلخیزی خاک باغ‌ها از نظر قابلیت جذب عناصر غذایی در شرایط بهینه و فقط از نظر مقدار روی قابل‌جذب خاک مواجه با کمبود بود (مسرت، ۲۰۱۹).

پژوهش‌های به انجام رسیده مبین این است که استفاده از شاخص ارزش غذایی، می‌تواند در ارزیابی دقیق وضعیت تغذیه‌ای خاک باغ‌های سیب کمک کند. این رویکرد با ارائه تصویری جامع از ویژگی‌های مختلف خاک، امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثرتر در جهت بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش تولید پایدار سیب را فراهم می‌آورد. بر این اساس، این تحقیق با اهداف (۱) ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیائی و حاصلخیزی خاک به‌منظور شناخت شرایط رشدی بهینه خاک در باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص ارزش غذایی، (۲) تحلیل وضعیت تغذیه‌ای خاک و شناسایی محدودیت‌های موجود در جذب عناصر غذایی و ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر نتایج شاخص مذکور برای بهبود تولید و پایدار سیب اجرا شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و ارزیابی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب

برای ارزیابی ویژگی‌های خاک، تعداد ۱۴۸ نمونه مرکب از دو عمق ۳۰–۰ و ۶۰–۳۰ سانتی‌متری خاک از باغ‌های منتخب در شهرستان‌های سلماس (۴۴ نمونه)، ارومیه (۴۹ نمونه)، مهاباد (۴۴ نمونه)، اشنویه (چهار نمونه) و میاندوآب (پنج نمونه) در طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ تهیه شد. نمونه‌های خاک هوا خشک و آسیاب گردیدند و سپس از الک‌های ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل؛ بافت خاک (به روش هیدرومتر)، pH گل اشباع، هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع، کربن آلی به روش دی کرومات پتاسیم، فسفر قابل جذب به روش اولسن و پتاسیم قابل‌جذب با روش استات آمونیوم یک نرمال اندازه‌گیری شدند. کربنات کلسیم معادل نیز به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. همه اندازه‌گیری‌ها مطابق روش‌های استاندارد توصیه‌شده توسط موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شدند (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۳).

برای ارزیابی وضعیت خاک، ابتدا ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در سه کلاس کم، متوسط و زیاد گروه‌بندی شدند. تمامی داده‌های ویژگی‌های خاک با استفاده از دو روش گومز (گومز و گومز، ۱۹۸۴) و مرسوم (قائمیان، ۱۳۸۸) در سه کلاس کم، متوسط و زیاد کلاس‌بندی شدند. برای کلاس‌بندی داده‌های کمی در روش گومز از دو پارامتر آماری میانگین ($\bar{M}$) و انحراف معیار (SD) استفاده شد. برای این منظور هر کدام از ویژگی‌های خاک به کمک روابط زیر و با استفاده از پارامترهای مذکور در سه کلاس کم، متوسط و زیاد

گروه‌بندی شدند. روابط مورداستفاده در روش گومز منطبق بر موارد ذیل بود.

رابطه (۱) کم $M_i \leq \overline{M} - SD$

رابطه (۲) متوسط $\overline{M} - SD < M_i < \overline{M} + SD$

رابطه (۳) زیاد $M_i \geq \overline{M} + SD$

در این روابط، M_i: مقدار کمی ویژگی خاک، $\overline{M}$: میانگین ویژگی خاک در جامعه موردمطالعه، و SD: انحراف معیار ویژگی‌های خاک در جامعه موردمطالعه است.

پس از کلاس‌بندی ویژگی‌های خاک، ارزش شاخص عناصر غذایی برای هرکدام از ویژگی‌های خاک، با استفاده از روش ارائه‌شده توسط پارکر و همکاران (۱۹۵۱) محاسبه شد (رابطه ۴).

رابطه (۴)
$$NIV = \frac{(1 \times N_{Low} + 2 \times N_{Medium} + 3 \times N_{High})}{N_{Low} + N_{Medium} + N_{High}}$$

در این رابطه، NIV ارزش شاخص ویژگی خاک موردمطالعه، N_{Low} تعداد نمونه‌های خاک در کلاس کم، N_{Medium} تعداد نمونه در کلاس متوسط یا بهینه و N_{High} تعداد نمونه در کلاس زیاد می‌باشند. بر مبنای روش فوق، مقادیر محاسبه‌شده NIV کمتر از ۱/۶۷ بیانگر وضعیت کمبود، مقادیر محاسبه‌شده در محدوده ۱/۶۷ تا ۲/۳ مبین وضعیت بهینه و مقادیر بیشتر از ۲/۳۳ وضعیت بیش‌بود یا زیادی را در خاک‌نشان می‌دهند (جدول ۱).

جدول ۱- ارزش مقدارهای شاخص عناصر غذایی و تفسیر آن

کلاس شاخص عنصر غذایی	ارزش	تفسیر
I	<۱/۶۷	کمبود
II	۱/۶۷-۲/۳۳	کفایت
III	>۲/۳۳	بیشبود

نتایج و بحث

روند تغییرات ویژگی‌های خاک در باغ‌های موردمطالعه

تجزیه نمونه‌های خاک نشان داد که از بین تمامی ویژگی‌های خاک فقط دو ویژگی درصد رس و پتاسیم قابل‌جذب دارای توزیع نرمال نبودند (جدول ۲). میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک ۰/۵۹ دسی‌زیمنس بر متر با انحراف معیار ۰/۲۰ بود که در محدوده ۲/۵۶-۰/۱۷ متغیر بود. قابلیت هدایت الکتریکی در ۵۰ درصد نمونه‌ها کمتر از ۰/۵۵ دسی زیمنس بر متر و در ۷۵ درصد آن‌ها کمتر از ۰/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر بود؛ بنابراین، تمامی خاک‌های تحت کشت باغ‌های سیب مناطق موردمطالعه در شرایط غیر شور قرار داشتند (جدول ۲). میانگین pH خاک در باغ‌های موردمطالعه معادل ۷/۹۷ (قلیائی) و انحراف معیار ۰/۲ بود. طبق نتایج، ۲۵ درصد باغ‌های موردمطالعه pH کمی قلیایی و ۷۵ درصد در شرایط قلیایی متوسط تا زیاد بودند. کمترین ضریب تغییرات در بین ویژگی‌های خاک در ویژگی pH مشاهده شد که می‌تواند به دلیل ویژگی ذاتی این پارامتر متأثر از ظرفیت بافری خاک در باغ‌های سیب استان باشد.

جدول ۲- آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های مورد مطالعه

ویژگی خاک	واحد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	چارک اول	چارک دوم	چارک سوم	ضریب تغییرات	آزمون شاپیرو-ویلک
EC	(ds/m)	۰/۵۹	۰/۲۰	۰/۱۷	۲/۵۶	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۶۷	۳۸	**
pH	–	۷/۹۷	۰/۴۹	۷/۳	۸/۴۰	۷/۹	۸/۰	۸/۱	۲	**
SP	(%)	۴۹/۰۱	۸/۰۶	۴/۸	۷۲/۰	۴۴/۰	۴۹/۰	۵۴/۰	۱۶	**
Sand	(%)	۲۴/۱۰	۱۱/۹۳	۱/۴۰	۶۶/۰	۱۵/۶	۲۳/۲۰	۳۰/۵۵	۵۰	**
Silt	(%)	۴۱/۴۸	۷/۵۶	۳/۶۰	۶۴/۶	۳۷/۶۰	۴۱/۰	۴۶/۰	۱۹	**
Clay	(%)	۳۴/۴۵	۹/۴۵	۱۰/۰	۵۷/۶	۲۸/۰	۳۴/۴	۴۱/۰	۲۸	ns
TNV	(%)	۱۳/۲۹	۵/۳۷	۱/۵	۴۸/۰	۱۰/۰	۱۳/۱۵	۱۵/۵	۴۳	**
OC	(%)	۰/۹۳	۰/۳۸	۰/۱۰	۲/۰۳	۰/۶۵	۰/۹۰	۱/۱۳	۴۲	**
P_{ava}	(mg/kg)	۴/۲۵	۴/۴۲	۰/۲۰	۲۲/۶۰	۱/۴۰	۲/۶	۵/۸	۹۹	**
Kava	(mg/kg)	۱۹۹/۰۶	۸۴/۵۲	۱۸/۰	۴۶۲/۰	۱۴۴	۱۹۲	۲۵۳/۰	۴۳	ns

**: کاملاً معنی‌دار در سطح آماری یک درصد؛ ns: غیر معنی‌دار

نتایج مربوط به ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک نشان می‌دهد که دامنه تغییر سه ذره رس، شن و سیلت در اراضی تحت کشت باغ‌های سیب زیاد بود. مقدار شن از ۱/۴- ۶۶ درصد (میانگین ۲۴/۱ درصد)، سیلت از ۳/۶ درصد تا ۶۵ درصد و میانگین ۴۲ درصد و رس از ۱۰ تا ۵۷/۶ درصد با میانگین ۳۴/۵ درصد در این اراضی تغییر می‌کنند. میانگین بافت خاک در این اراضی با در نظر گرفتن میانگین داده‌ها برای هر سه جزء تشکیل‌دهنده بافت خاک، لوم رسی بوده و تغییرات بافت خاک بیشتر در محدوده لومی تا لوم رسی است. کربنات کلسیم معادل یکی از ویژگی‌های مهم خاک بوده و در خاک‌های آهکی بر قابلیت جذب عناصر فسفر، آهن، روی، مس و منگنز تأثیر مستقیمی می‌گذارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). دامنهٔ تغییر این ویژگی از ۱/۵ تا ۴۸ درصد با میانگین ۱۳/۴ درصد بود. ۲۵ درصد اراضی دارای مقدار کربنات کلسیم معادل کمتر از ۱۰ درصد و تقریباً ۵۰ درصد آنها در شرایط نسبتاً آهکی تا آهکی قرار داشتند. نتایج مندرج در جدول (۱)، درصد خاک‌های خیلی آهکی را با مقادیر بیش از ۱۵/۵ درصد کمتر از ۲۵ درصد نشان داد؛ بنابراین، در چنین اراضی، اثرات منفی کربنات کلسیم اضافی بر قابلیت جذب عناصر غذایی و تعادل آنها در خاک باید در مدیریت حاصلخیزی خاک باغ‌ها موردتوجه قرار گیرند (وانگ و هائو، ۲۰۲۲؛ بولان و همکاران، ۲۰۲۳).

میانگین مقدار کربن آلی خاک باغ‌ها ۰/۹۳ درصد با دامنه ۱/۹۳ درصد (۰/۱ تا ۲/۵۳ درصد) بود. پراکنش نسبتاً قابل‌ملاحظه‌ای در بین نمونه‌ها، معادل ۴۲ درصد، ازنظر مقدار کربن آلی خاک وجود داشت. در ۵۰ درصد اراضی میزان کربن آلی کمتر از ۰/۹ و در ۵۰ درصد باقیمانده بیشتر از این مقدار بود (جدول ۱). در خاک‌هایی که مقدار کربن آلی آنها نیز کمتر از ۰/۹ درصد بودند، ۲۵ درصد کمتر از ۰/۶۵ درصد کربن آلی داشتند؛ بنابراین، تنها در ۲۵ درصد این خاک‌ها میزان کربن آلی در کلاس متوسط بوده و در ۷۵ درصد، مقدار آن در کلاس کم ارزیابی شدند (جدول ۲). کمبود ماده آلی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از ویژگی‌های بارز این مناطق محسوب گردیده که ویژگی‌های کیفی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (بولان و همکاران، ۲۰۲۳).

دامنه تغییرات فسفر قابل‌جذب بر مبنای شاخص NIV، از ۰/۲ (کلاس کم) تا ۲۲/۶ (کلاس زیاد) میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. نتایج نشان داد که ۵۰ درصد خاک باغ‌ها دارای فسفر قابل‌جذب کمتر از ۲/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم (کلاس کم) و ۵۰ درصد دارای مقدار بهینه تا زیاد فسفر (بیش از ۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند؛ بنابراین، بر مبنای نتایج بدست آمده برای تولید مقدار بهینه میوه سیب احتمالاً در کمتر از ۵۰ درصد باغ‌های موردبررسی به مصرف کودهای فسفری نیاز است. ضریب تغییرات این عنصر بیشترین مقدار را به

خود اختصاص داد. چنین استنباط می‌گردد که علت احتمالی چنین تغییرات گسترده‌ای، مصرف بی‌رویه کود فسفر بدون در نظر گرفتن نیازهای غذایی درختان سیب در منطقه و تغییرات زیاد این عنصر در یک باغ نسبت به سایر باغ‌ها باشد (جدول ۲). میانگین پتاسیم قابل‌جذب خاک ۱۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم با انحراف معیار ۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در کلاس متوسط (بهینه) قرار گرفت. دامنه تغییرات این عنصر از ۱۸ (کلاس کم) تا ۴۴۲ (کلاس زیاد) میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. بر مبنای این نتایج، در بیش از ۲۵ درصد باغ‌ها، مقدار پتاسیم قابل‌جذب خاک در کلاس کم (۱۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در بیش از ۷۵ درصد آنها در کلاس متوسط تا زیاد قرار داشت (جدول ۲).

ارزش شاخص NIV ویژگی‌های خاک در باغ‌های سیب موردمطالعه

کلاس‌بندی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیائی خاک باغ‌های سیب موردمطالعه به دو روش گومز و مرسوم در جدول (۳) و تعیین ارزش شاخص NIV در جدول (۴) نشان داده‌شده است. کلاس‌بندی و تعیین ارزش شاخص NIV با استفاده از روش گومز نشان داد که مقدار بهینه برای هدایت الکتریکی خاک در محدوده ۰/۸۲–۰/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر و بر مبنای روش مرسوم بین ۳/۶۵–۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر بودند. در هر دو روش گومز و مرسوم اغلب نمونه‌ها در کلاس مطلوب (به‌ترتیب ۸۷ و ۱۰۰ درصد) قرار داشتند. شاخص NIV در روش گومز با ارزش عددی ۲/۰۷ وضعیت ECرا در حد بهینه و در روش مرسوم نیز با ارزش عددی ۲/۰۰ در همان کلاس ارزیابی کرد. حد مطلوب pH خاک در روش گومز در محدوده ۷/۸ تا ۸/۴ و در روش دوم بین ۷/۰ تا ۸/۱ بود. مطابق این کلاس‌بندی ۷۴ درصد نمونه‌ها در روش اول در حد بهینه و ۸۸ درصد در روش دوم در کلاس مطلوب قرار گرفتند. مطابق شاخص NIV، وضعیت خاک باغ‌های موردبررسی از نظر pH در هر دو روش در شرایط مطلوب قرار گرفت. تعداد نمونه‌ها در کلاس کم در روش گومز ۱۴/۵ درصد و در روش دوم صفر درصد بود؛ بنابراین، چنین به نظر می‌رسد در رابطه با این ویژگی، روش گومز ارزیابی واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش مرسوم دارد.

جدول ۳- معیار کلاس‌بندی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی خاک	میانگین $(\overline{\times})$	انحراف معیار (SD)	روش گومز			روش مرسوم		
			کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
EC (ds/m)	۰/۵۹	۰/۲۰	<۰/۳۷	۰/۳۷–۰/۸۲	<۰/۸۲	<۰/۱۹	۰/۱۹–۳/۶۵	<۳/۶۵
pH	۷/۹۷	۰/۴۹	<۷/۸	۷/۸۰–۸/۱۴	<۸/۱۴	<۷/۰۵	۷/۰۵–۸/۱۰	<۸/۱۰
SP (%)	۴۹/۰۱	۸/۰۶	<۴۱/۰۵	۴۱/۰۵–۵۷/۱۳	<۵۷/۱۳	<۴۳	۴۳–۵۳	<۵۳
Sand (%)	۲۴/۱۰	۱۱/۹۳	<۱۱/۹۱	۱۱/۹۱–۳۶/۰۷	<۳۶/۰۷	<۲۰/۰۰	۲۰/۰۰–۴۰/۰۰	<۴/۰۰
Silt (%)	۴۱/۴۸	۷/۵۶	<۳۳/۵۳	۳۳/۵۳–۴۹/۴۳	<۴۹/۴۳	<۲۹/۰۰	۲۹/۰۰–۵۰/۵۰	<۵/۵۰
Clay (%)	۳۴/۴۵	۹/۴۵	<۲۴/۸۵	۲۴/۸۵–۴۴/۰۶	<۴۴/۰۶	<۲۹/۵۰	۲۹/۵۰–۳۱/۰۰	<۳/۰۰
TNV (%)	۱۳/۲۹	۵/۳۷	<۷/۵۸	۷/۵۸–۱۸/۸۶	<۱۸/۸۶	<۶/۰۵	۶/۰۵–۳۳/۰۰	<۳/۰۰
OC (%)	۰/۹۳	۰/۳۸	<۰/۵۳	۰/۵۳–۱/۳۱	<۱/۳۱	<۰/۳۷	۰/۳۷–۱/۴۴	<۱/۴۴
P_{ava} (mg/kg)	۴/۲۵	۴/۴۲	<۰/۰۵	۰/۰۵–۸/۴۲	<۸/۴۲	<۶/۰۰	۶/۰۰–۱۱/۵۵	<۱/۵۵
K_{ava} (mg/kg)	۱۹۹/۰۶	۸۴/۵۲	<۱۱۲/۹۵	۱۱۲/۹۵–۲۸۵/۱۶	<۲۸/۱۶۵	<۱۴۷/۵	۱۴۷/۵–۲۹۱/۷	<۲۹/۷

جدول ۴- کلاس‌بندی، درصد نمونه و ارزش شاخص عناصر غذایی برای ویژگی‌های خاک باغ‌های سیب با دو روش گومز و مرسوم

ویژگی	کلاس‌بندی گومز								کلاس‌بندی مرسوم							
	کلاس آزمون خاک			درصد نمونه‌ها			NIV	طبقه	کلاس آزمون خاک			درصد نمونه‌ها			NIV	طبقه
	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد			کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد		
EC (ds/m)	<۰/۳۷	۰/۳۷-۰/۸۲	<۰/۸۲	۰/۳۷	۸۶/۸	۶/۹	۲/۰۷	بهینه	<۰/۱۹	۰/۱۹-۳/۶۵	<۳/۶۵	۰	۱۰۰	۰	۲/۰۰	بهینه
pH	<۷/۸	۷/۸۰-۸/۱۴	<۸/۱۴	۱۴/۵	۷۳/۷	۱۱/۸	۱/۹۷	بهینه	<۷/۰۵	۷/۰۵-۸/۱۰	<۸/۱۰	۰	۸۷/۵	۱۲/۵	۲/۱۳	بهینه
SP (%)	<۴۱/۰۵	۵۷/۱۳-۴۱/۰۵	<۵۷/۱۳	۱۳/۹	۷۲/۶	۱۳/۵	۲/۰۰	بهینه	<۴۳	۴۳-۵۳	<۵۳	۲۱/۳	۵۰/۷	۲۸	۲/۰۷	بهینه
Sand (%)	<۱۱/۹۱	۳۶/۰۷-۱۱/۹۱	<۳۶/۰۷	۱۸/۹	۶۸/۱	۱۹/۸	۲/۰۱	بهینه	<۲۰/۰۰	۴۰/۰۰-۲۰/۰۰	<۴۰/۰۰	۳۸/۲	۶۱/۸	۰	۱/۶۲	کمبود
Silt (%)	<۳۳/۵۳	۴۹/۴۳-۳۳/۵۳	<۴۹/۴۳	۱۰/۲	۷۶/۶	۱۳/۲	۲/۰۳	بهینه	<۲۹/۰۰	۵۰/۵۰-۲۹/۰۰	<۵۰/۵۰	۵/۱	۸۸/۱	۱۱/۹	۲/۰۶	بهینه
Clay (%)	<۲۴/۸۵	۴۴/۰۶-۲۴/۸۵	<۴۴/۰۶	۱۵/۳	۸۴/۷	۰	۱/۸۵	بهینه	<۲۹/۵۰	۳۱/۰۰-۲۹/۵۰	<۳۱/۰۰	۳۴/۹	۴/۱	۶۱/۰	۲/۲۶	بهینه
TNV (%)	<۷/۵۸	۷/۵۸-۱۸/۸۶	<۱۸/۸۶	۱۰/۵	۷۵/۶	۱۳/۹	۲/۰۳	بهینه	<۶/۰۵	۶/۰۵-۳۳/۰۰	<۳۳/۰۰	۷/۴	۹۱/۹	۰/۷	۱/۹۳	بهینه
OC (%)	<۰/۵۳	۰/۵۳-۱/۳۱	<۱/۳۱	۱۵/۲	۶۸/۶	۱۶/۲	۲/۰۱	بهینه	<۰/۳۷	۰/۳۷-۱/۴۴	<۱/۴۴	۵/۷	۸۴/۵	۹/۸	۲/۰۴	بهینه
Pava (mg/kg)	<۰/۰۵	۰/۰۵-۸/۴۲	<۸/۴۲	۴/۱	۷۹/۷	۱۵/۲	۲/۱۱	بهینه	<۶/۰۰	۶/۰۰-۱۱/۵۵	<۱۱/۵۵	۷۸/۰	۱۳/۹	۸/۱	۱/۳۰	کمبود
Kava (mg/kg)	<۱۱۲/۹۵	۲۸۵/۱۶-۱۱۲/۹۵	<۲۸۵/۱۶	۱۶/۶	۶۵/۸	۱۷/۶	۲/۰۱	بهینه	<۱۴۷/۵	۲۹۱/۷-۱۴۷/۵	<۲۹۱/۷	۲۷/۴	۵۶/۷	۱۶/۹	۱/۹۰	بهینه

حد مطلوب کربنات کلسیم معادل در روش گومز در محدوده ۱۸/۸-۷/۶ درصد و در روش مرسوم ۳۳/۰۰-۶/۰۵ درصد قرار گرفتند. شاخص NIV نشان داد که در روش گومز و مرسوم به ترتیب با ۷۶ و ۹۲ درصد نمونه‌های خاک در وضعیت مطلوب بودند. در کلاس زیاد در روش گومز ۱۳/۵ درصد ولی در روش مرسوم تنها ۰/۷ درصد نمونه‌ها قرار گرفتند؛ بنابراین، در مورد این ویژگی نیز چنین استنباط می‌گردد که روش گومز تحلیل واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش مرسوم ارائه می‌نماید. مقادیر کلاس‌ها برای درصد کربن آلی خاک‌های موردبررسی مانند بیشتر پارامترها در روش اول و در روش دوم در حد بهینه‌ای قرار گرفتند. نتیجه حاصل از شاخص NIV پیش‌بینی‌های نسبتاً مشابهی را برای هر دو روش ارائه داد. بطوریکه در روش اول ۶۸/۶ درصد و در روش دوم ۸۴/۵ درصد در شرایط بهینه ارزیابی نمودند. در رابطه با ویژگی فسفر قابل‌جذب خاک، روش گومز با شاخص NIV برابر ۲/۱۱ در ۷۹/۷ درصد نمونه‌های خاک، وضعیت فسفر قابل‌جذب خاک را مطلوب ارزیابی کرد. در روش مرسوم مقدار این شاخص ۱/۳۰ و در ۷۸/۰ درصد نمونه‌های خاک، کمبود فسفر وجود داشت. در پاسخ به این سؤال که کدام روش ارزیابی بهتری در رابطه با وضعیت فسفر قابل‌جذب خاک در باغ‌های موردمطالعه ارائه می‌نماید، بر اساس داده‌های موجود، امکان ارائه پاسخ امکان‌پذیر نیست زیرا امکان برآورد غلظت بحرانی عناصر در خاک باغ عملاً ممکن نیست (جنتیل و همکاران، ۲۰۲۲). در این رابطه نیاز به نتایج تجزیه برگ باغ‌ها و مقایسه نتایج بدست آمده با دو روش ارزیابی شاخص NIV است. میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک در روش‌های گومز و مرسوم در کلاس کفایت (بهینه) به ترتیب در محدوده‌های ۲۸۵/۱۶-۱۱۲/۹۵ و ۲۹۱/۷-۱۴۷/۵ بوده و ۶۵/۸ و ۵۶/۷ درصد نمونه‌ها نیز در این کلاس قرار گرفتند. هر دو روش شاخص NIV را در شرایط بهینه ارزیابی نموده که بیانگر حاصلخیز بودن اغلب باغ‌های تحت بررسی ازنظر غلظت پتاسیم قابل‌جذب خاک است. در ارزیابی وضعیت ذرات تشکیل‌دهنده خاک در مناطق تحت بررسی، مقدار شاخص NIV برای درصد شن روش اول معادل ۲/۰۱ و در روش دوم برابر ۱/۶۲ بود. بر این مبنا، روش اول وضعیت درصد شن خاک را در خاک باغ‌های سیب موردبررسی بهینه (۶۸/۱ درصد) ولی در روش دوم کم (۳۸/۲ درصد اراضی) ارزیابی نمود. در هر دو روش وضعیت عمومی درصد سیلت و رس در حد مطلوب ارزیابی شدند. همچنین درصد رطوبت وزنی خاک بر مبنای هر دو روش در کلاس مطلوب با مقادیر شاخص NIV معادل ۲/۰۰ و ۲/۰۷ و درصد فراوانی نمونه‌ها در روش‌های گومز و مرسوم برای کلاس فوق به ترتیب معادل ۷۲/۶ و ۵۰/۷ درصد کل نمونه‌های خاک را شامل شد (جدول ۴).

ارتباط بین ویژگی‌های خاک در باغ‌های سیب

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیز افزایش می‌یابد (جدول ۵). این پدیده به‌چند دلیل اتفاق می‌افتد. مواد آلی دارای بار منفی زیادی هستند و با افزایش آنها، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز افزایش می‌یابد. این به معنی نگهداری بیشتر یون‌ها در خاک است که می‌توانند در عصاره اشباع آزاد شوند و باعث افزایش این ویژگی خاک شوند (بردی و ویل، ۲۰۱۶). از طرفی، تجزیه مواد آلی می‌تواند به تولید ترکیبات محلول مانند اسیدهای آلی، یون‌های کلسیم، پتاسیم، نیترات و سایر اکسی آنیون‌ها منجر شود که مستقیماً باعث افزایش غلظت الکترولیت‌ها در محلول خاک می‌شود (اسپارکس، ۲۰۰۳).

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیائی خاک باغ‌های سیب

ویژگی خاک	EC (ds/m)	pH	SP (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	TNV (%)	OC (%)	Pava (mg/kg)	Kava (mg/kg)
EC (ds/m)	۱									
pH	-۰/۰۴۲	۱								
SP (%)	-۰/۰۳۹	-۰/۱۱۹*	۱							
Sand (%)	-۰/۱۱۳*	۰/۱۰۸	۰/۶۲۷**	۱						
Silt (%)	-۰/۰۲۵	۰/۰۷۰	۰/۲۴۵**	-۰/۵۵۹**	۱					
Clay (%)	-۰/۱۴۴*	-۰/۱۹۸**	۰/۵۸۶**	۰/۷۹۰**	-۰/۰۳۹	۱				
TNV (%)	۰/۰۹۹	۰/۱۱۱	-۰/۰۰۹	۰/۰۸۱	۰/۰۷۷	۰/۱۸۱**	۱			
OC (%)	۰/۲۸۰**	-۰/۲۵۶**	۰/۳۶۶**	-۰/۲۶۲**	۰/۱۳۳*	۰/۲۱۴**	۰/۰۱۵	۱		
Pava (mg/kg)	۱۵۴**	-۰/۰۹۶	۰/۰۵۳	-۰/۰۱۴	-۰/۰۵۲	۰/۰۱۵	۰/۰۷۵	۰/۳۵۳**	۱	
Kava (mg/kg)	۰/۰۹۹	-۰/۱۸۷**	۰/۲۵۲**	-۰/۳۹۶**	۰/۰۶۷		۰/۱۲۷*	۰/۳۹۱**	۰/۳۷۸**	۱

با افزایش کربن آلی خاک، فعالیت میکروبی نیز افزایش می‌یابد که به معدنی شدن نیتروژن (تولید نیترات)، گوگرد (تولید سولفات) و سایر عناصر منجر می‌شود. این ترکیبات معدنی محلول، به افزایش هدایت الکتریکی کمک می‌کنند (استیونسون، ۱۹۹۴).

رابطه بسیار قوی و مثبتی بین ویژگی‌های هدایت الکتریکی و میزان فسفر قابل‌جذب خاک وجود داشت. بررسی‌ها نشان داده است که افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع در خاک‌های آهکی، باعث افزایش غلظت فسفر قابل‌جذب خاک می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در خاک‌های آهکی، فسفر عمدتاً با کلسیم واکنش داده و رسوبات غیر محلول مانند کلسیم فسفات تشکیل می‌دهد. زمانی که EC_e افزایش می‌یابد یعنی غلظت یون‌های محلول مانند Na^+ ، K^+، Mg^{2+}، Cl^-، SO_4^{2-}و غیره بالا می‌رود، این یون‌ها با یون‌های کلسیم رقابت می‌کنند و فعالیت شیمیایی یون Ca^{2+} کاهش می‌یابد. این موضوع باعث کاهش رسوب فسفر و افزایش غلظت فسفر محلول و قابل‌جذب در خاک می‌شود. افزایش EC باعث افزایش قدرت یونی محلول خاک شده که به‌نوبه خود ضریب فعالیت فسفات‌ها را بالا می‌برد و می‌تواند انحلال برخی ترکیبات فسفر نامحلول مانند $Ca_5(PO_4)_3OH$ را افزایش دهد. از طرفی در نواحی با EC بالا، گاهی pH به‌صورت موضعی کاهش می‌یابد که خود می تواند حلالیت فسفر را بالا ببرد. از دلایل کاهش موضعی pH، می‌توان به تجزیه مواد آلی توسط میکرو ارگانیسم‌ها و تولید اسیدهای آلی، هیدرولیز نمک‌های محلول مثل سولفات‌ها، تجمع موضعی دی اکسید کربن حاصل از تنفس ریشه‌ها و میکروب‌ها و فرآیندهای اکسایش در نقاطی که شرایط اکسیداسیون و احیا به‌صورت متناوب تغییر می‌کند، اشاره نمود (هینسینگر، ۲۰۰۱).

نتایج رابطه معکوسی بین pH خاک و میزان رس خاک در سطح آماری یک درصد نشان داد (جدول ۵). مطابق بررسی‌های پیشین، وقتی pH خاک افزایش می‌یابد (خصوصاً در خاک‌های آهکی)، چند تغییر مهم در ساختار و رفتار ذرات رس رخ می‌دهد که منجر به کاهش محسوس رس خاک می شود. در خاک آهکی، افزایش pH باعث کاهش حلالیت کلسیم کربنات و تشکیل رسوب در اطراف ذرات رس می شود. این رسوبات، ذرات رس را به هم می‌چسبانند و ضریب تفکیک آن‌ها را کاهش می‌دهند. به‌عبارت‌دیگر، آهک هیدراته در تماس با دی اکسید کربن هوا به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود. این رسوبات بر روی ذرات رس نقش چسباننده دارند و درنتیجه ساختار بزرگ‌تری را ایجاد کرده و توزیع ذرات رس را به طور قابل‌توجهی تغییر می‌دهند. این عامل به همراه همگرایی ذرات خاک باعث کاهش میزان رس آزاد شده در محلول یا آزمایش‌ها اندازه‌گیری می‌شود (رازقی و همکاران، ۲۰۲۴).

بررسی همبستگی آماری داده‌ها نشان داد که بین ویژگی‌های مقدار کربن آلی خاک و pH خاک در سطح آماری یک درصد رابطه معکوسی وجود داشت (جدول ۵). بررسی‌ها نشان داده است که افزایش کربن آلی خاک معمولاً منجر به کاهش pH خاک می‌شود. کربن آلی خاک عمدتاً از بقایای گیاهی، کودهای آلی و مواد هیومیکی تشکیل‌شده است. زمانی که این مواد آلی به خاک افزوده می‌شوند، تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شوند. در طول این فرآیند، اسیدهای آلی (مانند اسید استیک، اسیدلاکتیک و اسیدهای فولویک و هیومیک) تولید می‌گردند که خاصیت اسیدی دارند و منجر به کاهش pH خاک می‌شوند. این اسیدها یون‌های هیدروژ (H^+) آزاد می‌کنند که مستقیماً موجب اسیدی شدن محیط می‌شوند. فعالیت میکروبی ناشی از حضور مواد آلی باعث تولید CO_2 می‌شود. این CO_2 در رطوبت خاک حل‌شده و به‌صورت H_2CO_3 (اسیدکربنیک) درمی‌آید که خاصیت اسیدی دارد. اسیدهای آلی می‌توانند کاتیون‌هایی مثل Ca^{2+}، Mg^{2+}، K^+ را کلاته کنند و از محل‌های تبادل کاتیونی خارج نمایند که باعث افزایش غلظت یون H^+ در محلول خاک و درنتیجه کاهش pH می‌شود (بردی و ویل، ۲۰۱۶).

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بین pH و میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک رابطه معکوسی وجود داشت (جدول ۵). بدین مفهوم که با افزایش pH خاک، میزان قابلیت جذب پتاسیم قابل‌جذب به‌طور کاملاً معنی‌داری کاهش یافت ($P\leq0.01$). افزایش کربن آلی در خاک‌های آهکی معمولاً با چندین مکانیسم مختلف منجر به کاهش پتاسیم قابل‌جذب می‌شود. مواد آلی خاک دارای گروه‌های عاملی با بار منفی هستند که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش می‌دهند (اسپارکس، ۲۰۰۳). این افزایش باعث جذب بیشتر یون‌های پتاسیم در سطح ذرات خاک می‌شود و پتاسیم را از فاز محلول (قابل‌جذب گیاه) جدا می‌کند. خاک‌های آهکی اغلب شامل کانی‌های رسی گروه ۲:۱ (مثل ایلیت و ورمی‌کولیت) هستند که پتاسیم می‌تواند بین لایه‌های آنها به‌صورت یونی تثبیت شود (اسپارکس، ۲۰۰۳). همچنین، در خاک‌های آهکی حضور کربنات کلسیم باعث افزایش pH و شرایط قلیایی می‌شود که بر پایداری ترکیبات پتاسیم تأثیر می‌گذارد و باعث می‌شود پتاسیم بیشتر جذب ذرات خاک شده و به‌صورت غیر قابل‌جذب باقی بماند (شارما و شوکلا، ۱۹۹۷). مطالعه‌ای در خاک‌های آهکی ایران نشان داد که افزایش کربن آلی منجر به کاهش پتاسیم محلول شده است و دلیل اصلی آن افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تثبیت پتاسیم در ساختار کانی‌های خاک توضیح داده شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

درصد اشباع خاک با درصد شن همبستگی منفی معنی‌دار ولی با سایر ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک یعنی درصد سیلت و رس همبستگی مثبت داشت (جدول ۵). ذرات شن باعث افزایش اندازه منفذها می‌شود؛ بنابراین، آب زودتر از این خاک‌ها خارج‌شده و ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد. ذرات سیلت و رس منافذ کوچک‌تر دارند و آب را بهتر نگه می‌دارند (آسوویسز و لیپتک، ۲۰۲۱). همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ویژگی‌های کربن آلی و درصد اشباع خاک مشاهده شد (جدول ۵). افزایش کربن آلی خاک (SOC)[3] به‌طور معمول با افزایش درصد اشباع آب در خاک همراه است. همچنین، SOC چگالی ظاهری خاک را کاهش می‌دهد که نتیجه آن افزایش تخلخل و فضای ذخیره‌سازی آب است. رامیرز و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که افزایش SOC مستقیماً با افزایش ظرفیت نگهداری آب ارتباط دارد و سطح اشباع آب خاک را افزایش می‌یابد؛ بنابراین، در اقلیم‌های خشک، کربن آلی خاک یکی از قوی‌ترین عوامل تعیین‌کننده ظرفیت نگهداری آب در خاک است.

با افزایش درصد شن خاک میزان کربن آلی خاک به‌طور معنی‌دار کاهش یافت، با این وجود همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ویژگی‌های سیلت و کربن آلی خاک وجود داشت (جدول ۵). تحقیقات نشان داده است که افزایش درصد

[3] Soil Organic Matter (SOC)

شن خاک معمولاً باعث کاهش میزان کربن آلی می‌شود. ذرات شن درشت بوده که سطح کمی در واحد جرم ایجاد می‌کنند. نتیجه این‌که ظرفیت جذب و تثبیت مواد آلی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. برعکس، ذرات ریز (سیلت و رس) حجم بالایی از سطح ویژه دارند که به‌ویژه محل جذب ترکیبات آلی بر روی سطح ذرات کانی‌های خاک فراهم می کنند (خوساروف و همکاران، ۲۰۲۴؛ بروفکا، ۲۰۲۴). خاک با درصد شن بالا، اغلب فاقد ساختار دانه‌ای بوده و تخلخل بزرگ دارد. در مقابل، خاک‌های با درصد رس و سیلت بیشتر ساختار بهتری شکل می‌دهند که آب و مواد آلی را در خود نگه می‌دارد (کوسادا و همکاران، ۲۰۲۰). آرونرات و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که درصد شن بالا در خاک‌های شنی شمال شرق تایلند، عمدتاً با کمبود SOC همراه بود. همچنین بین درصد شن خاک و قابلیت استفاده پتاسیم در خاک نیز رابطه کاملاً معنی‌داری وجود داشت به‌طوری‌که با افزایش مقدار شن خاک میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک کاهش یافت.

همبستگی مثبت و قوی بین درصد کربنات کلسیم معادل و درصد رس وجود داشت بطوریکه با افزایش درصد کربنات کلسیم معادل، درصد رس خاک نیز افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). رابطه بین میزان رس خاک و میزان کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های آهکی، از اهمیت بالایی برخوردار است و تحت تأثیر فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی و شیمیایی قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که در خاک‌های آهکی، افزایش مقدار ذرات رس معمولاً با افزایش مقدار کربنات کلسیم معادل همراه است. در بسیاری از خاک‌ها، رس‌ها و کربنات‌ها هر دو از سنگ‌های مادر آهکی و رسوبی منشأ گرفته‌اند و بنابراین در کنار هم وجود دارند (بوهن و همکاران، ۲۰۰۱). در خاک‌های آهکی ایران که اغلب در مناطق خشک و نیمه‌خشک پراکنده‌اند، میزان رس خاک و کربنات کلسیم معادل ارتباط مستقیم و متقابلی باهم دارند. ذرات ریز رس با سطح ویژه زیاد، مکان مناسبی برای جذب یون‌های کلسیم و کربنات‌ها را فراهم می کنند که به‌تدریج منجر به رسوب کربنات کلسیم در خاک می شود (مظفری، ۱۳۹۳). از سوی دیگر، مقدار کربنات کلسیم معادل خاک‌ها معمولاً در خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر بیشتر است؛ زیرا این خاک‌ها دارای شرایط شیمیایی و فیزیکی مساعدتری برای تثبیت کربنات‌ها هستند. همچنین، وجود رس باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده و محیطی با تعادل یونی مناسب برای شکل‌گیری کربنات کلسیم فراهم می‌نماید (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). این روند در خاک‌های آهکی ایران که بیشتر بر پایه سنگ‌های آهکی و دولومیتی تشکیل‌شده‌اند، مشهود است. همچنین عوامل اقلیمی و زیستی مانند تبخیر بالا و فعالیت‌های میکروبی نیز در فرآیند تشکیل کربنات کلسیم مؤثرند (نقیبی، ۱۳۹۵).

همبستگی مثبت و بسیار قوی بین مقدار کربن آلی خاک و فسفر قابل جذب خاک وجود داشت و با افزایش کربن آلی خاک، میزان فسفر قابل‌جذب خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). بررسی‌ها نشان داده است که افزایش کربن آلی خاک می‌تواند موجب افزایش قابلیت جذب فسفر در خاک‌های آهکی شود. این اثر به‌ویژه در خاک‌هایی که دارای کربنات کلسیم هستند، مشهودتر است. کربن آلی با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، می‌تواند دسترسی فسفر را بهبود بخشد. تجزیه کربن آلی با آزادسازی اسیدهای آلی مانند اسید هیومیک و فولیک،pH خاک را کاهش می‌دهد. این کاهش pH موجب کاهش تشکیل فازهای نامحلول فسفر مانند دی کلسیم فسفات می‌شود و درنتیجه فسفر بیشتری در دسترس گیاه قرار می‌گیرد (ون واندراسزکا، ۲۰۰۶). اسیدهای آلی موجود در مواد آلی می‌توانند با فسفات‌ها برای اتصال به سایت‌های جذب در سطح ذرات خاک رقابت کنند. این رقابت منجر به کاهش جذب فسفر توسط ذرات خاک و افزایش دسترسی آن برای گیاه می‌شود. مواد آلی همچنین می‌توانند با یون‌های فلزی مانند آهن و آلومینیوم ترکیب شده و کمپلکس‌های آلی–معدنی تشکیل دهند. این کمپلکس‌ها می‌توانند فسفر را از فازهای

نامحلول آزادکرده و در دسترس گیاه قرار دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند منجر به تجزیه مواد آلی و آزادسازی فسفر از فازهای نامحلول شود (احمد و خان، ۲۰۱۱). چنین روندی نیز بین کربن آلی خاک و میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک وجود داشت. غلظت پتاسیم قابل‌جذب با افزایش کربن آلی خاک به‌طور کاملاً معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). در خاک‌های آهکی، یون‌های کلسیم می‌توانند با پتاسیم رقابت کنند و موجب تثبیت آن شوند. افزایش کربن آلی می‌تواند با کاهش pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، رقابت بین کلسیم و پتاسیم را کاهش داده و درنتیجه دسترسی گیاهان به پتاسیم افزایش یابد. مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند ترکیبات پتاسیم‌دار را تجزیه کرده و پتاسیم را به شکل قابل‌جذب برای گیاه آزاد کنند. ترکیبات آلی می‌توانند با ذرات خاک تعامل کرده و ساختار خاک را بهبود بخشند. این بهبود ساختار می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی، از جمله پتاسیم، در خاک شود (کوسادا و همکاران، ۲۰۲۰؛ ستئوارد و همکاران، ۲۰۰۷).

همبستگی مثبت و معنی‌داری نیز بین فسفر و پتاسیم قابل‌جذب وجود داشت، بطوریکه، با افزایش غلظت یکی، غلظت دیگری نیز به‌طور معنی‌دار افزایش یافت (جدول ۵). همبستگی مثبت بین فسفر و پتاسیم قابل‌جذب در خاک‌های آهکی نتیجه تعامل پیچیده بین منابع تغذیه‌ای (کودها)، ویژگی‌های شیمیایی خاک ($CaCO_3$ ،CEC)، رفتار تثبیت و آزادسازی تدریجی فسفر و نقش مواد آلی است. کاربرد دائمی کودهای فسفاته و پتاسیمی و حتی کودهای دامی و آلی باعث افزایش هم‌زمان سطح حاصلخیزی خاک از این دو عنصر می شود. مطالعه‌ای در منطقه مدیترانه نشان داد که اراضی کشاورزی دارای مقادیر بالای فسفر و پتاسیم قابل‌جذب هستند. در این مناطق، کودهای فسفره معمولاً همراه با کود پتاسیمی استفاده شده که منجر به افزایش هم‌زمان قابلیت جذب هر دو عنصر در خاک می‌شود (اورتز و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی، خاک‌های آهکی دارای یون‌های کلسیم زیاد هستند که باعث تأثیر بر جذب کاتیون‌های دیگر مانند پتاسیم می‌شود. وقتی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بالاست، هم فسفر و هم پتاسیم بهتر در دسترس گیاه قرار می‌گیرند. فسفر تثبیت‌شده با کربنات کلسیم به شکل فازهای دارای انحلال آهسته باقی می‌ماند و با گذشت زمان به‌تدریج تبدیل به فسفر قابل‌جذب می‌شود (لیتم و میکلسن، ۲۰۰۵). وقتی فسفر افزوده می‌شود و تثبیت می‌شود، بخشی از آن در طی زمان آزاد می‌گردد؛ در همین زمان کودهای پتاسیم نیز همزمان اضافه شده و بنابراین، در نمونه‌های خاک همبستگی مشاهده می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین بررسی‌ها نشان داده است افزودن کود دامی یا مواد آلی، علاوه بر تأمین P و K، با آزادسازی اسیدهای آلی، توان بازیافت فسفر را افزایش می‌دهد (مور و همکاران، ۲۰۱۴).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی بر اساس شاخص ارزش غذایی انجام گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که خاک باغ‌های سیب در استان آذربایجان غربی، با وجود تنوع در برخی ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی، به‌طورکلی از وضعیت نسبتاً مطلوبی برای رشد و تولید سیب برخوردارند. مقادیر بالای pH و کربنات کلسیم معادل، بیانگر غلبه شرایط قلیایی در منطقه است که می‌تواند بر دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر تأثیرگذار باشد. با این حال، توزیع فسفر قابل جذب نشان داد که نیمی از خاک‌ها در محدوده بهینه تا بالا قرار دارند و وضعیت پتاسیم نیز عمدتاً در کلاس متوسط تا مطلوب ارزیابی شد. درصد کربن آلی در اکثر نمونه‌ها پایین تا متوسط بود که اهمیت توجه به مدیریت

مواد آلی خاک را برجسته می‌کند. در نهایت، یافته‌ها نشان داد که خاک باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی علی‌رغم داشتن برخی محدودیت‌ها، در مجموع از پتانسیل بالایی برای تولید برخوردارند. فرضیه تحقیق مبنی بر مناسب بودن ویژگی‌های خاک در شرایط مدیریت صحیح، مورد تأیید قرار گرفت. مهم‌ترین چالش‌ها شامل قلیائیت بالا و کمبود ماده آلی هستند که با مدیریت‌های اصلاحی قابل رفع می‌باشند؛ بنابراین، با اعمال مدیریت علمی و بهره‌گیری از شاخص‌های ارزیابی مانند شاخص ارزش غذایی می‌توان تصمیمات مدیریتی مبتنی بر داده اتخاذ کرده و عملکرد و کیفیت محصول را بهینه نمود.

فهرست منابع

۱. سعیدی، م، رضایی، ع، کاظمی، م. ۱۳۹۷. بررسی رابطه بین بافت خاک و کربنات کلسیم معادل در خاک‌های آهکی منطقه خوزستان. *مجله علوم خاک ایران*، ۱۱(۴)، ۵۹-۷۰ https://doi.org/20.1001.1.2008479.1389.41.2.7.8.

۲.

۳. شهبازی، ک. ۱۴۰۳. روش های تجزیه خاک نمونه‌برداری، روش‌های شیمیایی و فیزیکی. چاپ اول، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران. ۱۰۷۴ صفحه

۴. قائمیان، ن، حسنی، ق، طهماسبی، ک، نعمتی، ط، مسیح آبادی، م. ح. ۱۳۸۸. درجه‌بندی ویژگی‌های اراضی و نیازهای زویشی سیب جهت تهیه جداول پایه تناسب اراضی در استان آذربایجان‌غربی. گزارش نهائی، شماره ۷۷۰/۸۹، موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران. ۴۷ صفحه.

۵. محمدی، م، رضایی، ن. و حسینی، ر. ۱۳۹۵. تأثیر مواد آلی بر تثبیت پتاسیم در خاک‌های آهکی ایران. *مجله علوم خاک ایران*، دوره ۲۳، ۴، ۵۲۱-۵۳۰.

۶. مظفری، ع. ۱۳۹۳. شناخت و اصلاح خاک‌های آهکی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۷. نقیبی، ح. ۱۳۹۵. تأثیر شرایط اقلیمی بر تشکیل کربنات کلسیم در خاک‌های مناطق خشک ایران. پژوهش‌های خاک و آب ایران، ۲۰(۳)، ۳۳-۴۵.

8. Adak, T. and Pandey, G., 2020. Estimating soil nutrient index vis− à− vis mango orchard productivity of Lucknow region, Uttar Pradesh, India. *Tropical Plant Research*, 7(3), pp.622-626. DOI:10.22271/tpr.2020.v7.i3.077
9. Adak, T., Pandey, G., Singh, V.K. and Rajan, S., 2019. Assessing soil nutrient index in mango orchards of Maal area, Lucknow, UP. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(3), pp.263-267. DOI:10.5958/2455-7145.2019.00037.7
10. Ahemad, M., and Khan, M. S., 2011. Assessment of plant growth promoting activities of phosphate solubilizing bacteria in calcareous soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174(1), 533–546. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1471-3
11. Arunrat, N., Kongsurakan, P., Sereenonchai, S. and Hatano, R., 2020. Soil organic carbon in sandy paddy fields of Northeast Thailand: A review. *Agronomy*, 10(8), p.1061. DOI:10.3390/agronomy10081061
12. Brady, N.C., 1984. The nature and properties of soils. 15th Edition. Pearson Education.
13. Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A., 2001. Soil Chemistry 3rd Edition. Canada: John & Wiley Sons. Inc. http://dx. doi. org/10.1002/jpln. 19861490315.
14. Stevenson, F.J., 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons.

15. Bertrand, I.H.R.A., Holloway, R.E., Armstrong, R.D. and McLaughlin, M.J., 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Soil Research*, 41(1), pp.61-76. https://doi.org/10.1071/SR02021(publish.csiro.au)
16. Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C.S., Satyanaraya, P.V., Anderson, G.C., Bolan, S., Nortjé, G.P., Kronenberg, R., Bardhan, S., Abbott, L.K. and Zhao, H., 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in agronomy*, 182, pp.81-130. DOI: 10.1016/bs.agron.2023.06.002
17. Durkhshan, S., 2022. Nutrient Indexing of High Density Apple Orchards of SKUAST-K, Shalimar (Doctoral dissertation, SKUAST Kashmir).
18. Gentile, R.M., Boldingh, H.L., Campbell, R.E., Gee, M., Gould, N., Lo, P., McNally, S., Park, K.C., Richardson, A.C., Stringer, L.D. and Vereijssen, J., 2022. System nutrient dynamics in orchards: a research roadmap for nutrient management in apple and kiwifruit. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), p.64. DOI:10.1007/s13593-022-00798-0
19. Gomez, K.A. and Gomez, A.A., 1984. *Statistical procedures for agricultural research*. John wiley & sons.
20. Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), pp.173-195. DOI:10.1023/A:1013351617532
21. Khosravi, V., Gholizadeh, A., Žížala, D., Kodešová, R., Saberioon, M., Agyeman, P.C., Vokurková, P., Juřicová, A., Spasić, M. and Borůvka, L., 2024. On the impact of soil texture on local scale organic carbon quantification: From airborne to spaceborne sensing domains. Soil and Tillage Research, 241, p.106125. DOI:10.1016/j.still.2024.106125
22. Leytem, A.B. and Mikkelsen, R.L., 2005. The nature of phosphorus in calcareous soils. Better Crops, 89(2), pp.11-13.
23. Marschner, H., 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
24. Küçükdönmezer, B., Şeker, C. and Negiş, H., 2025. Influence of Soil Quality on Apple Yield: Evaluating Physical, Chemical, and Biological Indicators in Semi-dwarf Orchards. Applied Fruit Science, 67(3), pp.1-14. DOI:10.1007/s10341-025-01410-x
25. Masrat, M., 2019. Characterization, Classification and Nutrient Indexing of High Density Apple Orchard Soils of North Kashmir (Doctoral dissertation, SKUAST Kashmir).
26. Men, X., Fan, Z., Wang, Y., Wang, Y., Wang, Y. and Han, Z., 2023, March. Evaluation of fertilizer inputs and soil nutrient status in apple orchards in China. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2463, No. 1, p. 012069). IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/2463/1/012069
27. Moore, A., Hines, S., Brown, B., Falen, C., de Haro Marti, M., Chahine, M., Norell, R., Ippolito, J., Parkinson, S. and Satterwhite, M., 2014. Soil–Plant Nutrient Interactions on Manure-Enriched Calcareous Soils. *Agronomy Journal*, 106(1), pp.73-80. DOI:10.2134/agronj2013.0345
28. Ortiz, C., Pierotti, S., Molina, M.G. and Bosch-Serra, À.D., 2023. Soil fertility and phosphorus leaching in irrigated calcareous soils of the Mediterranean region. Environmental Monitoring and Assessment, 195(11), p.1376. DOI:10.1007/s10661-023-11901-7
29. Nelson, D.W., Sommers, L.E., Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy monograph, 9, pp.539-579.
30. Parker, F.W., Nelson, W.L. and Winters, E., 1951. The broad interpretation and application of soil test information. *Agronomy Journal*, 43, pp.105-112.

31. Quesada, C.A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Phillips, O.L., Saiz, G. and Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. Soil, 6(1), pp.53-88. DOI:10.5194/soil-2019-24
32. Ramírez, P.B., Machado, S., Singh, S., Plunkett, R. and Calderón, F.J., 2023. Addressing the effects of soil organic carbon on water retention in US Pacific Northwest wheat–soil systems. Frontiers in Soil Science, 3, p.1233886. DOI:10.3389/fsoil.2023.1233886
33. Razeghi, H.R., Safaee, F., Geranghadr, A., Ghadir, P. and Javadi, A.A., 2024. Investigating accelerated carbonation for alkali activated slag stabilized sandy soil. Geotechnical and Geological Engineering, 42(1), pp.575-592. DOI:10.1007/s10706-023-02590-7
34. Sharma, M.P., & Shukla, A.K., 1997. *Soil Chemistry*. Rastogi Publications.
35. Sharpley, A.N. 1996. Availability of phosphorus to plants in relation to soil factors and P removal processes. *Plant and Soil*, 198, pp. 71–77.
36. Sparks, D.L., 2003. Environmental soil chemistry: An overview. *Environmental soil chemistry*, 2, pp.1-42.
37. Von Wandruszka, R., 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. Geochemical transactions, 7, pp.1-8. https://doi.org/10.1186/1467-4866-7-6
38. Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F. and Six, J., 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86, pp.19-31. DOI:10.2136/sssaj2007.0104
39. Usowicz, B. and Lipiec, J., 2021. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, 11(1), p.8293. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3
40. Yang, M., Wang, S., Zhao, X., Gao, X. and Liu, S., 2020. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau. Science of the Total Environment, 723, p.138041. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138041
41. Zhang, W., Lu, J.S., Bai, J., Khan, A., Zhao, L., Wang, W., Zhu, S.G., Liu, S.T., Jin, J.M., Nyanchera, G.D. and Li, S.Q., 2024. Reduced fertilization boosts soil quality and economic benefits in semiarid apple orchard: A two-year appraisal of fertigation strategy. *Agricultural Water Management*, 295, p.108766. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108766
42. Zhang, S., Wang, L., Chen, S., Fan, B., Huang, S. and Chen, Q., 2022. Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: Insights from a long term study with equal phosphorus input. *Journal of Environmental Management*, 306, p.114451. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114451
43. Zhang, M., Li, C., Li, Y. C., & Harris, W. G., 2014. Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils. *Geoderma*. 232, pp. 164-171. DOI:10.1016/j.geoderma.2014.05.015
44. Zaheri Abdehvand, Z., Karimi, D., Rangzan, K. and Mousavi, S.R., 2024. Assessment of soil fertility and nutrient management strategies in calcareous soils of Khuzestan province: A case study using the Nutrient Index Value method. Environmental Monitoring and Assessment, 196(6), p.503. DOI:10.1007/s10661-024-12665-4
45. Zhou, M. and Li, Y., 2001. Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), pp.1404-1412. DOI:10.2136/sssaj2009.0137
46. Wang, X.Q., Zhang, X.C., Pei, X.J. and Ren, G.F., 2022. Effect of the particle size composition and dry density on the water retention characteristics of remolded loess. *Minerals*, 12(6), p.698. DOI:10.3390/min12060698

47. Wang, J., & Li, X. (2023). Comprehensive analysis of soil physicochemical properties and nutrient status in apple orchards. *Agronomy*, 15(14), 1520. DOI:10.3390/horticulturae9080903
48. Wang, Z., Liu, R., Fu, L., Tao, S. and Bao, J., 2023. Effects of orchard grass on soil fertility and nutritional status of fruit trees in Korla fragrant pear orchard. *Horticulturae*, *9*(8), p.903. DOI:10.3390/horticulturae9080903
49. Wang, S., Xu, L. and Hao, M., 2022. Impacts of long-term micronutrient fertilizer application on soil properties and micronutrient availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), p.16358. DOI: 10.3390/ijerph192316358. PMID: 36498430; PMCID: PMC9736148.