Research Article

Agricultural Engineering., 44(3) (2021) 275-294
DOI: 10.22055/AGEN.2021.38284.1613

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Assessing soil fertility index using Fuzzy-AHP and parametric methods for tea cultivation with different productivities

H. Fayyaz [1], N. Yaghmaeian [2*], A. Sabouri [3] and A. Shirinfekr [4]

1. MSc., Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran
3. Associated Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran

Received: 17 August 2021 Accepted: 20 December 2021

Abstract

Introduction: The rapid growth of population demands higher land use efficiency to ensure food security. The most appropriate way to reach this goal is to increase yield per unit area. In this regard, the assessment of soil fertility and productivity is a prerequisite for developing sustainable agriculture. Soil fertility indicates the soil capability to provide optimum conditions for plant growth. Assessing soil fertility is an essential need to identify environmental-friendly strategies leading to more sustainability in agricultural systems. Soil fertility directly and indirectly affects the yield and crop quality. In order for food security and increased food production to be achieved, the development of a useful method for assessing soil fertility and productivity is fundamental. Various modeling techniques have been proposed as a useful tool to determine soil fertility. An assessment of the soil fertility status by using a soil index could provide key information to improve strategies and effective techniques for the future to achieve sustainable agriculture. The present study was conducted: (1) to determine the soil fertility index (SFI) using two methods which are conceptually different from each other including: Fuzzy-AHP and parametric methods; (2) to identify the main soil limiting factors for tea production; and (3) to compare two methods of quantitative assessment of soil fertility in relation to tea yield in tea cultivation with different productivities in west Guilan province.

Materials and Methods: Based on the mean annual tea yield, the selected tea cultivation were divided into low, medium, and high productivity. Sixty-six soil samples were collected from 0 to 30 cm depth. The green tea leaves were harvested at a 2 m^2 plot at each site. In this research, clay, silt, and sand content, mean weight diameter of soil aggregates, bulk density, soil pH, electrical conductivity, soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, available copper, and zinc were measured by conventional methods. Then, the soil fertility indices of tea cultivation with different productivities were determined by fuzzy-analytical hierarchy process (SFI-Fuzzy AHP) and Parametric (SFI-Parametric) analyses. The Fuzzy analytical hierarchy process is a combination of factor weights of AHP with the fuzzy values of each parameter. The product of values generated from individual fuzzification of parameters with their corresponding factor weights. All soil parameters were tested using one-way analysis of variance and the differences among means were analyzed using Tukey's

© 2021 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

significant difference test at the probability level of 0.05.The coefficients of determination for the linear regression between the two SFI values and tea yields were conducted.

Results and Discussion: Results indicated that the effect of pH, available potassium and copper, mean weight diameter, and bulk density on tea yield was significant ($p < 0.01$). The highest of organic carbon, mean weight diameter, available potassium and copper were obtained in high productivity. The highest of soil pH and bulk density were related to low productivity. The main soil limiting factors for tea production were soil organic carbon, available potassium, and soil pH. The results showed that for both SFI-Fuzzy AHP and SFI-Parametric methods, the highest and lowest soil fertility indices were related to high and low productivity, respectively. The mean SFI- Fuzzy AHP of the high productivity tea were significantly higher than low productivity tea cultivation. It was found that SFI- Fuzzy AHP is superior to SFI-Parametric to evaluation of soil fertility for tea production .So that, the correlations between crop yields and SFI- Fuzzy AHP ($R^2= 0.63$) is higher than SFI-Parametric ($R^2= 0.50$).

Conclusion: Understanding the soil fertility status is one of the important aspects of sustainable soil management in order to optimal crop production and prevent environmental degradation. Considering the importance of yield as an important indicator in the sustainable management of agricultural ecosystems, it is expected that there is great potential for increasing crop yield by improving soil fertility. The SFI- Fuzzy AHP of the high productivity tea were significantly higher than low productivity tea cultivation and created more differentiation between various soil fertility classes in tea cultivation. Therefore, determining the soil fertility index by Fuzzy-AHP method to evaluate the soil fertility of tea cultivation is superior to the parametric method. Based on the obtained results, it is suggested that for the optimal tea production, in addition to the application of potassium fertilizer, the exact amount of which should be estimated based on the soil test results, the organic matter application should also be considered.

Keywords: Soil fertility index, yield limiting factors, fuzzy-AHP, Tea cultivation

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۴ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰

مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص حاصلخیزی خاک با استفاده از روش‌های Fuzzy-AHP و پارامتریک در باغ‌های چای با عملکرد متفاوت

حورا فیاض[۱]، نفیسه یغمائیان[۲*]، عاطفه صبوری[۳] و احمد شیرین فکر[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، ایران
۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، ایران
۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، ایران
۴- مربی پژوهش، گروه فناوری و مدیریت تولید، پژوهشکده چای، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، لاهیجان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلمات کلیدی:

شاخص حاصلخیزی خاک

عوامل محدودکننده عملکرد

فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی

چای

* عهده دار مکاتبات

Email:yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

چکیده

خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای محیط زیست بوده و حاصلخیزی آن به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تغییرات کمیت و کیفیت محصول مؤثر است. به‌منظور تأمین امنیت غذایی، توسعه یک روش مناسب برای ارزیابی حاصلخیزی و بهره‌وری خاک از اهمیت زیادی برای تولید محصول برخوردار است. این پژوهش با هدف تعیین شاخص حاصلخیزی خاک با دو روش Fuzzy-AHP و پارامتریک، شناسایی عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک و مقایسه دو روش ارزیابی کمی حاصلخیزی خاک در ارتباط با عملکرد در باغ‌های چای غرب استان گیلان انجام گرفت. در مجموع ٦٦ نمونه خاک مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر و برگ سبز چای در کرتی به وسعت ۲ متر مربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک از بخشی از باغ‌های چای با عملکرد متفاوت برداشت شد. سپس شاخص حاصلخیزی خاک با دو روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (SFI- Fuzzy AHP) و پارامتریک (SFI- Parametric) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی، پتاسیم قابل دسترس و pH از اثرگذارترین معیارهای حاصلخیزی خاک برای تولید چای در منطقه مطالعاتی هستند. برای هر دو شاخص SFI- Fuzzy AHP و SFI- Parametric بیش‌ترین و کمترین شاخص حاصلخیزی خاک به ترتیب مربوط به باغ با عملکرد بالا و پایین بود. شاخص حاصلخیزی SFI- Fuzzy AHP در باغ‌های با عملکرد بالا و پایین از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند. همچنین همبستگی بین عملکرد چای و شاخص SFI- Fuzzy AHP (R^2 =۰/٦۳)، بیش‌تر از شاخص SFI- Parametric (R^2 =۰/۵۰) بود. بنابراین تعیین شاخص حاصلخیزی خاک با روش Fuzzy-AHP برای ارزیابی حاصلخیزی خاک اراضی چای‌کاری بر روش پارامتریک برتری دارد.

مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای محیط زیست بوده و بسیاری از ویژگی‌های آن بر روی رشد و عملکرد گیاه تأثیر معنی‌دار داشته و تغییر در این ویژگی‌ها تغییرپذیری عملکرد را در پی خواهد داشت. عدم یکنواختی ویژگی‌های خاک در یک منطقه، تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی (مانند مواد مادری و عوامل خاکسازی) و عوامل غیرذاتی یا بیرونی (مانند اقدامات مدیریتی خاک و مزرعه، کوددهی و نوع محصولات کشاورزی) می‌باشد (۶۰) که به طور مستقیم و غیر مستقیم بر تغییرات کمیت و کیفیت محصول اثرگذار است (۴۹). بنابراین شناخت تغییرات ویژگی‌های خاک و ارتباط آن‌ها با پاسخ گیاه اساساً می‌تواند اثر بخشی نهاده‌ها و در نهایت افزایش تولید محصول در واحد سطح را در پی داشته باشد (۵۵).

تامین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد، کاربری کارآمدتر اراضی را می طلبد. مناسبترین راه برای دستیابی به این هدف افزایش عملکرد در واحد سطح است. در این راستا، ارزیابی حاصلخیزی و بهره‌وری خاک از اهمیت زیادی برای تولید محصول برخوردار است (۲۵). کشت فشرده گونه‌های پرمحصول به‌منظور افزایش تولید مواد غذایی، تخلیه قابل توجه عناصر غذایی ذاتی خاک را به همراه دارد (۲۹). اگرچه حاصلخیزی، تراکم‌پذیری و فرسایش خاک از اجزای کیفیت خاک محسوب می‌شوند، اما حاصلخیزی خاک نقش اصلی و مستقیم در کاهش تولید محصول دارد (۲۴). بررسی وضعیت حاصلخیزی خاک نقش اساسی در برنامه‌ریزی پایدار کشاورزی، افزایش سود اقتصادی، حفظ کیفیت خاک و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست دارد.

به دلیل تغییرات زیاد درون مزرعه‌ای و ماهیت پویای عناصر غذایی خاک، روش‌های رایج ارزیابی حاصلخیزی خاک اطلاعات کافی را در اختیار کشاورزان قرار نمی‌دهد؛ بنابراین نیاز است از روش‌های مدرن‌تری در کشاورزی دقیق استفاده شود. در این راستا روش فازی یکی از بهترین مدل‌هایی است که جهت بررسی وضعیت حاصلخیزی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش ماهیت پیوسته تغییرات اراضی را در نظر گرفته و در انعکاس تغییرپذیری ویژگی‌های خاک کارآیی بیشتری دارد (۴۷). نظریه مجموعه‌های فازی در علوم محیطی از جمله ارزیابی تناسب اراضی، طبقه‌بندی حاصلخیزی خاک، آمار مکانی خاک و شاخص‌های کیفیت خاک مورد استفاده قرارگرفته‌است (۳۹ و ۴۰). فرایند تحلیل سلسله مراتبی[1] (AHP) به عنوان یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم-گیری‌های چندمعیاری مطرح است. در این روش با توجه به اینکه ویژگی‌های مؤثر در حاصلخیزی خاک دارای تأثیر متفاوتی بر روی رشد گیاه می‌باشند، هرکدام بر اساس درجه اهمیتی که دارند، طبق نظرات کارشناسان، وزن‌دهی می‌شوند (۳۳). اما ایراد اصلی AHP این است که نظرات و قضاوت‌های کارشناسی را به شکل اعداد صلب[2] ۱ تا ۹ نشان می‌دهد، این مسئله، عدم قطعیت مربوط به قضاوت‌ها را برطرف نمی‌کند. برای برطرف کردن این محدودیت، تلفیق نظریه مجموعه‌های فازی با تکنیک AHP پیشنهاد شده است (۵۰). چنین رویکردی به شناسایی عوامل اصلی محدودکننده تولیدات کشاورزی منجر شده و امکان اعمال سطوح بالای مدیریت اراضی را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌آورد و می‌تواند افزایش بهره‌وری اراضی را به همراه داشته باشد (۴۲).

باقرزاده و همکاران[3] (۵) به‌منظور بررسی شاخص حاصلخیزی خاک با استفاده از روش‌های تلفیقی فازی و AHP برای تولید سیب زمینی در شمال‌شرق ایران به این

1- Analytic Hierarchy Process; AHP
2- Crisp number
3- Bagherzadeh *et al.*

نتیجه رسیدند که بین شاخص حاصلخیزی خاک و عملکرد سیب‌زمینی همبستگی بالایی (R^2 = ۰/۹۱) وجود دارد که می‌تواند تأییدی بر پهنه‌بندی کلاس‌های حاصلخیزی خاک در منطقه باشد. چن و همکاران[1] (۱۰) در پژوهشی از توابع عضویت فازی برای تهیه نقشه حاصلخیزی در مزارع گندم و سویا در چین استفاده و گزارش کردند که نتایج حاصل از این روش با واقعیت تطابق بیش‌تری نشان می‌دهند. ازغدی و همکاران[2] (۱) در پژوهشی به‌منظور تهیه نقشه حاصلخیزی خاک جهت کشت گندم در دشت شاوور استان خوزستان از مدل AHP و منطق فازی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تهیه نقشه حاصلخیزی به‌صورت تفکیکی می‌تواند به عنوان گامی اولیه و مؤثر در مطالعات حاصلخیزی خاک و استفاده بهینه از کودها مطرح باشد. تانکای و (۵۲) با بررسی شاخص حاصلخیزی خاک در اراضی کشاورزی منطقه نیمه خشک ترکیه بیان کردند که می توان از شاخص حاصلخیزی خاک برای تعیین پتانسیل باروری خاک برای رشد گیاه و مدیریت پایدار آن بهره گرفت.

درک صحیح وضعیت حاصلخیزی خاک یکی از جنبه‌های مهم تولید پایدار محصولات کشاورزی است و اطلاعات کلیدی را برای بهبود استراتژی‌ها و تکنیک‌های موثر برای دستیابی به کشاورزی پایدار فراهم می‌کند. با این حال تا کنون، هیچ پایگاه داده‌ای برای وضعیت حاصلخیزی خاک‌ها و اطلاعات در مورد شاخص‌های حاصلخیزی خاک‌های ایران وجود ندارد؛ هرچند که مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده است. این پژوهش با هدف تعیین شاخص حاصلخیزی خاک با دو روش Fuzzy-AHP و پارامتریک، شناسایی عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک و مقایسه دو روش ارزیابی کمی حاصلخیزی خاک در ارتباط با عملکرد چای در باغ‌های چای غرب استان گیلان انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و نمونه‌برداری

منطقه مورد مطالعه در باغ‌های چای واقع در شهرستان‌های فومن (باغ‌های معین (عملکرد پایین) و سنگ‌بیجار (عملکرد بالا)) و شفت (باغ پسیخان (عملکرد متوسط)) استان گیلان قرار دارد. بر اساس اطلاعات دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ ایستگاه هواشناسی رشت، میانگین درجه حرارت سالیانه، ۱۵/۸ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالیانه، ۱۳۳۷ میلی‌متر می‌باشد. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک، به‌ترتیب یودیک و ترمیک و سیمای اراضی منطقه، اراضی پست با شیب کمتر از ۲ درصد است. در مجموع ۶۶ نمونه خاک مرکب (۲۰ نمونه از باغ معین، ۳۰ نمونه از باغ سنگ‌بیجار و۱۶ نمونه از باغ پسیخان) به روش نمونه‌برداری تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در فاصله بین ردیف‌های چای برداشت شد. ۳۳ نمونه برگ سبز چای در پلاتی به وسعت ۲ متر مربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک برداشت شد. به‌منظور تعیین متوسط عملکرد چای (وزن تر)، یک غنچه و دو برگ انتهایی چای در سه برداشت متوالی بهاره (بهار ۱۳۹۸) از سطح مذکور برداشت شد. به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش لازم بود باغ‌های چای با عملکردهای متفاوت به گونه‌ای انتخاب شوند که شرایط اقلیمی، عملیات کشاورزی و مدیریت زراعی در آنها تقریباً یکسان باشد. بر این اساس سه باغ مورد مطالعه تحت مدیریت واحد یک باغدار و با سیستم آبیاری بارانی قرار داشتند.

نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله توزیع ذرات خاک (رس، سیلت و شن) به‌روش هیدرومتری (۲۰)، میانگین وزنی قطر

1- Chen *et al.*
2- Azghadi *et al.*
3- Tuncay *et al.*

خاکدانه‌ها (MWD)[1] به‌روش الک تر (۲۶)، جرم مخصوص ظاهری به‌روش کلوخه و پارافین (۷)، pH عصاره اشباع توسط دستگاه pH متر و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج (۲۸)، کربن آلی خاک به‌روش اکسیداسیون تر (۵۶)، نیتروژن کل به‌روش کجلدال (۲۲)، فسفر قابل دسترس در خاک به‌روش اولسن (۳۷)، غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک به‌روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با دستگاه فلیم فوتومتر (۲۸) و غلظت روی و مس قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با DTPA و قرائت با دستگاه جذب اتمی (۳۰) اندازه‌گیری شدند.

شاخص حاصلخیزی خاک به روش Fuzzy AHP

با توجه به اینکه ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، به‌منظور اینکه بتوان آنها را در قالب یک شاخص کلی بیان کرد، باید ویژگی‌ها را بی‌واحد کرد. برای این منظور از توابع عضویت فازی به‌عنوان توابع نمره‌دهی[2] استفاده شد. در حقیقت توابع عضویت فازی در مجموعه‌هایی که اصطلاحاً آن‌ها را مجموعه‌های فازی می‌نامند، تعریف می‌شوند (۵۹). در این مطالعه برای ویژگی‌هایی که با افزایش و یا کاهش مقدار آن‌ها، باروری خاک بهبود می‌یابد، به‌ترتیب توابع بیشتر-بهتر[3] (رابطه ۱) و کمتر-بهتر[4] (رابطه ۲) و برای ویژگی‌هایی که دارای دامنه بهینه هستند، از تلفیق دو رابطه استفاده شد. به این ترتیب به هر یک از ویژگی‌های خاک نمره‌ای بین ۰/۱ تا ۱ تعلق می‌گیرد (۵۴).

$$Y = 0.1 + \left(\frac{(x-b)}{(a-b)}\right) \times 0.9 \qquad (۱)$$

$$Z = 1 - \left(\frac{(x-b)}{(a-b)}\right) \times 0.9 \qquad (۲)$$

در این روابط Y تابع نمره‌دهی بیشتر-بهتر، Z تابع نمره‌دهی کمتر-بهتر، b و a به ترتیب حدود آستانه پایینی[5] و بالایی[6] و x مقدار ویژگی خاکی مورد نظر است.

تأثیر نسبی هر ویژگی خاک بر تولید محصول را می‌توان به صورت فاکتورهای وزنی نشان داد. بدین منظور، با استفاده از روش AHP، وزن هر یک از ویژگی‌های خاک مؤثر در میزان تولید محصول محاسبه شد. در این روش به‌منظور مقایسات زوجی بین معیارها، از مقیاس نُه‌نقطه‌ای (۴۵) که اقدام به درجه‌بندی نسبی ارجحیت‌ها برای دو معیار می‌کند، استفاده شد. این مقیاس، ارزش‌های از ۱/۹ (یک نهم) تا ۹ را شامل می‌شود، به‌طوریکه ارزش‌های ۱/۹ و ۹، به‌ترتیب بیانگر کمترین و بیشترین اهمیت یک معیار نسبت به سایر معیارها می‌باشد و اگر دو معیار از اهمیت یکسانی برخوردار باشند، مقایسه آن‌ها منجر به مقدار ارزشی یکسان می‌گردد (جدول ۱). حاصل این مرحله، ماتریس مقایسات زوجی است که با فرض معکوس و متقابل بودن آن تهیه می‌گردد.

در مرحله بعد، آرایه سازگاری از طریق تقسیم حاصل‌جمع وزن‌دارشده[7] بر وزن‌های معیار محاسبه شده تعیین می‌شود. پس از محاسبه آرایه سازگاری، دو شاخص" کمیت λ" و "شاخص سازگاری[8]" محاسبه می‌گردند. کمیت λ، عبارت از متوسط مقادیر آرایه‌ی سازگاری است. در شرایطی که ماتریس مقایسات زوجی، مثبت و متقابل باشد، کمیت λ همیشه برابر یا بزرگ‌تر از تعداد معیارهای ارزیابی (n) است. هرگاه ماتریس مقایسات زوجی سازگار باشد، آن‌گاه λ=n است. بنابراین، λ-n را می‌توان به عنوان سنجشی از درجه سازگاری در نظر گرفت. این اندازه سنجشی را می‌توان از طریق رابطه ۳ نرمال کرد:

1- Mean weight diameter
2- Scoring function
3- More is better
4- Less is better
5- Lower threshold
6- Upper threshold
7- Weighted sum ratio
8- Consistency index

$$CI=\frac{\lambda-n}{n-1} \qquad (۳)$$

شاخص سازگاری CI، بیانگر میزان انحراف از سازگاری می‌باشد. نسبت سازگاری[1]، با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (۳۴):

$$CR=\frac{CI}{RI} \qquad (۴)$$

در این رابطه، RI یک شاخص تصادفی است و وابسته به تعداد عناصر مورد مقایسه (n) می‌باشد. هرگاه $CR\leq 0.10$ باشد، سازگاری قابل‌قبولی در مقایسات زوجی وجود دارد و در غیر این صورت ($CR> 0.10$)، مقادیر اولیه ماتریس مقایسات زوجی بایستی مورد تجدید نظر قرار گیرند (۳۸).

پس از تعیین توابع نمره‌دهی برای هریک از معیارها، وزن‌های بدست آمده از روش AHP با نمره فازی هر معیار بر اساس رابطه ۵ (۸) ترکیب شدند.

$$SFI = \sum_{j=1}^{n} W_j\, F(x_j) \qquad (۵)$$

SFI شاخص حاصلخیزی خاک، $F(x_j)$ درجه عضویت مربوط به هر یک از معیارها و W_j وزن اختصاص داده شده به هر کدام از معیارها است.

شاخص حاصلخیزی خاک به روش پارامتریک

برای ارزیابی کمی حاصلخیزی خاک به‌روش پارامتریک از ۱۱ معیار (جدول ۲) استفاده شد. این معیارها بر اساس نظرات کارشناسان پژوهشکده چای لاهیجان و بررسی منابع و پژوهش‌های انجام شده (۳، ۱۱ و ۴۱) تعیین شدند. به این ترتیب هر ویژگی موثر بر رشد گیاه در محدوده صفر (کمترین مطلوبیت) تا ۱۰۰ (بیشترین مطلوبیت) درجه‌بندی شده و طبق رابطه ۶ شاخص حاصلخیزی خاک به روش پارامتریک محاسبه شد (۲۵).

$$SFI = \left[R_{max}\sqrt{\prod_{j=1}^{n} 0.01\ R_j}\right] \qquad (۶)$$

SFI شاخص حاصلخیزی خاک، R_{max} بیشترین درجه و R_j درجات اختصاص داده شده به هر یک از معیارها است.

اعتبارسنجی شاخص حاصلخیزی خاک

برای بررسی ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک و همچنین به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی کمی حاصلخیزی خاک در باغ‌های چای مورد مطالعه، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح پنج درصد انجام شد. به‌منظور اعتبارسنجی شاخص‌های حاصلخیزی خاک، روابط همبستگی بین عملکرد محصول و شاخص‌های حاصلخیزی خاک بررسی شد. در این پژوهش تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی آماری معیارهای حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول

خلاصه آماری ویژگی‌های خاک و عملکرد چای در سه باغ با عملکرد بالا، متوسط و پایین در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس طبقه بندی ژانگ و همکاران[2] (۶۱) ویژگی‌های با ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۹۰ درصد و بیشتر از ۹۰ درصد به ترتیب دارای تغییرپذیری کم، متوسط و زیاد می‌باشند. بر این اساس تمام ویژگی‌های خاک (به جز pH) و عملکرد باغ‌ها از تغییرپذیری متوسط برخوردار هستند که استفاده طولانی‌مدت و مدیریت یکنواخت اراضی می‌تواند منجر به یکنواختی خاک شده و کاهش ضریب تغییرپذیری را به دنبال داشته باشد (۴). در مطالعات صورت گرفته توسط واسو و همکاران[3] (۵۳) و لیو و همکاران[4] (۳۱) کمترین ضریب تغییرات برای pH خاک به‌دست آمد. باغ سنگ‌بیجار، پسیخان و معین با میانگین عملکرد برگ سبز چای به میزان ۴۱۶۰، ۳۳۷۷ و ۱۶۹۳ کیلوگرم در هکتار در چین بهاره به‌ترتیب به عنوان باغ با عملکرد بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شدند.

1- Consistency ratio ,CR

2- Zhang *et al.*
3- Vasu *et al.*
4- Liu *et al.*

جدول(۱) مقیاس نه نقطه‌ای برای تولید ماتریس مقایسات زوجی (٤٥)

Table (1) The nine-point scale used in pairwise comparison

شدت اهمیت Intensity of importance	تعریف Definition
1	اهمیت معادل Equal importance
2	اهمیت معادل تا متوسط Equal to moderate importance
3	اهمیت متوسط Moderate importance
4	اهمیت متوسط تا قوی Moderate to strong importance
5	اهمیت قوی Strong importance
6	اهمیت قوی تا خیلی قوی Strong to very strong importance
7	اهمیت خیلی قوی Very strong importance
8	اهمیت خیلی تا به شدت قوی Very to extremely strong
9	اهمیت به شدت قوی Extreme importance

جدول (۲) درجه‌بندی معیارهای حاصلخیزی خاک

Table (2) Rating of soil fertility parameters

درجه‌بندی معیارها Rating					واحد Unit	ویژگی Parameter
0	40	60	85	100		
<0.4	0.4-0.8	0.8-1.5	>1.5		%	کربن آلی OC
>6.0	5.8-6.0	5.5-5.8	5.0-5.5		---	واکنش خاک pH
4-8	3-4	2-3	0-2		$dS\ m^{-1}$	هدایت الکتریکی EC
<5	5-15	15-30	>30		$mg\ kg^{-1}$	فسفر قابل دسترس Available P
<50	50-150	150-250	>250		$mg\ kg^{-1}$	پتاسیم قابل دسترس Available K
<0.03	0.03-0.1	0.1-0.15	>0.15		$g\ 100g^{-1}$	نیتروژن کل Total N
<0.5	0.5-2	2-3	>3		$mg\ kg^{-1}$	روی قابل دسترس Available Zn
<2	2-3	3-4	>4		$mg\ kg^{-1}$	مس قابل دسترس Available Cu
<5	5-15	15-25	25-35		%	رس Clay
<1	1-2	2-2.5	>2.5		mm	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD
>1.5	1.4-1.5	1.3-1.4	<1.3		$g\ cm^{-3}$	جرم مخصوص ظاهری Bulk density

جدول (۳) توصیف آماری ویژگی‌های خاک و محصول چای در باغاهای با عملکرد متفاوت

Table (3) Descriptive statistics of measured soil properties and tea yield in differnet productivities

عملکرد پایین Low productivity			عملکرد متوسط Medium productivity			عملکرد بالا High productivity				ویژگی Parameter
ضریب تغییرات (٪) CV%	دامنه تغییرات Range	میانگین Mean	ضریب تغییرات (٪) CV%	دامنه تغییرات Range	میانگین Mean	ضریب تغییرات (٪) CV%	دامنه تغییرات Range	میانگین Mean	واحد Unit	
12.00	1.20-1.80	1.62	33.23	1.1-3.0	1.80	23.47	1.03 -2.96	1.92	%	کربن آلی OC
4.70	4.80-5.53	5.26	6.10	4.41-5.22	4.72	3.55	4.2-4.7	4.48	---	واکنش خاک pH
15.10	0.12-0.19	0.14	5.03	0.16-0.18	0.17	11.71	0.14-0.21	0.16	dS m^{-1}	هدایت الکتریکی EC
49.08	20.8-110	52.52	20.99	31.2-61.7	48.56	38.68	13.6-71.7	47.13	mg kg^{-1}	فسفر قابل دسترس Available P
43.62	69.7-227.9	119.6	35.16	58-309.5	211.78	15.20	216.4-321.9	271.37	mg kg^{-1}	پتاسیم قابل دسترس Available K
26.18	0.11-0.26	0.17	5.37	0.16-0.18	0.17	49.17	0.12-0.24	0.18	g $100g^{-1}$	نیتروژن کل Total N
51.91	1.41-7.76	3.53	21.17	1.65-3.61	2.97	25.81	2.03-5.26	3.56	mg kg^{-1}	روی قابل دسترس Available Zn
24.14	1.84-4.24	2.84	25.41	2.5-5.4	3.91	15.47	3.37-5.56	4.30	mg kg^{-1}	مس قابل دسترس Available Cu
23.38	12-25	20.1	15.6	18-30	23.06	16.43	15-26	2.73	%	رس Clay
29.70	0.73-2.33	1.55	37.48	0.42-1.39	0.85	79.38	0.99-8.63	2.31	mm	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD
10.82	0.95-1.32	1.13	14.03	0.71-1.08	0.91	11.52	0.66-1.05	0.9	g cm^{-3}	جرم مخصوص ظاهری Bulk density
35.50	628-2443	1693	28.83	2330 -4780	3377	36.05	1935-7134	4160	kg ha^{-1}	عملکرد Yield

نتایج تجزیه واریانس یک طرفه (ANOVA) ویژگی‌های خاک در باغ‌های چای با عملکرد متفاوت نشان داد که اثر pH، پتاسیم و مس قابل دسترس، جرم مخصوص ظاهری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بر عملکرد باغ‌ها معنی‌دار است ($p<0.01$).

کربن آلی به عنوان منبع مهم عناصر غذایی و منبع اولیه انرژی برای ریزجانداران نقش مهمی در خاک ایفا می‌کند (۳۶). شکل (۱-الف) نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری در سه سطح عملکرد برای کربن آلی خاک وجود ندارد؛ با این وجود بیشترین مقدار کربن آلی خاک (۱/۹ درصد) مربوط به باغ با عملکرد بالا می‌باشد. در خاک‌های با مقادیر بالای کربن آلی، افزایش عملکرد چای نسبت به خاک‌های دیگر بیشتر است (۱۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میانگین pH (۵/۲) مربوط به باغ با عملکرد پایین و کمترین مقدار آن (۴/۵) مربوط به باغ با عملکرد بالا می‌باشد که از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند (شکل ۱–ب). نتایج پژوهش دوتا و همکاران[1] (۱۷) نشان داد که pH به عنوان تأثیر گذارترین و مهم‌ترین ویژگی خاک بر عملکرد چای در شمال شرق هند می‌باشد. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که pH کمتر خاک نه تنها تأثیر منفی بر رشد و کیفیت برگ چای ندارد؛ بلکه به دلیل ماهیت فیزیولوژیکی چای باعث بهبود شرایط رشد نیز می‌شود (۲۱ و ۵۱). آب و هوای نسبتا گرم (۱۳ تا ۳۲ درجه سانتی گراد) و مرطوب، خاک‌های اسیدی حاصلخیز با زهکشی خوب و pH بین ۴/۵ و ۵/۵ شرایط مطلوبی را برای کشت چای فراهم می‌آورند (۲۳). همچنین تجزیه مواد آلی ارتباط نزدیکی با pH خاک دارد و زمانی که مواد آلی تجزیه پیدا می‌کند، pH خاک کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در فصل‌های بهار و تابستان، درجه حرارت و رطوبت (به دلیل آبیاری بارانی) در باغ چای مورد مطالعه از وضعیت مطلوبی برخوردار بوده است؛ در نتیجه تجزیه مواد آلی به خوبی انجام شده و باعث تولید اسیدهای آلی و در نتیجه کاهش pH خاک شده است. همچنین علت مقادیر کمتر pH خاک در باغ با عملکرد بیشتر می‌تواند انتشار اسیدهای آلی از ریشه‌های گیاه چای و مقدار دی‌اکسید کربن آزاد شده از ریشه‌ها باشد (۵۷).

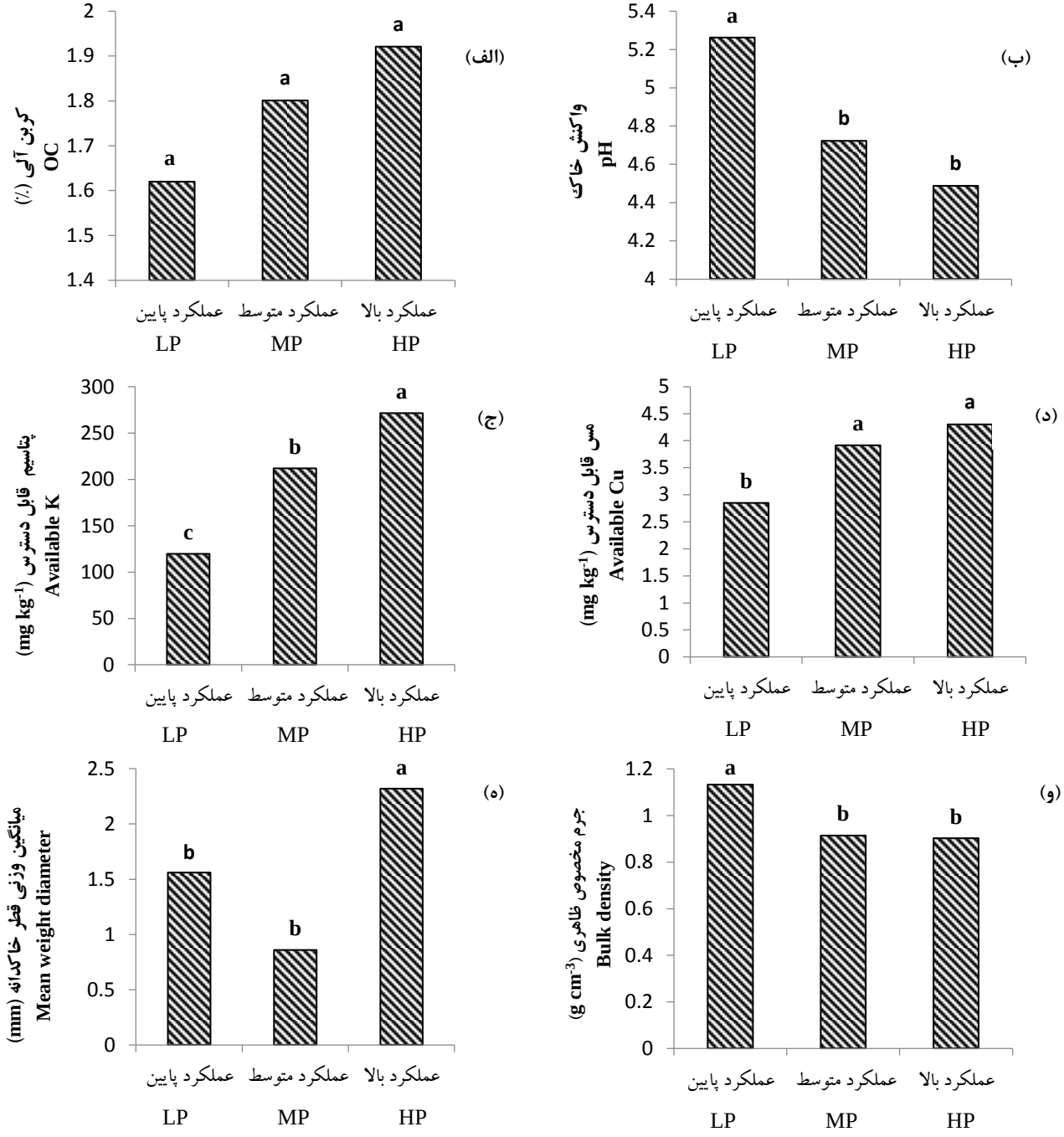
بدیهی است که چای مانند سایر محصولات برای رشد به عناصر غذایی زیادی احتیاج دارد. عناصر غذایی مورد نیاز برای تولید چای به ویژه در شاخساره‌های قابل برداشت (یک غنچه و دو برگ انتهایی چای) زیاد است. این قسمت از گیاه چای حاوی بیشترین مقادیر عناصر غذایی است (۱۲). نتایج مقایسه میانگین برای پتاسیم قابل دسترس خاک نشان داد که بالاترین مقدار پتاسیم قابل دسترس مربوط به باغ با عملکرد بالا به میزان ۲۷۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن مربوط به باغ با عملکرد پایین به میزان ۱۱۹/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط می‌باشد (شکل ۱–ج). پتاسیم بعد از نیتروژن مهمترین عنصر غذایی مورد نیاز چای است. به‌طوری‌که با برداشت متوسط ۳ تن برگ سبز چای در هکتار چیزی حدود ۶۰ کیلوگرم اکسید پتاسیم در هکتار در سال از خاک خارج می‌شود (۲). تولید بقایای هرس بیشتر و در نتیجه برگردان بیشتر شاخ و برگ به خاک، می‌تواند مقادیر بیشتر پتاسیم قابل دسترس در باغ با عملکرد بالاتر را توجیه کند. بیشترین و کمترین مقدار مس قابل دسترس به ترتیب ۴/۳ و ۲/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در باغ‌های با عملکرد بالا و پایین مشاهده شد و اختلاف آنها از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۱–د). مس از عناصر کم مصرف ضروری است که نقش ساختاری و عملکردی در فرآیندهای متابولیکی گیاهان برعهده دارد. در بسیاری از خاک‌های اسیدی سراسر دنیا و حدود نیمی از زمین‌های زراعی که پتانسیل تولید مواد غذایی دارند، فلزات سنگین به عنوان عامل اصلی محدودیت رشد گیاهان می‌باشد (۴۶). ون و همکاران[2] (۵۸) نشان دادند که مقادیر بیشتر pH خاک باغ‌های چای، کاهش مس قابل دسترس را به دنبال دارد. بنابرین مقادیر بیشتر pH خاک در باغ با عملکرد پایین می‌تواند عاملی برای کاهش مقدار مس قابل دسترس خاک باشد.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین میانگین وزنی قطر خاکدانه (۲/۳۲ میلی‌متر) و جرم مخصوص ظاهری خاک (۱/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) به ترتیب مربوط به باغ با

1- Dutta *et al.*

2- Wen *et al.*

عملکرد بالا و پایین می‌باشد که تفاوت معنی‌داری با دو باغ دیگر نشان می‌دهد (شکل‌های ۱–ه و ۱–و). میانگین وزنی قطر خاکدانه و جرم مخصوص ظاهری از ویژگی‌های فیزیکی موثر بر رشد گیاهان و تولید محصول است (۱۹). جرم مخصوص ظاهری بر بسیاری از فاکتورهای موثر بر کیفیت خاک از قبیل سرعت نفوذ آب، هوای خاک، نگهداشت آب در خاک تأثیر بسزایی داشته و یکی از عوامل موثر بر حاصلخیزی خاک و میزان تولید محصول است (۱۶). جرم مخصوص ظاهری خاک می‌تواند بر سیستم ریشه‌ای گیاه، گردش آب و هوا و عناصر غذایی اثرات منفی داشته باشد (۳۲).



شکل (۱) مقایسه میانگین برخی ویژگی‌های خاک در باغ‌های با عملکرد متفاوت

Figue (1) Mean comparison of soil properties in different productivities

LP, Low productivity; MP, Medium productivity; HP, High productivity

حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

تعیین شاخص حاصلخیزی خاک

تأثیر نسبی هر یک از معیارهای حاصلخیزی بر تولید محصول را می‌توان به صورت فاکتورهای وزنی نشان داد. از آنجایی که در این مطالعه از روش مقایسات زوجی در قالب AHP جهت برآورد اوزان استفاده شد، یکی از پیش‌فرض‌های اساسی در این روش آن است که قضاوت‌های تصمیم‌گیرنده نسبت به اثر معیارهای حاصلخیزی خاک بر تولید محصول با واقعیت تطابق ندارد. بنابراین لازم است که تصمیم‌گیرنده نسبت به این مسأله تصمیم، آگاهی پیدا کند و اُریب‌ها[1] و ناسازگاری نظر خود را با واقعیت کاهش دهد (۳۴). محاسبه نسبت سازگاری (CR) این امکان را فراهم می‌آورد. جدول ۴، ماتریس مقایسات زوجی به همراه وزن معیارهای حاصلخیزی را نشان می‌دهد. نسبت‌های سازگاری ماتریس مقایسات زوجی با مقادیر کمتر از ۰/۱، بیانگر تطابق سازگاری منطقی مقایسات زوجی معیارهای ارزیابی می‌باشد و نشان می‌دهد که اوزان نسبی محاسبه شده جهت استفاده در مدل‌های تعیین شاخص حاصلخیزی خاک مناسب و قابل قبول هستند. اوزان بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار کربن آلی، پتاسیم قابل دسترس و pH از اثرگذارترین معیارهای حاصلخیزی خاک برای تولید چای در منطقه مطالعاتی هستند. کربن آلی خاک به طور گسترده‌ای به عنوان یکی از نشانگرهای مؤثر بر کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل آن می‌تواند نقش قابل توجه ماده آلی در کارکردهای چندگانه خاک از قبیل تصفیه، ظرفیت بافری، پایداری فیزیکی، چرخه عناصر غذایی و به عنوان منبع اولیه غذا برای میکروارگانیزم‌ها باشد (۹). روآن و همکاران[2] (۴۴) افزایش عملکرد چای در مقادیر بیشتر پتاسیم قابل دسترس خاک را گزارش کردند. نتایج پژوهش رای و موکوپادهایای[3] (۴۳) در هند نشان داد که pH به عنوان تأثیر گذارترین و مهم‌ترین ویژگی خاک بر عملکرد چای می‌باشد.

میانگین شاخص‌های حاصلخیزی خاک با دو روش Fuzzy-AHP و پارامتریک در جدول ۵ نشان داده شده است. برای هر دو شاخص SFI- Fuzzy AHP و SFI- Parametric بیش‌ترین و کمترین شاخص حاصلخیزی خاک به ترتیب مربوط به باغ با عملکرد بالا و پایین است. به عبارتی ارزیابی حاصلخیزی خاک اراضی چای‌کاری نشان می‌دهد که به طور کلی باغ‌های با عملکرد بالا از میانگین شاخص حاصلخیزی بالاتری نسبت به باغ‌های با عملکرد پایین برخوردار هستند. با توجه به این مهم که میزان عملکرد محصول به عنوان شاخص مهمی در مدیریت پایدار اراضی کشاورزی محسوب می‌شود؛ انتظار می‌رود در مناطق با عملکرد پایین، پتانسیل زیادی برای افزایش عملکرد محصول از طریق بهبود کیفیت خاک وجود داشته باشد. شاخص حاصلخیزی SFI- Fuzzy AHP در باغ‌های با عملکرد بالا و پایین از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان می‌دهند؛ در حالی‌که باغ‌های با عملکرد متفاوت از نظر شاخص SFI- Parametric اختلاف معنی‌داری ندارند (جدول ۵)؛ بنابراین تعیین شاخص حاصلخیزی خاک با روش Fuzzy-AHP برای ارزیابی حاصلخیزی خاک اراضی چای‌کاری بر روش پارامتریک برتری دارد.

پس از تعیین شاخص‌حاصلخیزی خاک با دو روش Fuzzy-AHP و پارامتریک، کلاس‌های حاصلخیزی با توجه به جدول ۶ مشخص گردید. توزیع کلاس‌های حاصلخیزی خاک در منطقه مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که بر اساس شاخص‌های SFI- Fuzzy AHP و SFI- Parametric کلاس‌های حاصلخیزی خیلی کم و خیلی زیاد در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد. با مقایسه دو شاخص حاصلخیزی مشخص می‌شود که شاخص SFI- Fuzzy AHP تفکیک بهتری بین کلاس‌های مختلف حاصلخیزی خاک در باغ‌های با عملکرد متفاوت ایجاد کرده است؛ به‌طوری‌که ۸۶/۷ درصد باغ با عملکرد بالا در کلاس‌های حاصلخیزی زیاد و متوسط، ۸۷/۵ درصد باغ با عملکرد متوسط در کلاس حاصلخیزی متوسط و ۶۰/۰ درصد باغ با عملکرد پایین در کلاس حاصلخیزی کم قرار گرفته است. درحالی‌که بر اساس شاخص SFI- Parametric ۶۶/۷ درصد باغ با عملکرد بالا در کلاس حاصلخیزی کم، ۸۷/۵ درصد باغ با عملکرد متوسط در کلاس حاصلخیزی کم و تنها ۳۶/۷ درصد باغ با عملکرد پایین در کلاس حاصلخیزی کم طبقه‌بندی شده است.

1- Bias
2-Ruan *et al.*
3- Ray and Mukhopadhyay

جدول (٤) ماتریس مقایسات جفتی و وزن مربوط به ویژگی‌های خاک

Table (4) Pairwise comparison matrix and weight of soil parameters

ویژگی	کربن آلی OC	واکنش خاک pH	هدایت الکتریکی EC	فسفر قابل دسترس Available P	پتاسیم قابل دسترس Available K	نیتروژن کل Total N	روی قابل دسترس Available Zn	مس قابل دسترس Available Cu	رس Clay	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD	جرم مخصوص ظاهری Bulk density	وزن Weight
کربن آلی OC	1.00	3.00	5.00	3.00	1.00	2.00	4.00	4.00	5.00	6.00	6.00	0.21
واکنش خاک pH		1.00	4.00	3.00	0.50	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	5.00	0.14
هدایت الکتریکی EC			1.00	0.25	0.20	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.50	0.03
فسفر قابل دسترس Available P				1.00	0.50	0.50	2.00	2.00	3.00	4.00	4.00	0.09
پتاسیم قابل دسترس Available K					1.00	1.00	4.00	4.00	5.00	6.00	6.00	0.18
نیتروژن کل Total N						1.00	2.00	2.00	3.00	4.00	4.00	0.11
روی قابل دسترس Available Zn							1.00	2.00	4.00	6.00	6.00	0.08
مس قابل دسترس Available Cu								1.00	3.00	4.00	4.00	0.06
رس Clay									1.00	2.00	2.00	0.04
میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD										1.00	1.00	0.03
جرم مخصوص ظاهری Bulk density											1.00	0.03

جدول (۵) مقایسه میانگین شاخص‌های حاصلخیزی خاک در باغ‌های با عملکردهای مختلف
Table (5) Mean comparison of soil fertility index in different productivities

شاخص حاصلخیزی خاک Soil fertility index	میانگین Mean		
	عملکرد پایین Low productivity	عملکرد متوسط Medium productivity	عملکرد بالا High productivity
SFI- Fuzzy AHP	0.48[b]	0.59[a]	0.63[a]
SFI- Parametric	0.45[a]	0.47[a]	0.51[a]

حروف مشابه در هر ردیف بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

جدول (٦) مقادیر شاخص حاصلخیزی مربوط به کلاس‌های حاصلخیزی خاک (۳۵)
Table (6) Soil fertility index related to fertility classes

شاخص حاصلخیزی خاک Soil fertility index	کلاس حاصلخیزی Fertility class
0-0.25	حاصلخیزی خیلی کم (Very low fertility)
0.25-0.5	حاصلخیزی کم (Low fertility)
0.5-0.75	حاصلخیزی متوسط (Medium fertility)
0.75-0.9	حاصلخیزی زیاد (High fertility)
0.9-1	حاصلخیزی خیلی زیاد (Very high fertility)

جدول (۷) توزیع کلاس‌های حاصلخیزی خاک در منطقه مورد مطالعه
Table (7) Distribution of soil fertility class across the study area

شاخص حاصلخیزی خاک Soil fertility index	کلاس حاصلخیزی Fertility Class	مساحت (٪) Area (%)		
		عملکرد پایین Low productivity	عملکرد متوسط Medium productivity	عملکرد بالا High productivity
SFI- Fuzzy AHP	حاصلخیزی خیلی کم (Very low fertility)	0	0	0
	حاصلخیزی کم (Low fertility)	60.0	12.5	13.3
	حاصلخیزی متوسط (Medium fertility)	40.0	87.5	66.7
	حاصلخیزی زیاد (High fertility)	0	0	20.0
	حاصلخیزی خیلی زیاد (Very high fertility)	0	0	0
SFI- Parametric	حاصلخیزی خیلی کم (Very low fertility)	0	0	0
	حاصلخیزی کم (Low fertility)	36.7	87.5	66.7
	حاصلخیزی متوسط (Medium fertility)	63.3	12.5	33.3
	حاصلخیزی زیاد (High fertility)	0	0	0
	حاصلخیزی خیلی زیاد (Very high fertility)	0	0	0

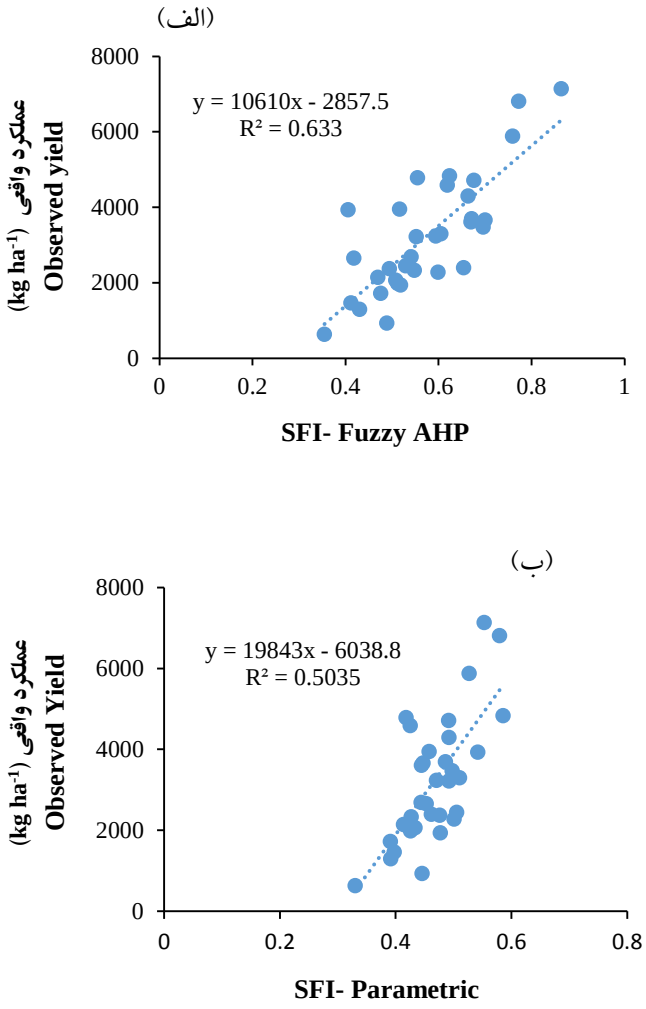
ارزیابی روش‌های Fuzzy AHP و پارامتریک

به‌منظور ارزیابی دقت شاخص‌های حاصلخیزی خاک، رابطه رگرسیونی هر یک از شاخص‌های حاصلخیزی خاک با عملکرد چای بررسی شد (شکل ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی مثبتی بین شاخص‌های SFI- Fuzzy AHP و SFI- Parametric با میزان عملکرد محصول وجود دارد (به ترتیب ۰/۶۳= R^2 و ۰/۵۰=R^2). بنابراین شاخص حاصلخیزی SFI- Fuzzy AHP به خوبی توانسته‌است بیش از ۶۰ درصد تغییرات عملکرد در ارتباط با حاصلخیزی خاک را توجیه نمایند. دداگلو و دنگیز[1] (۱۴) با ارزیابی شاخص حاصلخیزی خاک برای گندم با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی نشان دادند که همبستگی بالایی

1- Dedeoglu and Dengiz

(R^2=۰/۸۳) بین شاخص حاصلخیزی خاک و متوسط عملکرد ۵ ساله گندم وجود دارد. دلسوزخاکی و همکاران[1] (۱۵) با مقایسه دو شاخص حاصلخیزی خاک در اراضی شالیزاری نشان دادند که علی‌رغم همبستگی زیاد (r = ۰/۶۸) دو روش فازی و پارامتریک با یکدیگر، روش فازی می‌تواند با دقت بیشتری حاصلخیزی خاک را ارزیابی کرده و اطلاعات مفیدی را برای تصمیم‌گیری فراهم کند. کشاورزی و همکاران[2] (۲۷) در ارزیابی وضعیت حاصلخیزی خاک در شمال شرق ایران با استفاده از روش‌های Fuzzy-AHP و پارامتریک نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. همچنین نتایج این مطالعه با یافته‌های باقرزاده و قلی‌زاده[3] (۶) الالم و همکاران[4] (۱۸)، شریفی‌فر و همکاران[5] (۴۸) مطابقت داشت. هرچندکه استفاده از روش پارامتریک از نظر نمره‌دهی در مقایسه با روش فازی آسان‌تر است؛ ولی مزیت روش Fuzzy-AHP در نظر گرفتن تأثیر نسبی معیارهای حاصلخیزی بر تولید محصول (انتخاب اوزان) و انتخاب توابع عضویت، برای دستیابی به نتایج واقع‌بینانه است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که روش Fuzzy-AHP می‌تواند برای ترکیب اطلاعات و داده‌های حاصل از منابع مختلف و تفکیک کلاس‌های حاصلخیزی با استفاده از توابع عضویت فازی مفید باشد و اطلاعات مورد نیاز برای تعیین پتانسیل خاک برای تولید محصول و انتخاب روش‌های بهینه مدیریتی را فراهم می‌کند.

1- Delsouz Khaki *et al.*
2- Keshavarzi *et al.*
3- Bagherzadeh and Gholizadeh
4- Elaalem *et al.*
5- Sharififar *et al.*



شکل (۲) ارتباط بین شاخص‌های حاصلیزی خاک به روش (الف) Fuzzy-AHP و (ب) پارامتریک با عملکرد چای
Figure (2) The relationship between soil fertility index using (a) fuzzy-AHP and (b) parametric method with tea observed yield

نتیجه‌گیری

درک صحیح وضعیت حاصلخیزی خاک یکی از جنبه‌های مهم مدیریت پایدار خاک‌ها به‌منظور تولید بهینه کشاورزی و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست است. ارزیابی حاصلخیزی خاک اراضی چای‌کاری با استفاده از دو شاخص SFI- Fuzzy AHP و SFI- Parametric نشان داد که به طور کلی باغ‌های با عملکرد بالا از میانگین شاخص حاصلخیزی بالاتری نسبت به باغ‌های با عملکرد پایین برخوردار هستند. با توجه به این مهم که میزان عملکرد محصول به عنوان شاخص مهمی در مدیریت پایدار اراضی کشاورزی محسوب می‌شود؛ انتظار می‌رود در مناطق با عملکرد پایین، پتانسیل زیادی برای افزایش عملکرد محصول از طریق بهبود حاصلخیزی خاک وجود داشته باشد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مقدار کربن آلی، پتاسیم قابل دسترس و pH از اثرگذارترین معیارهای حاصلخیزی خاک برای تولید چای در منطقه مطالعاتی هستند. شاخص حاصلخیزی SFI- Fuzzy AHP در باغ‌های با

عملکرد بالا و پایین از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نشان داده و تفکیک بهتری بین کلاس‌های مختلف حاصلخیزی خاک در باغ‌های با عملکرد متفاوت ایجاد کرده است. بنابراین تعیین شاخص حاصلخیزی خاک با روش Fuzzy-AHP برای ارزیابی حاصلخیزی خاک اراضی چای‌کاری بر روش پارامتریک برتری دارد. براساس نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که برای تولید بهینه چای در کنار مصرف کود پتاسیم که میزان مصرف دقیق آن باید بر اساس نتایج آزمون خاک برآورد شود، به مدیریت مصرف مواد آلی نیز توجه شود.

References

1. Azghadi, A., Khorassani, R., Mokarram, R., and Moezi, A. 2010. Soil fertility evaluation based on soil K, P and organic matter factors for wheat by using fuzzy logic-AHP and GIS techniques. Journal of Water and Soil, 24(5): 973-984. (in Persian).

2. Ananthacumaraswamy, S., Hettiarachchi, L.S.K., and Dissanayake, S.M. 2003. Soil and foliar sulfur status in some tea plantations of Sri Lanka. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 34(11-12): 1481-1497.

3. Armenise, E., Redmile Godon, M.A., Stellaci, W.M., Ciccarese, A., and Rubino, P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. Soil and Tillage Research, 130: 91-98.

4. Ayoubi, S., Mohammad Zamani, S., and Khormali, F. 2010. Wheat yield prediction through soil properties using principle component analysis. Iranian Journal of Soil and Water Research, 49(1): 51-57. (in Persian).

5. Bagherzadeh, A., Gholizadeh, A., and Keshavarzi, A. 2018. Assessment of soil fertility index for potato production using integrated Fuzzy and AHP approaches, Northeast of Iran. Eurasian Journal of Soil Science, 7(3): 203-212.

6. Bagherzadeh, A., and Gholizadeh, A. 2016. Qualitative land suitability evaluation by parametric and fuzzy approaches for sugar beet crop in Sabzevar plain, northeast of Iran. Agricultural Research, 5(3): 277-284.

7. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 363-375.

8. Cao, H., Jia, M., Song, J., Xun, M., Fan, W., and Yang, H. 2021. Rice-straw mat mulching improves the soil integrated fertility index of apple orchards on cinnamon soil and fluvo-aquic soil. Scientia Horticulturae, 278: 109837.

9. Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agronomy Journal, 94(1): 38-47.

10. Chen, H.S., Liu, G.S., Yang, Y.F., Ye, X.F., and Zhou, S.H.I. 2010. Comprehensive evaluation of tobacco ecological suitability of Henan Province based on GIS. Agricultural Sciences in China, 9(4): 583-592.

11. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E.P., Franco, A.L., Tormena, C.A., Davies, C.A., and Cerri, C.C. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. Plos One, 11(3): e0150860.

12. Dang, M.V. 2005. Soil-plant nutrient balance of tea crops in the northern mountainous region, Vietnam. Agriculture, Ecosystems and Environment, 105(1-2): 413-418.

13. De Costa, W.A.J.M., Surenthran, P., and Attanayake, K.B. 2005. Tree-crop interactions in hedgerow

intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka: 2. Soil and plant nutrients. Agroforestry Systems, 63(3): 211-218.

14. Dedeoglu, M., and Dengiz, O. 2019. Generating of land suitability index for wheat with hybrid system approach using AHP and GIS. Computers and Electronics in Agriculture, 167:105062.

15. Delsouz Khaki, B., Honarjoo, N., Davatgar, N., Jalalian, A., and Torabi Golsefidi, H. 2017. Assessment of two soil fertility indexes to evaluate paddy fields for rice cultivation. Sustainability, 9(8):1299.

16. Deng, Y.S., Dong, X.I.A., CAI, C.F., and Ding, S.W. 2016. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China. Journal of Integrative Agriculture, 15(8):1863-1873.

17. Dutta, R. 2011. A spatio-temporal analysis of tea productivity and quality in north east India. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 184.

18. Elaalem, M. 2013. A comparison of parametric and fuzzy multi-criteria methods for evaluating land suitability for olive in Jeffara Plain of Libya. Apcbee Procedia, 5: 405-409.

19. Emami, H., and Astaraei, A.R. 2012. Effect of organic and inorganic amendments on parameters of water retention curve, bulk density and aggregate diameter of a saline-sodic soil. Journal of Agricultural Science and Technology, 14(7): 1625-1636.

20. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. American Society of Agronomy, Madison, 383-411.

21. Han, W., Kemmitt, S.J., and Brookes, P.C. 2007. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity. Soil Biology and Biochemistry, 39(7): 1468-1478.

22. Hesse, P.R. 1971. A text book of soil chemical analysis. Experimental Agriculture, 8(2):184.

23. Karak, T., Paul, R.K., Boruah, R.K., Sonar, I., Bordoloi, B., Dutta, A.K., and Borkotoky, B. 2015. Major soil chemical properties of the major tea-growing areas in India. Pedosphere, 25(2): 316-328.

24. Katyal, J.C. 2003. Soil fertility management: A key to prevent desertification. Journal of the Indian Society of Soil Science, 51(4): 378-387.

25. Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerda, 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): 111-128.

26. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A (Ed.). Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI, 425-442.

27. Keshavarzi, A., Tuffour, H.O., and Bagherzadeh, A. 2020. Using fuzzy-AHP and parametric technique to assess soil fertility status in Northeast of Iran. Journal of Mountain Science, 17(4): 931-948.

28. Knudsen, D., Peterson, G.A., and Pratt, P.F. 1983. Lithium, sodium and potassium. In: Page, A.L (Ed.). Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9: 225-246.

29. Kumar, R., Chand Hazra, G., Das, R., Majumder, S.P., and Chandra Das, A. 2019. Nutrient index of available S in soils of Howrah and South Dinajpur Districts of West Bengal, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 8(4): 1024-1032.

30. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42(3): 421-428.

31. Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., He, P., Lei, Q., and Liang, G. 2014a. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. Geoderma, 235: 39-47.

32. Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., He, P., Li, S., and Liang, G. 2014b. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. Soil and Tillage Research, 140: 74-81.

33. Lotfi Arpachaei, Z., Esmali Ouri, A., Hashemimajd, K., and Najafi, N. 2013. Soil fertility evaluation of Ardabil plain for wheat and potato based on some soil chemical properties by AHP and GIS techniques. Journal of Water and Soil, 27(1): 45-53. (in Persian).

34. Malczewski, J. 2004. GIS based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress In planning, 62 (1): 3-65.

35. Mokarram, M., and Bardideh, M. 2012. Soil fertility evaluation for wheat cultivation by fuzzy theory approach and compared with Boolean method and soil test method in GIS area. Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi), 96: 111-123. (in Persian).

36. Munson, S.M., Lauenroth, W.K., and Burke, I.C. 2012. Soil carbon and nitrogen recovery on semiarid Conservation Reserve Program lands. Journal of Arid Environments, 79: 25-31.

37. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954. Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. United States Department of Agriculture, 939.

38. Ozturk, D., and Batuk, F. 2010. Analytic hierarchy process for spatial decision making. Sigma, 28(2): 124-137.

39. Pilevar, A.R., Matinfar, H.R., Sohrabi, A., and Sarmadian, F. 2020. Integrated fuzzy, AHP and GIS techniques for land suitability assessment in semi-arid regions for wheat and maize farming. Ecological Indicators, 110:105887.

40. Purnamasari, R.A., Noguchi, R., and Ahamed, T. 2019. Land suitability assessments for yield prediction of cassava using geospatial fuzzy expert systems and remote sensing. Computers and Electronics in Agriculture, 166(1): 105018.

41. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., and Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 149(3): 325-334.

42. Rabia, A.H. 2012. A GIS based land suitability assessment for agricultural planning in Kilte Awulaelo district, Ethiopia, 4th International Congress of ECSSS, Eurosoil, Bari, Italy, 1257.

43. Ray, S.K., and Mukhopadhyay, D. 2012. A study on physicochemical properties of soils under different tea growing regions of West Bengal (India). International Journal of Agriculture Sciences, 4(8): 325.

44. Ruan, J., Ma, L., and Shi, Y. 2013. Potassium management in tea plantations: Its uptake by field plants, status in soils, and efficacy on yields and quality of teas in China. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 176(3): 450-459.

45. Saaty, T.L., and Vargas, L.G. 2001. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. International Series in Operations Research and Management Science. Kluwer Academic, 160.

46. Sedaghathoor, S., Torkashv, A.M., Hashemabadi, D., and Kaviani, B. 2009. Yield and quality response of tea plant to fertilizers. African Journal of Agricultural Research, 4(6):568-570. (in Persian).

47. Servati, M., Jafarzadeh, A.A., Ghorban, M.A., Shahbazi, F., and Davatgar, N. 2014. Comparison of the FAO and Albero models in prediction of irrigated wheat production potentials in the Khajeh region. Journal of Water and Soil Science, 24(3): 1-14.

48. Sharififar, A., Ghorbani, H., and Sarmadian, F. 2016. Soil suitability evaluation for crop selection using fuzzy sets methodology. Acta Agriculturae Slovenica, 107(1): 159-174.

49. Silva Cruz, J.S., Junior, R.N.A., Matias, S.S.R., and Camacho-Tamayo, J.H. 2011. Spatial variability of an Alfisol cultivated with sugarcane. International Journal of Agriculture and Natural Resources, 38(1): 155-164.

50. Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Azma, A., and Akbari, M. 2020. Combined fuzzy AHP–GIS for agricultural land suitability modeling for a watershed in southern Iran. Environmental Management, 66(3): 364-376.

51. Tsuji, M., Kuboi, T., and Konishi, S. 1994. Stimulatory effects of aluminum on the growth of cultured roots of tea. Soil Science and Plant Nutrition, 40(3): 471-476.

52. Tuncay, T., Kilic, S., Dedeoglu, M., Dengiz, O., Baskan, O., and Bayramin, I. 2021. Assessing soil fertility index based on remote sensing and GIS techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. Journal of Arid Environments, 190: 104525.

53. Vasu, D., Singh, S.K., Sahu, N., Tiwary, P., Chandran, P., Duraisami, V.P., Ramamurthy, V., Lalitha, M., and Kalaiselvi, B. 2017. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. Soil and Tillage Research, 169: 25-34.

54. Velasquez, E., Lavelle, P., and Andrade, M. 2007. GISQ, a multi-functional indicator of soil quality. Soil Biology and Biochemistry, 39(12): 3066-3080.

55. Virgilio, N.D., Monti, A., and Venturi, G. 2007. Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum L.*) yield as related to soil parameters in a small field. Field Crops Research, 101(2): 232-239.

56. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1): 29-38.

57. Wang H., Ren-Kou, X., Ning, W., and Xing-Hui, L. 2010. Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. Pedosphere, 20(6): 799-806.

58. Wen, B., Li, L., Duan, Y., Zhang, Y., Shen, J., Xia, M., Wang, Y., Fang, W., and Zhu, X. 2018. Zn, Ni, Mn, Cr, Pb, and Cu in soil-tea ecosystem: The concentrations, spatial relationship and potential control. Chemosphere, 204: 92-100.

59. Yanbing, Q., Darilek, J.L., Biao, H., Yongcun, Z., Sun, W., and Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 149(3-4): 325-334.

60. Yemefack, M., Rossiter, D.G., and Njomana, R. 2005. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. Geoderma, 125(1-2): 117-143.

61. Zhang, X.Y., Sui, Y.Y., Zhang, X.D., Meng, K., and Herbert, S.J. 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. Pedosphere, 17 (1): 19-29.