Evaluation of Potassium Forms and Availability Using Different Extraction Methods in Selected Date Palm Orchard Soils of Bushehr Province

Abstract

Information on potassium forms in calcareous, partly saline date palm orchard soils of Bushehr Province, and on how common extractants compare with ammonium acetate there, is limited. This study determined potassium forms and compared potassium extracted by seven extractants against 1 M ammonium acetate. Thirty soil samples from 15 orchards in Bushehr, Dashtestan, and Tangestan counties (0–30 and 30–60 cm) were analyzed for soluble, exchangeable, non-exchangeable, and structural potassium. The soils were calcareous (calcium carbonate equivalent 60–90%), mainly sandy loam, silt loam and clay loam in the surface layer and loam, silt loam, clay loam and sand in the subsurface layer, low in organic matter and cation exchange capacity, and often moderately to highly saline. Soluble, exchangeable, non-exchangeable, structural, and total potassium ranged 13.9–30.8, 58.1–326.8, 97.3–714, 1308–3334, and 2246–4184 mg kg^{-1}, respectively. Structural potassium (about 77%) was the largest pool, followed by non-exchangeable (16%), exchangeable (6%), and soluble (1%). Non-exchangeable potassium reached about 700 mg kg^{-1} in some light- to medium-textured soils; its mineral origin remains unknown without mineralogical data. Morgan extracted the most potassium and correlated very highly with 1 M ammonium acetate (r = 0.984 and 0.982 in surface and subsurface layers) and AB-DTPA; 0.01 M calcium chloride extracted the least. As extractants were compared with ammonium acetate, not plant response, correlations show agreement with the reference only. Morgan is a candidate alternative with practical advantages over ammonium acetate (shorter equilibration time, multi-element use), but its suitability requires calibration against plant uptake.

Keywords*: Potassium forms; Potassium extractants; Calcareous soils; Date palm orchards; Bushehr Province*

Extended Abstract

Introduction

Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) is one of the most economically important fruit crops in arid and semi-arid regions of the world, particularly in the Middle East and North Africa. In Iran, date palm cultivation plays a vital role in the agricultural economy of southern provinces, including Bushehr Province, where thousands of hectares are devoted to commercial date production. Sustainable production of date palm depends largely on balanced nutrient management, among which potassium (K) is recognized as one of the most essential macronutrients. Potassium is involved in numerous physiological and biochemical processes, including enzyme activation, photosynthesis, carbohydrate metabolism, osmotic regulation, water-use efficiency, and the translocation of assimilates. Adequate potassium nutrition improves fruit yield, enhances fruit quality, increases tolerance to drought and salinity, and contributes to the overall vigor of date palms.

The availability of potassium in soil is governed not only by its total concentration but also by its distribution among different chemical forms. Soil potassium generally exists as soluble, exchangeable, non-exchangeable, and structural forms, which differ considerably in their availability to plants. Soluble and exchangeable potassium constitute the readily available pool, whereas non-exchangeable potassium acts as a reserve capable of replenishing the available forms under depletion. Structural potassium, incorporated within the crystal lattice of primary and secondary minerals, represents the largest proportion of total soil potassium but becomes available only through long-term weathering processes. Therefore, understanding the distribution of potassium forms is essential for evaluating the potassium-supplying capacity of soils and developing appropriate fertilizer management strategies.

The calcareous soils of southern Iran possess unique physicochemical characteristics that strongly influence potassium dynamics. High calcium carbonate content, alkaline pH, low organic matter, and variable salinity affect potassium retention, release, and plant availability. Consequently, the assessment of plant-available potassium in these soils requires reliable extraction methods that accurately reflect the potassium available for crop uptake. Although several chemical extractants have been developed for estimating available potassium, the amount of potassium they extract varies considerably depending on soil properties. Therefore, selecting an appropriate extractant for calcareous soils remains an important issue in soil fertility evaluation and fertilizer recommendation programs.

Several extractants, including ammonium acetate, calcium chloride, AB-DTPA, Morgan, Mehlich-1, and other chemical solutions, have been proposed for estimating plant-available potassium. However, comparative information regarding the performance of these extractants under the calcareous soils of Bushehr Province is still limited. Furthermore, little information is available on the distribution of different potassium fractions in date palm orchard soils across this region. This lack of information restricts the development of reliable potassium fertilizer recommendations for sustainable date production. Neutral 1 M ammonium acetate is the most widely used reference method, but in soils with large non-exchangeable and structural potassium reserves it may not fully represent the potassium-supplying capacity of the soil (Havlin et al., 2005), and it is not known whether multi-element extractants that are practical for routine testing, such as Morgan and AB-DTPA, give results consistent with it in strongly calcareous and saline soils like those of date palm orchards. The unresolved problem addressed here is therefore twofold: the pools in which potassium is held in these soils are not documented, and the relationship between commonly used extractants and the reference method has not been evaluated for them.

Therefore, the present study was conducted to investigate the distribution of the soluble, exchangeable, non-exchangeable and structural potassium pools in the soils of date palm orchards in Bushehr Province and to compare the amounts of potassium extracted by seven commonly used extractants and their agreement with 1 M ammonium acetate, used as the reference method. The findings are expected to provide baseline information on the status and distribution of potassium in these soils and to identify extractants that merit further calibration against plant potassium uptake for routine soil testing and potassium fertilizer recommendation in date palm orchards of southern Iran.

Methods

This study was conducted to investigate the distribution of different potassium forms and to compare the ability of various chemical extractants to extract potassium, relative to 1 M ammonium acetate as the reference method, in the soils of date palm orchards in Bushehr Province, southern Iran. Soil sampling was carried out in 15 representative commercial date palm orchards located in the counties of Bushehr, Dashtestan, and Tangestan. From each orchard, soil samples were collected from two depths (15–30 and 30–60 cm), resulting in a total of 30 composite soil samples representing the major date-growing areas of the province.

After air-drying, the soil samples were gently crushed and passed through a 2-mm sieve prior to laboratory analyses. Routine physical and chemical properties of the soils were determined using standard analytical procedures. Soil texture was determined by the hydrometer method, while soil pH and electrical conductivity (EC) were measured in saturated soil paste extracts. Organic matter content, calcium carbonate equivalent (CCE), and cation exchange capacity (CEC) were also determined using standard laboratory methods to characterize the physicochemical properties of the studied soils.

Potassium in the soil was fractionated into four operationally defined forms, including soluble, exchangeable, non-exchangeable, and structural potassium. Soluble potassium was determined using the saturation extract, whereas exchangeable potassium was extracted with 1 M ammonium acetate. Non-exchangeable potassium was estimated after extraction with boiling nitric acid followed by subtraction of the exchangeable fraction, and structural potassium was calculated as the difference between total potassium and the sum of the other potassium fractions. Total potassium concentration was determined following complete digestion of the soil samples. Potassium concentrations in all extracts were measured using a flame photometer.

To evaluate the agreement of different soil test methods with the reference method, seven commonly used chemical extractants were compared. These included 1 M ammonium acetate, 0.25 M ammonium acetate, Morgan solution (0.72 N sodium acetate + 0.52 N acetic acid, pH 4.8), AB-DTPA, Mehlich-1, calcium chloride, and nitric acid. The amount of potassium extracted by each solution was determined under identical laboratory conditions to allow direct comparison among extraction methods.

Descriptive statistical analyses were performed to evaluate the distribution of soil properties and potassium fractions. Mean values, ranges, and coefficients of variation were calculated for all measured variables. Pearson correlation analysis was employed to investigate the relationships among potassium forms and to assess the agreement between the different extractants. The strength of these correlations was used to identify the extractant that most closely agreed with the standard ammonium acetate method; as no plant response data were collected, the correlations indicate agreement with the reference method and not plant availability.

Results

The physicochemical characteristics of the studied soils demonstrated that the date palm orchards of Bushehr Province are developed on calcareous soils, with calcium carbonate equivalent ranging from 60 to 90% (mean about 70%). The dominant textures were sandy loam, silt loam and clay loam in the surface layer and mainly loam, with silt loam, clay loam and sand, in the subsurface layer, and the average clay content was approximately 13%. Soil reaction was alkaline, organic carbon content was generally low, and cation exchange capacity remained limited. Electrical conductivity of the saturated paste extract ranged from 3.2 to 13.8 dS m^{-1}, indicating that a considerable proportion of the orchards were affected by moderate to high salinity. These physicochemical characteristics provide the environmental conditions governing potassium retention, transformation, and availability in the studied soils.

Marked differences were observed among the different potassium fractions. Soluble potassium represented only a very small proportion of the total potassium reserve. Its concentration ranged from 15.2 to 30.1 mg kg^{-1} (mean 23.0 mg kg^{-1}) in the surface layer and from 13.9 to 30.8 mg kg^{-1} (mean 22.1 mg kg^{-1}) in the subsurface layer, indicating relatively limited immediately available potassium throughout the soil profile.

Exchangeable potassium showed considerably greater variability than soluble potassium. In the surface layer, exchangeable potassium varied between 58.1 and 309.2 mg kg^{-1}, with an average value of 182.9 mg kg^{-1}, whereas in the subsurface layer it ranged from 66.9 to 326.8 mg kg^{-1}. Exchangeable potassium accounted for only 1.9–12.6% of total potassium in the surface soils and 2.3–14.6% in the subsurface soils, suggesting that only a relatively small fraction of the total potassium reserve was readily available for plant uptake.

Non-exchangeable potassium constituted the second largest potassium pool after structural potassium. Its concentration ranged from 97.3 to 693 mg kg^{-1} (mean 459.8 mg kg^{-1}) in the surface soils and from 166.4 to 714 mg kg^{-1} (mean 471.9 mg kg^{-1}) in the subsurface soils. The proportion of non-exchangeable potassium varied between 4.7 and 27.7% in the surface layer and 3.4 and 26.7% in the subsurface layer, indicating that this fraction represents an important reserve capable of replenishing exchangeable potassium during crop growth. Values approaching 700 mg kg^{-1} in soils of light to medium texture are relatively high at first sight. However, non-exchangeable potassium cannot be judged from texture alone, because the type and amount of clay minerals and potassium-bearing minerals, particularly micas and related minerals, are decisive. Mineralogical analysis was not carried out in this study, so the origin of these values cannot be established with certainty, and long-term potassium fertilization of the orchards may also have contributed.

Structural potassium represented by far the dominant potassium fraction in all investigated soils. Its concentration ranged from 1,396 to 3,270 mg kg^{-1} in the surface soils, with an average of 2,454 mg kg^{-1}, and from 1,308 to 3,334 mg kg^{-1} in the subsurface soils. On average, structural potassium accounted for 77.8% and 76.6% of total potassium in the surface and subsurface layers, respectively. In several soils, particularly soils 7 to 10, more than 90% of the total potassium occurred in the structural form, demonstrating that the majority of potassium reserves are incorporated into primary and secondary minerals and therefore are not immediately available for plant uptake.

Comparison of the seven extraction methods revealed substantial differences in the amounts of potassium they extracted. Among the evaluated extractants, the Morgan extractant consistently extracted the highest amount of potassium in both soil depths, reflecting its relatively strong extraction capacity under calcareous soil conditions. Conversely, 0.01 M $CaCl_2$ extracted the lowest amount of potassium (means of 95 and 67 mg kg^{-1} in the surface and subsurface layers, respectively). This is probably related to its dilute, non-buffered nature and to the extraction conditions, but $CaCl_2$ extracted three to four times more potassium than the soluble fraction (about 22–23 mg kg^{-1}), indicating that it also displaced part of the exchangeable potassium; its low values therefore cannot be attributed only to extraction of soil-solution potassium, and extractant concentration, extraction time, soil:solution ratio and soil chemical and mineralogical properties may also be involved. The remaining extractants produced intermediate extraction values depending on their chemical composition and extraction mechanisms.

Correlation analysis further demonstrated strong agreement among several extraction methods. Significant positive correlations were observed between most extractants in both soil layers. The highest correlation coefficients were obtained between the Morgan and AB-DTPA extractants, reaching r = 0.997 in the subsurface layer. Likewise, the Morgan extractant showed a very high positive correlation with the reference 1 M ammonium acetate method in both soil depths (r = 0.984 and 0.982 in the surface and subsurface layers, respectively), indicating that the amounts of potassium extracted by these methods varied similarly among the soils; this does not necessarily mean that they extract the same potassium pool. In contrast, calcium chloride was most closely correlated with Mehlich-1 (r = 0.914 and 0.921) and nitric acid (r = 0.900 and 0.803) and showed lower correlations (r = 0.65–0.84) with the remaining extractants, possibly reflecting its limited extraction strength.

Conclusion

Overall, the results demonstrate that potassium reserves in the calcareous soils of Bushehr date palm orchards are dominated by structural and non-exchangeable forms, whereas soluble and exchangeable potassium constitute only a small fraction of the total potassium reserve. Furthermore, the Morgan method extracted the largest amount of potassium and was highly correlated with the reference ammonium acetate method (r = 0.984 and 0.982), and it has practical advantages over ammonium acetate (a shorter equilibration time, 10 versus 15 min, and its multi-element use), as was AB-DTPA. Because these correlations indicate agreement with the reference method rather than plant availability, the Morgan extractant can be considered a candidate for routine determination of potassium in calcareous soils of southern Iran, subject to calibration against plant potassium uptake or leaf potassium and to comparison of its accuracy, simplicity and cost with the ammonium acetate method; this may then contribute to improving soil fertility evaluation and potassium fertilizer recommendations for date palm production.

بررسی وضعیت شکل‌های مختلف و قابلیت جذب پتاسیم به روشهای مختلف در برخی خاک‌های نخیلات استان بوشهر

چکیده

اطلاعات درباره شکل‌های پتاسیم در خاک‌های آهکی و تا حدی شور نخلستان‌های استان بوشهر و همخوانی عصاره‌گیرهای رایج با روش مرجع استات آمونیوم در این خاک‌ها اندک است. این پژوهش با هدف بررسی شکل‌های پتاسیم و مقایسه پتاسیم استخراج‌شده با هفت عصاره‌گیر، با استات آمونیوم یک مولار به‌عنوان روش مرجع، انجام شد. ۳۰ نمونه خاک از ۱۵ نخلستان در شهرستان‌های بوشهر، دشتستان و تنگستان از دو عمق ۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متری برداشت و پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی در آن‌ها تعیین شد. خاک‌ها آهکی (کربنات کلسیم معادل ۶۰ تا ۹۰ درصد)، با بافت لوم‌شنی، لوم‌سیلتی و لوم‌رسی در لایه سطحی و لومی، لوم‌سیلتی، لوم‌رسی و شنی در لایه زیرسطحی، با مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی کم و اغلب شوری متوسط تا زیاد بودند. دامنه پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی، ساختمانی و کل به‌ترتیب ۱۳/۹ تا ۳۰/۸، ۵۸/۱ تا ۳۲۶/۸، ۹۷/۳ تا ۷۱۴، ۱۳۰۸ تا ۳۳۳۴ و ۲۲۴۶ تا ۴۱۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. پتاسیم ساختمانی (حدود ۷۷ درصد) بیشترین سهم را داشت و پس از آن غیرتبادلی (۱۶ درصد)، تبادلی (۶ درصد) و محلول (۱ درصد) قرار گرفتند. پتاسیم غیرتبادلی در برخی خاک‌های سبک تا متوسط به حدود ۷۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید که منشأ کانی‌شناسی آن بدون اطلاعات کانی‌شناسی مشخص نیست. عصاره‌گیر مورگان بیشترین مقدار پتاسیم را استخراج کرد و همبستگی بسیار بالایی با استات آمونیوم یک مولار (ضریب همبستگی ۰/۹۸۴ و ۰/۹۸۲ به‌ترتیب در لایه سطحی و زیرسطحی) و AB-DTPA نشان داد؛ کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار کمترین مقدار را استخراج کرد. عصاره‌گیرها با استات آمونیوم و نه با پاسخ گیاه مقایسه شدند و همبستگی‌ها تنها بیانگر همخوانی با روش مرجع‌اند؛ عصاره‌گیر مورگان با مزایای عملی نسبت به استات آمونیوم (زمان تعادل کوتاه‌تر و چندعنصری بودن) می‌تواند گزینه جایگزین مورد بررسی باشد، ولی مناسب بودن آن نیازمند واسنجی با جذب گیاه است.

کلید واژگان: *شکل‌های پتاسیم؛ عصاره‌گیرهای پتاسیم؛ خاک‌های آهکی؛ نخلستان‌های خرما؛ استان بوشهر.*

مقدمه

خرما (*Phoenix dactylifera* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات باغی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. ایران با تولید سالانه بیش از ۱/۲ میلیون تن خرما از تولیدکنندگان اصلی این محصول به شمار می‌رود. استان بوشهر با بیش از ۳۰ هزار هکتار نخلستان و تولید سالانه حدود ۱۵۱ هزار تن خرما، یکی از مناطق مهم تولید خرما در کشور محسوب می‌شود (سازمان جهاد کشاورزی استان

بوشهر، ۱۳۹۴). خاک‌های نخلستان‌های این استان عمدتاً آهکی، شور و دارای pH بالا هستند که می‌تواند فراهمی عناصر غذایی، به‌ویژه پتاسیم، را تحت تأثیر قرار دهد.

پتاسیم یکی از عناصر پرمصرف و ضروری برای نخل خرما است و در تنظیم فشار اسمزی، انتقال مواد فتوسنتزی، سنتز پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها، تنظیم فعالیت روزنه‌ها و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی نقش اساسی دارد (Zörb et al., 2014). تأمین مناسب پتاسیم سبب افزایش عملکرد، بهبود کیفیت میوه و کاهش ریزش میوه در نخل خرما می‌شود (Al-Maiman and Al-Hassani, 2011؛ Ullah Khan et al., 2022). همچنین کاربرد کودهای پتاسیمی موجب بهبود رشد رویشی، افزایش عملکرد و ارتقای ویژگی‌های کمی و کیفی میوه در ارقام مختلف خرما شده است (Harhash and Abdel-Nasser, 2007؛ Harhash and Abdel-Nasser, 2010؛ دیالمی، ۱۳۹۳). اخیرا گزارش شده است که کاربرد توأم سولفات پتاسیم بصورت خاکی و تزریق تنه‌ای سولفات آهن در خاکهای منطقه دشتستان استان بوشهر، عملکرد میوه خرمای رقم کبکاب را تا حدود دو برابر (از ۳۵/۸۷ به ۶۴/۴۱ کیلوگرم در هر نخل) افزایش داد و شاخص‌های کیفی از جمله مواد جامد محلول، قند احیاکننده و قند کل را نیز به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید (Hesami et al، ۲۰۲۵). این یافته‌ها اهمیت عملی مدیریت پتاسیم در خاکهای نخیلات استان بوشهر را به‌وضوح نشان می‌دهد، و اطلاعاتی درباره وضعیت واقعی شکل‌های پتاسیم و قابلیت جذب آن در این خاکها ارائه نمی‌دهد.

پیشینه پژوهش

اگرچه پتاسیم از عناصر فراوان پوسته زمین است، تنها بخش کوچکی از آن در هر زمان به صورت قابل جذب در اختیار گیاه قرار دارد. پتاسیم خاک در چهار شکل اصلی شامل پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی وجود دارد که در تعادل پویایی با یکدیگر قرار دارند (Havlin et al., 2005). پتاسیم محلول و تبادلی مهم‌ترین منابع تأمین کوتاه‌مدت پتاسیم برای گیاه هستند، در حالی که شکل‌های غیرتبادلی و ساختمانی نقش ذخایر میان‌مدت و بلندمدت این عنصر را بر عهده دارند (Sarkar et al., 2013). از این‌رو، ارزیابی وضعیت پتاسیم خاک تنها بر اساس شکل‌های محلول و تبادلی ممکن است توان واقعی خاک در تأمین پتاسیم را به طور کامل نشان ندهد.

توزیع و پویایی شکل‌های مختلف پتاسیم تحت تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله نوع و مقدار کانی‌های رسی، مواد آلی، شوری وpH قرار دارد (Evangelou, 1998 و Havlin et al., 2005). در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، بخش عمده پتاسیم در شکل‌های غیرتبادلی و ساختمانی ذخیره شده است و می‌تواند به تدریج در اختیار گیاه قرار گیرد. مولوی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی برخی خاک‌های آهکی استان فارس گزارش کردند که مقدار پتاسیم غیرتبادلی چندین برابر پتاسیم محلول و تبادلی است. همچنین براتی و همکاران (۱۴۰۳) نشان دادند که شکل‌های غیرتبادلی و ساختمانی سهم عمده ذخایر پتاسیم خاک را تشکیل می‌دهند و با برخی شاخص‌های تغذیه‌ای گیاه ارتباط معنی‌داری دارند. هاشمی و عباسلو (۲۰۱۶) با بررسی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک استان هرمزگان گزارش نمودند که با وجود بافت درشت و درصد رس کم، ظرفیت تثبیت پتاسیم به‌طور میانگین ۷۱ درصد (و در برخی خاک‌ها تا ۸۲ درصد) پس از افزودن ۱۰۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم بود؛ پدیده‌ای که عمدتاً به حضور کانی‌های میکایی و ایلایتی در بخش سیلت نسبت داده شد. آنان میانگین پتاسیم غیرتبادلی و کل را به‌ترتیب ۳۱/۳ و ۱۰۸۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمودند که به‌مراتب بیش از میانگین پتاسیم تبادلی و محلول بود. این نتایج نشان می‌دهد در خاک‌های آهکی جنوب ایران، نوع کانی‌های رسی و سیلتی نقش تعیین‌کننده‌ای در ذخیره و تثبیت پتاسیم ایفا می‌کند. پوزش‌شیرازی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش نمودند که در واحدهای فیزیوگرافی مختلف اراضی کشاورزی پایین‌دست سد رئیس‌علی دلواری در منطقه دشتستان استان بوشهر، شکل ساختمانی پتاسیم به‌طور میانگین ۹۱/۷۵ درصد از پتاسیم کل خاک را به خود اختصاص داد، در حالی‌که پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی به‌ترتیب ۰/۲۶، ۴/۱۷ و ۳/۸۱ درصد از پتاسیم کل را تشکیل دادند؛ همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری میان شکل‌های پتاسیم با هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم و درصد سیلت خاک گزارش شد.

ویرایش اولیه

مقدار پتاسیم استخراج‌شده از خاک به نوع عصاره‌گیر و ویژگی‌های شیمیایی آن بستگی دارد. نوع یون جانشین‌شونده، غلظت عصاره‌گیر، ظرفیت یونی، آنیون همراه و مدت زمان عصاره‌گیری از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار پتاسیم استخراج‌شده هستند (Hosseinpur and Zarenia, 2012). به طور کلی، عصاره‌گیرهای پتاسیم را می‌توان براساس مکانیسم عمل به سه گروه: الف) عصاره‌گیرهای اسیدی که یون هیدرونیوم عامل اصلی جانشینی پتاسیم در آنها است، ب) عصاره‌گیرهایی که دارای کاتیون‌های غیرمشابه پتاسیم نظیر سدیم، کلسیم و باریم هستند، و ج) عصاره‌گیرهایی که دارای کاتیون‌های مشابه پتاسیم، به‌ویژه آمونیوم هستند، تقسیم نمود (Hosseinpur and Zarenia, 2012). بر این اساس، اسید نیتریک، اسید سولفوریک و اسید کلریدریک در گروه اول، کلرید کلسیم، کلرید سدیم و کلرید باریم در گروه دوم، و استات آمونیوم و کلرید آمونیوم در گروه سوم قرار می‌گیرند.

یون آمونیوم به‌دلیل شباهت در بار الکتریکی، اندازه یونی و انرژی هیدراتاسیون با پتاسیم، توانایی بالایی در جایگزینی و استخراج پتاسیم تبادلی و بخشی از پتاسیم لبه‌ای دارد. در مقابل، یون سدیم به‌دلیل شعاع هیدراتاسیون بزرگ‌تر، عمدتاً قادر به استخراج پتاسیم سطوح خارجی کانی‌ها است و توانایی کمتری در آزادسازی پتاسیم تثبیت‌شده دارد (Lopez-Pineiro and Garcia Navarro, 1997). این موضوع می‌تواند دلیل استخراج بیشتر پتاسیم توسط عصاره‌گیرهای آمونیومی نسبت به برخی عصاره‌گیرهای دیگر باشد.

استخراج پتاسیم با استات آمونیوم یک مولار خنثی رایج‌ترین روش ارزیابی وضعیت پتاسیم قابل جذب خاک است، اما در خاک‌های دارای ذخیره پتاسیم غیرتبادلی قابل توجه ممکن است برآورد کاملی از ظرفیت تأمین پتاسیم خاک ارائه نکند (Havlin et al., 2005). به همین دلیل، عصاره‌گیرهای مختلفی برای ارزیابی پتاسیم قابل جذب معرفی شده‌اند و کارایی آن‌ها بسته به نوع خاک و گیاه متفاوت است. احراری و همکاران (۱۳۹۶) گزارش کردند که کلرید سدیم، استات آمونیوم و استات سدیم همبستگی مناسبی با غلظت پتاسیم برگ زیتون دارند. همچنین براتی و همکاران (۱۴۰۳) نشان دادند که برخی عصاره‌گیرها در برآورد پتاسیم قابل جذب گیاه نسبت به روش‌های متداول کارایی بیشتری دارند.

با وجود اهمیت اقتصادی نخل خرما در استان بوشهر، پاسخ اثبات‌شده این محصول به کوددهی پتاسیمی در همین منطقه (Hesami et al., 2025)، شواهد موجود مبنی بر ظرفیت بالای تثبیت پتاسیم در خاک‌های آهکی جنوب ایران (Hashemi and Abbaslou, ۲۰۱۶)، و توزیع شکل‌های پتاسیم در اراضی زراعی عمومی استان بوشهر (Poozesh Shirazi et al., 2024)، تاکنون توزیع شکل‌های مختلف پتاسیم (محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی) و توانایی نسبی عصاره‌گیرهای گوناگون در استخراج پتاسیم و همخوانی آن‌ها با روش مرجع استات آمونیوم در خاک‌های نخلستان‌های استان بوشهر بررسی نشده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی ۱) توزیع شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک نخلستان‌های استان بوشهر، و ۲) مقایسه توانایی چند عصاره‌گیر در استخراج پتاسیم و میزان همخوانی آن‌ها با روش مرجع استات آمونیوم انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، ۱۵ باغ نخل از شهرستان‌های اصلی تولیدکننده خرما در استان بوشهر شامل بوشهر، دشتستان و تنگستان بصورت تصادفی انتخاب شدند. باغ‌های انتخاب شده دارای نخل‌های بالغ و در سن باردهی بودند، و از نظر شرایط اقلیمی، شیوه آبیاری و ویژگی‌های خاک، نماینده مناسبی از نخلستان‌های استان بوشهر بودند. روش آبیاری در همه‌ی باغ‌های مورد مطالعه، آبیاری سنتی و بصورت غرقابی بود (جدول ۱).

نمونه‌برداری خاک به روش زیگزاگی و از زیر سایه‌انداز درختان انجام شد. با توجه به تفاوت در اندازه و گستردگی تاج درختان، نمونه‌های خاک در فاصله تقریبی ۹۰ تا ۱۸۰ سانتی‌متری از تنه نخل‌ها برداشته شدند. نمونه‌ها از دو عمق ۳۰–۰ و ۶۰–۳۰ سانتی‌متری برداشت شدند تا تغییرات شکل‌های مختلف پتاسیم و سایر ویژگی‌های خاک در لایه‌های سطحی و زیرسطحی بررسی شود. از هر عمق در هر باغ، هشت نمونه منفرد برداشت و پس از اختلاط کامل، یک نمونه مرکب تهیه شد. در مجموع ۳۰ نمونه مرکب خاک (۱۵ باغ × ۲ عمق) برای انجام آزمایش‌ها آماده گردید.

ویرایش‌شده

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای محیط هواخشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع با هدایت‌سنج (Rhoades, 1996)، pH خمیر اشباع با pHمتر(Thomas, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش اشباع استات سدیم یک نرمال در pH ۸/۲ (Chapman, 1965)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Allison and Moodie, 1965) و کربن آلی (OC) به روش اکسیداسیون تر با دی‌کرومات پتاسیم در حضور اسید سولفوریک و تیتراسیون با آمونیوم فرو سولفات (Jackson, 1975) اندازه‌گیری شدند (جدول ۲).

جدول ۱- مختصات جغرافیایی نقاط مورد نمونه برداری.

شماره خاک (باغ)	منطقه	طول جغرافیایی (UTM) زون 39R	عرض جغرافیایی (UTM) زون 39R	ارتفاع از سطح دریا (m)
۱	دالکی	۵۲۷۵۶۹	۳۲۵۴۸۶۴	۸۴
۲	قلعه‌سفید	۵۲۷۲۲۹	۳۲۵۷۳۷۱	۸۸
۳	سرقنات	۵۲۶۲۳۸	۳۲۵۹۸۳۸	۱۰۰
۴	وحدتیه	۵۲۲۳۷۲	۳۲۶۰۹۰۵	۸۸
۵	تل‌سرکوب	۵۱۵۷۹۸	۳۲۵۵۷۵۴	۶۹
۶	هلیله‌ای	۵۱۴۷۴۴	۳۲۵۳۳۸۶	۶۹
۷	سعدآباد	۵۰۹۲۹۲	۳۲۵۰۵۱۶	۳۵
۸	چهاربرج	۵۰۶۷۵۰	۳۲۴۵۶۲۵	۲۳
۹	آبپخش	۵۰۸۳۵۶	۳۲۴۵۴۷۷	۲۴
۱۰	زیارت	۵۰۸۲۶۰	۳۲۴۰۶۱۱	۱۹
۱۱	اهرم	۵۲۴۶۳۳	۳۱۹۴۹۳۰	۴۷
۱۲	حیدری	۵۲۶۹۳۳	۳۲۰۰۹۵۰	۵۲
۱۳	بازوئی	۵۲۷۰۴۰	۳۲۰۲۰۷۹	۴۸
۱۴	تل‌اشکی	۵۱۲۶۱۵	۳۲۱۷۰۷۱	۳۱
۱۵	عسکری	۴۸۵۰۵۰	۳۲۳۸۶۷۵	۹

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاکهای مورد مطالعه.

خاک	کربنات کلسیم معادل (٪)	pH	هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	ماده آلی (٪)	CEC ($cmol(+)\ kg^{-1}$)	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	کلاس بافت خاک
عمق ۳۰-۰ سانتی متر									
۱	۶۹/۰	۷/۳	۹/۵	۰/۱۸	۲/۱	۶۲/۶	۳۲	۵/۴	لوم‌شنی
۲	۶۵/۵	۷/۴	۳/۲	۰/۰۸	۷/۸	۱۸/۶	۴۴	۳۷/۴	لوم‌رسی‌سیلتی
۳	۶۷/۵	۷/۵	۵/۴	۰/۲۲	۴/۵	۲۲/۶	۵۶	۲۱/۴	لوم‌سیلتی
۴	۶۵	۷/۴	۵/۲	۰/۴۳	۵/۲	۳۱/۱	۴۰	۲۸/۹	لوم‌رسی
۵	۷۴	۷/۳	۵/۲	۰/۲۶	۵/۷	۵۷/۱	۲۸	۱۴/۹	لوم‌شنی
۶	۷۱/۵	۷/۵	۳/۹	۰/۱۰	۴/۸	۵۵/۱	۳۲	۱۲/۹	لوم‌شنی
۷	۶۵/۵	۷/۲	۵/۱	۰/۴۱	۲/۷	۸۵/۱	۶	۸/۹	شنی‌لومی

ویراستاری نشده

خاک	کربنات کلسیم معادل (٪)	pH	هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	ماده آلی (٪)	CEC ($cmol(+)\ kg^{-1}$)	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	کلاس بافت خاک
۸	۶۵/۵	۷/۲	۴/۶	۰/۱۴	۱/۲	۹۲/۶	۶	۱/۴	شنی
۹	۶۲/۵	۷/۳	۴/۵	۰/۳۰	۴/۰	۳۰/۶	۵۸	۱۱/۴	لوم‌سیلتی
۱۰	۶۷/۵	۷/۴	۱۱/۷	۰/۱۰	۴/۶	۵۲/۶	۳۸	۹/۴	لوم‌شنی
۱۱	۷۳/۰	۷/۳	۷/۵	۱/۱۱	۱/۳	۲۲/۶	۷۶	۱/۴	لوم‌سیلتی
۱۲	۸۵/۰	۷/۹	۱۳/۵	۰/۲۲	۳/۲	۵۴/۶	۴۰	۵/۴	لوم‌شنی
۱۳	۸۲/۰	۸/۰	۱۳/۸	۰/۲۸	۳/۱	۵۲/۶	۴۶	۱/۴	لوم‌شنی
۱۴	۶۴/۰	۷/۲	۱۲/۸	۰/۵۱	۷/۵	۳۲/۶	۴۰	۲۷/۴	لوم‌رسی
۱۵	۶۴/۰	۷/۸	۶/۵	۰/۵۳	۵/۵	۳۶/۶	۵۲	۱۱/۴	لوم‌سیلتی
محدوده	۶۲/۵–۸۵/۰	۷/۲–۸/۰	۳/۲–۱۳/۸	۰/۰۸–۱/۱۱	۱/۲–۷/۸	۱۸/۶–۹۲/۶	۶–۷۶	۱/۴–۳۷/۴	
میانگین	۶۹/۴	۷/۴	۷/۵	۰/۳۲	۴/۲	۴۷/۱	۳۹/۶	۱۳/۳	
عمق ۶۰-۳۰ سانتی متر									
۱	۷۱	۷/۴	۱۰/۸	۰/۱۶	۱/۰	۴۶/۶	۵۲	۱/۴	لوم‌سیلتی
۲	۷۴	۷/۳	۳/۶	۰/۳۸	۷/۱	۲۴/۶	۴۴	۳۱/۴	لوم‌رسی
۳	۷۰	۷/۵	۵/۱	۰/۳۸	۵/۳	۲۴/۶	۴۴	۳۱/۴	لوم‌رسی
۴	۷۰/۵	۷/۴	۵/۲	۰/۱۴	۴/۱	۴۱/۱	۴۴	۱۴/۹	لومی
۵	۷۵	۷/۲	۶/۵	۰/۰۸	۶/۹	۴۹/۱	۳۸	۱۲/۹	لومی
۶	۷۳	۷/۵	۳/۸	۰/۳۰	۶/۰	۵۱/۱	۳۰	۱۸/۹	لومی
۷	۷۱	۷/۲	۶/۰	۰/۴۱	۲/۳	۹۰/۶	۲	۷/۴	شنی
۸	۶۶	۷/۳	۳/۴	۰/۱۰	۲/۵	۸۸/۶	۶	۵/۴	شنی
۹	۶۱/۵	۷/۳	۳/۵	۰/۱۸	۳/۳	۴۴/۶	۴۴	۱۱/۴	لومی
۱۰	۶۶	۷/۵	۱۲/۱	۰/۱۴	۴/۴	۴۴/۶	۴۶	۹/۴	لومی
۱۱	۸۵/۵	۷/۶	۵/۶	۰/۴۱	۲/۴	۲۶/۶	۷۲	۱/۴	لوم‌سیلتی
۱۲	۸۳	۸/۱	۱۳/۴	۰/۰۶	۳/۲	۶۰/۶	۳۲	۷/۴	لوم‌شنی
۱۳	۹۰	۷/۷	۹/۶	۰/۱۶	۴/۶	۴۸/۶	۳۸	۱۳/۴	لومی
۱۴	۶۵	۷/۴	۸/۳	۰/۲۲	۳/۱	۳۸/۶	۵۰	۱۱/۴	لوم‌سیلتی
۱۵	۶۰	۷/۶	۶/۰	۰/۱۴	۵/۷	۳۴/۶	۴۸	۱۷/۴	لومی
محدوده	۶۰–۹۰	۷/۲–۸/۱	۳/۴–۱۳/۴	۰/۰۶–۰/۴۱	۱/۰–۷/۱	۲۴/۶–۹۰/۶	۲–۷۲	۱/۴–۳۱/۴	
میانگین	۷۲/۱	۷/۵	۶/۸	۰/۲۲	۴/۱	۴۷/۶	۳۹/۳	۱۳/۱	

ویراستاری نشده

شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبادلی، غیرتبادلی وکل به ترتیب درعصاره اشباع، با عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال خنثی، اسید نیتریک جوشان، و هضم در اسید فلوریدریک و تیزاب سلطانی تعیین شدند (پرات، ۱۹۶۵). برای عصاره‌گیری پتاسیم تبادلی، ۵ گرم خاک با ۲۵ میلی‌لیتر استات‌آمونیوم یک نرمال خنثی ۱۰ دقیقه تکان داده وسانتریفوژ شد. محلول زلال رویی در والیومتریک ۱۰۰ میلی‌لیتر صاف شد. این مرحله سه مرتبه دیگر بصورت متوالی تکرار شد و هر مرتبه عصاره زلال رویی به جمع‌آوری شد و در نهایت با استات آمونیم به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای عصاره‌گیری پتاسیم با اسیدنیتریک جوشان، ۲/۵ گرم خاک و ۲۵ میلی لیتراسیدنیتریک ۱ نرمال به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده شد و عصاره صاف شده به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. اندازه‌گیری پتاسیم

کل خاک به روش هلمک واسپارکز (۱۹۹۶) انجام شد. به ۰/۵گرم خاک ۱ میلی لیتر محلول تیزاب سلطانی (مخلوط یک قسمت اسیدنیتریک غلیظ وسه قسمت اسیدکلریدریک غلیظ) و ۱۰ میلی‌لیتر اسید فلوریدریک افزوده شد و در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس ۳ ساعت حرارت داده شد. مخلوط در والیومتریک پلاستیکی حاوی ۲/۸ گرم اسیدبوریک صاف شد و به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رقیق گردید. غلظت پتاسیم در تمامی عصاره‌ها با استفاده از شعله‌سنج مدل JENWAY PFP7 اندازه‌گیری شد. پتاسیم تبادلی از تفاضل پتاسیم استخراج‌شده با استات آمونیوم و پتاسیم محلول، پتاسیم غیرتبادلی از تفاضل پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک جوشان و پتاسیم استخراج‌شده با استات آمونیوم، و پتاسیم ساختمانی از تفاضل پتاسیم کل و پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک جوشان محاسبه شدند. برای ارزیابی پتاسیم قابل جذب، از هفت عصاره‌گیر شامل استات آمونیوم یک مولار، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، مورگان–ولف، بی‌کربنات آمونیوم–دی‌تی‌پی‌ا (AB-DTPA)، استات آمونیوم ۰/۲۵ نرمال، مهلیچ–۱ و اسید نیتریک ۰/۱۰ نرمال استفاده شد. شرایط عصاره‌گیری شامل نسبت خاک به عصاره‌گیر و زمان تعادل برای هر روش مطابق منابع مربوطه انتخاب گردید (Simmons et al., 1996 و Jones, 1990). عصاره‌گیر مورگان–ولف شامل استات سدیم ۰/۷۲ نرمال و اسید استیک ۰/۵۲ نرمال با pH برابر ۴/۸ بود .(Morgan, 1941) جزئیات کامل ترکیب عصاره‌گیرها، نسبت خاک به محلول و زمان تعادل در جدول ۳ ارائه شده است. ضرایب همبستگی با نرم افزار SPSS v20 محاسبه شد.

جدول ۳- مشخصات روش‌های عصاره‌گیری مورد استفاده.

شماره	نام عصاره‌گیر	غلظت (مولار)	pH	نسبت خاک به عصاره‌گیر	زمان تعادل (دقیقه)
۱	استات آمونیوم	۱	۷	۱:۱۰	۱۵
۲	استات آمونیوم	۰/۲۵	۷	۱:۵	۳۰
۳	کلرید کلسیم	۰/۰۱	_	۱:۱۰	۶۰
۴	مهلیچ۱*	_	_	۱:۴	۵
۵	بی‌کربنات آمونیوم–DTPA**	_	۷/۶	۱:۱۰	۱۰
۶	مورگان–ولف***	_	۴/۸	۱:۱۰	۱۰
۷	اسید نیتریک	۰/۰۰۱	_	۱:۴۰	۳۰****

* شامل اسید هیدروکلریک ۰/۰۵مولار و اسید سولفوریک ۰/۰۲۵ مولار.

**شامل بی‌کربنات آمونیوم ۱ مولار و DTPA ۰/۰۰۵مولار.

***شامل استات سدیم ۰/۷۲ نرمال و اسید استیک ۰/۵۲ نرمال.

****به تعادل رسیدن از طریق جوشاندن بر روی هات پلیت انجام شد.

ویرایش اولیه

یافته‌های پژوهش

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

نتایج نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه در سطح بصورت عمده دارای کلاسهای بافتی لوم شنی، لوم سیلتی، و لوم رسی و در عمق دارای کلاسهای بافتی لومی، شنی، لوم سیلتی و لوم رسی بودند. میانگین مقدار رس در دو عمق مورد مطالعه حدود ۱۳ درصد بود. مقدار کربنات کلسیم معادل در همه‌ی خاک‌ها بسیار زیاد و بصورت میانگین حدود ۷۰ درصد بود که بیانگر ماهیت آهکی شدید خاک‌های منطقه است. واکنش خاک در محدوده خنثی تا کمی قلیایی (۷/۲ تا ۸/۱) قرار داشت (جدول ۲).

هدایت الکتریکی عصاره اشباع در دامنه ۳/۲ تا ۱۳/۸ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود و نشان داد که بخش قابل توجهی از خاک‌ها در محدوده شوری متوسط تا زیاد قرار دارند. همچنین مقدار کربن آلی در اغلب نمونه‌ها کمتر از ۰/۵درصد بود که بیانگر فقر مواد آلی

خاک‌های نخلستان‌های استان بوشهر است. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در اکثر نمونه‌ها پایین و متناسب با بافت نسبتاً سبک و ماده آلی کم خاک‌ها بود. به‌طور کلی، خاک‌های مورد مطالعه دارای آهک زیاد، مواد آلی کم، ظرفیت تبادل کاتیونی کم و شوری نسبتاً زیاد بودند.

شکل‌های پتاسیم

پتاسیم محلول

غلظت پتاسیم محلول در افق سطحی خاک‌ها در محدوده ۱۵/۲۰ تا ۳۰/۱ با میانگین ۲۳، و در افق زیرسطحی دامنه تغییرات آن ۱۳/۹ تا ۳۰/۸ و میانگین ۲۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۴). این نتایج نشان داد که اختلاف قابل‌توجهی بین دو عمق وجود نداشت و پتاسیم محلول در بسیاری از خاک‌ها در عمق زیرسطحی نیز در سطح نسبتاً بالایی باقی مانده است. سهم پتاسیم محلول از پتاسیم کل در افق سطحی بین ۰/۵ تا ۱/۱ درصد و در افق زیرسطحی بین ۰/۵ تا ۱/۳ درصد متغیر بود که نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از پتاسیم کل خاک به‌صورت محلول حضور دارد. بیشترین مقدار پتاسیم محلول در افق سطحی در خاک ۱۱ منطقه اهرم (۳۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پس از آن در خاک‌های ۵، ۱ و ۱۴ مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار مربوط به خاک ۹ منطقه آبپخش (۱۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. در افق زیرسطحی نیز بیشترین مقدار پتاسیم محلول در خاک ۱ (۳۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار در خاک ۹ (۱۳/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (جدول ۴).

خلیلی و همکاران (۱۴۰۴) گزارش نمودند که پتاسیم محلول در خاکهای باغات مرکبات استانهای کهگیلویه و بویراحمد، و فارس در محدوده ۵/۲ تا ۵۹/۵ (میانگین ۱۴/۶) میلی‌گرم برکیلوگرم خاک بود که ۰/۲ تا ۱/۵ درصد از پتاسیم کل خاک را شامل می‌شد. گزارش شده است که در خاکهای آهکی مناطق اقلیمی مختلف استان کهگیلویه و بویراحمد پتاسیم محلول در محدوده ۲/۳ تا ۳۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (اولیایی و همکاران، ۱۳۹۳). نجفی قیری و همکاران (۱۳۹۸) در تعدادی نمونه خاک آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد پتاسیم محلول را ۱۲/۷–۱/۲ (میانگین ۶) میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش نمودند. براتی و همکاران (۱۴۰۳) میانگین غلظت پتاسیم محلول در خاک جنگل‌های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد را ۲۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش نمودند. جوان و همکاران (۲۰۲۵) گزارش نمودند که در تعدادی نمونه خاک آهکی داراب پتاسیم محلول در دامنه ۴۲/۴–۱/۶۵ میلی‌گرم برکیلوگرم خاک بود. مهمترین عامل موثر بر مقدار پتاسیم محلول خاکها آبشویی و مصرف کودهای پتاسیمی است (نجفی قیری، ۱۳۸۹). با کاهش آبشویی بعلت خشکی منطقه، نامطلوب بودن خصوصیات فیزیکی و زهکشی خاک، یا بالا بودن سطح سفره آب زیرزمینی، پتاسیم محلول افزایش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه، میانگین پتاسیم محلول نسبت به استانهای مجاور مانند کهگیلویه و بویر احمد، و فارس بیشتر بود. این تفاوت می‌تواند ناشی از بیشتر بودن تبخیر و زهکشی محدود در منطقه مورد مطالعه باشد که سبب آبشویی کمتر و تجمع پتاسیم در افق‌های سطحی می‌شود (نجفی قیری، ۱۳۸۹).

پتاسیم تبادلی

پتاسیم تبادلی در افق سطحی (۰–۱۵ سانتی‌متری) دامنه‌ای بین ۵۸/۱ تا ۳۰۹/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم داشت و میانگین آن ۱۸۲/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در افق زیرسطحی (۱۵–۳۰ سانتی‌متری)، این شکل پتاسیم بین ۶۶/۹ تا ۳۲۶/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و با میانگین ۱۹۶/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

بررسی داده‌ها به‌تفکیک هر خاک نشان داد که روند تغییرات پتاسیم تبادلی با عمق در همه خاک‌ها یکسان نیست. خاک‌های مورد مطالعه را می‌توان به سه گروه متمایز تقسیم کرد: در گروه نخست، شامل خاک‌های ۲، ۳ و ۴ (و با اختلاف کمتر، خاک‌های ۱ و ۱۴)، غلظت پتاسیم تبادلی در افق سطحی به‌طور محسوس (بین ۱۱ تا نزدیک به ۳۰ درصد) بیشتر از افق زیرسطحی بود. در گروه دوم، شامل خاک‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ (و با شدت کمتر، خاک ۷)، این روند معکوس بود. در گروه سوم، شامل خاک‌های ۵، ۶، ۱۱، ۱۳ و ۱۵، اختلاف بین دو عمق ناچیز (کمتر از ۱۰ درصد) بود. این ناهمگونی، یا دست‌کم بخشی از آن را، می‌توان با ویژگی‌های عمومی منطقه نمونه‌برداری در استان بوشهر مرتبط دانست که منطقه‌ای ساحلی با دمای زیاد و تبخیر شدید است و در بسیاری نقاط عمق سطح ایستابی کم است. چنین شرایطی، به‌طور کلی، می‌تواند زمینه‌ساز بروز فرایندهای مختلف و گاه متضادی در حرکت و توزیع عمقی

ویرایش شده

پتاسیم تبادلی باشد. برای نمونه شست‌وشوی پتاسیم به سمت افق‌های زیرین در برخی نقاط، یا انتقال آن به سمت سطح از طریق حرکت موئینه آب و تبخیر در نقاط دیگر، و نیز اثرگذاری رقابت یونی (سدیم و کلسیم) در خاک‌های شورتر. با این حال، از آنجا که داده‌های تکمیلی لازم –نظیر عمق دقیق سطح ایستابی، شوری موضعی، بافت لایه‌به‌لایه و رژیم آبیاری هر قطعه به‌طور مجزا، در این پژوهش در دسترس نبود، نسبت‌دادن قطعی هر یک از این فرایندها به خاک‌های مشخص ممکن نیست.

در افق سطحی، بیشترین مقدار پتاسیم تبادلی در خاک ۱۳ (۳۰۹/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پس از آن در خاک‌های ۲، ۱۵ و ۱ مشاهده شد، در حالی‌که خاک ۷ کمترین مقدار پتاسیم تبادلی (۵۸/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را داشت. در افق زیرسطحی، خاک‌های ۱۳ و ۱۵ (هر دو با مقدار برابر ۳۲۶/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در رتبه بعد خاک ۹ (۳۱۰/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشترین مقدار پتاسیم تبادلی را نشان دادند و خاک ۷ نیز کمترین مقدار (۶۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را در این عمق داشت.

سهم نسبی پتاسیم تبادلی از پتاسیم کل در افق سطحی بین ۱/۹ تا ۱۲/۶ درصد و در افق زیرسطحی بین ۲/۳ تا ۱۴/۶ درصد تغییر داشت. بیشتر بودن این نسبت در برخی خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های ۱۵، ۱۳ و ۱۲ نشان‌دهنده ظرفیت بیشتر این خاک‌ها برای تأمین پتاسیم قابل جذب گیاه است. در مقابل، خاک‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ دارای نسبت کم پتاسیم تبادلی بودند که بیانگر محدودیت ذخیره پتاسیم قابل جذب در آن‌ها است. پوزش‌نژاد شیرازی و همکاران (۲۰۲۴) سهم پتاسیم غیرتبادلی را ۳/۸۱ و سهم پتاسیم تبادلی را ۴/۱۷ درصد از کل در اراضی زراعی (گندم، جو، کنجد، کلزا) منطقه دشتستان استان بوشهر گزارش نمودند؛ در حالی‌که در خاک‌های نخلستانی پژوهش حاضر، این نسبت بسیار بیشتر است. یکی از دلایل قابل بررسی برای این تفاوت میان خاک‌های نخلستانی و اراضی زراعی مجاور می‌تواند سابقه متفاوت مدیریت کوددهی در این دو کاربری باشد. نخلستان‌های تجاری، برخلاف کشت‌های زراعی فصلی، معمولاً به‌طور مستمر و در طول چندین سال متوالی کود پتاسیمی (به‌ویژه سولفات پتاسیم) و اغلب کود آلی/دامی دریافت می‌کنند؛ پاسخ اقتصادی چشمگیر نخل خرمای «کبکاب» به کوددهی پتاسیمی که اخیراً در همین منطقه گزارش شده است (Hesami et al., 2025) نیز مؤید رواج چنین رویه‌ای در نخلستان‌های منطقه است. احتمال دارد کاربرد مستمر و چندساله کود پتاسیمی در نخلستان‌ها، بخشی از پتاسیم افزوده‌شده را به‌مرور به شکل تبادلی و بخشی دیگر را، از طریق تثبیت در بین لایه‌های کانی‌های رسی ۲:۱، به شکل غیرتبادلی تبدیل کرده باشد؛ در حالی‌که پتاسیم ساختمانی، که عمدتاً از کانی‌های اولیه خاک منشأ می‌گیرد، تحت تأثیر کمتری از این کوددهی قرار می‌گیرد.

پتاسیم تبادلی، در نتیجه‌ی نیروهای الکترواستاتیکی میان یون پتاسیم و بارهای منفی کلوئیدهای آلی و معدنی نگهداری می‌شود. این شکل پتاسیم معمولا با محلول استات آمونیوم نرمال، خنثی استخراج می‌شود، زیرا شعاع هیدراته یون آمونیوم مشابه پتاسیم بوده و جایگزینی آن را تسهیل می‌کند. خلیلی و همکاران (۱۴۰۴) گزارش نمودند که پتاسیم تبادلی در خاک باغات پرتقال استان فارس در دامنه ۶۴۵– ۵۸/۹ (میانگین ۱۶۰) و در کهگیلویه و بویراحمد در دامنه ۵۹۹–۶۸/۹ (میانگین ۱۹۷) میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. زارعیان و همکاران (۱۳۹۶) در ۱۱ نیمرخ خاک در دشت قره‌باغ استان فارس دامنه پتاسیم تبادلی را ۲۸۶–۱۲/۱ (میانگین ۱۷۱/۵) میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند. آنها مشاهده نمودند که بیشترین مقدار پتاسیم تبادلی در خاک آلفی‌سول با مقدار رس زیاد، کانی غالب ایلیت و اسمکتیت و با سابقه مصرف کود پتاسیمی؛ و کمترین مقدار آن در خاک انتی‌سول با کربن آلی کم، بافت لوم شنی، ظرفیت تبادل کاتیونی کم و کربنات کلسیم معادل خیلی زیاد وجود داشت. براتی و همکاران (۱۴۰۳) گزارش نمودند که مقدار پتاسیم تبادلی در خاک جنگل‌های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد در محدوده ۳۶۴–۶۵ (میانگین ۲۴۷) میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. نجفی قیری و همکاران (۱۳۹۸) میانگین مقدار پتاسیم تبادلی در افق‌های سطحی و زیرسطحی خاکهای استان کهگیلویه و بویر احمد را به ترتیب ۲۴۷ و ۱۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند. آنان مشاهده نمودند که مقدار پتاسیم تبادلی در قسمت‌های خشک‌تر استان با رژیم رطوبتی اریدیک و حرارتی ترمیک کمتر، و در مناطق مرطوب‌تر با رژیم رطوبتی زریک و حرارتی مزیک بیشتر بود. پتاسیم تبادلی شکلی از پتاسیم است که مسئول بافر کردن پتاسیم محلول خاک است (نجفی قیری و همکاران، ۲۰۱۱) که نقش اصلی را در تغذیه گیاه بر عهده دارد. افزایش نسبت پتاسیم تبادلی به محلول بیانگر توانایی بیشتر خاک در بافر کردن پتاسیم محلول و آبشویی کمتر پتاسیم محلول است. این نسبت

ویرایش اولیه

به کانی شناسی خاک ارتباط دارد و در خاکهای کائولینیتی کمتر از خاکهای اسمکتیتی است (شارپلی، ۱۹۸۹). در خاک‌های دارای کربن آلی زیاد، پیوندهای ضعیف‌تر میان کلوئیدهای آلی و کاتیون پتاسیم موجب کاهش قدرت بافری و افزایش خطر آبشویی می‌شود.

پتاسیم غیرتبادلی

پتاسیم غیرتبادلی در افق سطحی در دامنه ۹۷/۳ تا ۶۹۳ (میانگین ۴۵۹/۸) میلی‌گرم بر کیلوگرم و در افق زیرسطحی در دامنه ۱۶۶/۴ تا ۷۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم (میانگین ۴۷۱/۹) بود. میانگین نسبتاً مشابه دو عمق نشان می‌دهد که ذخایر پتاسیم غیرتبادلی در کل پروفیل خاک نسبتاً پایدار است.

بیشترین مقدار پتاسیم غیرتبادلی در افق سطحی در خاک ۲ (۶۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در افق زیرسطحی در خاک ۵ (۷۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار در افق سطحی در خاک ۸ (۹۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در افق زیرسطحی در خاک ۹ (۱۶۶/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد.

سهم نسبی پتاسیم غیرتبادلی از پتاسیم کل در افق سطحی بین ۴/۷ تا ۲۷/۷ درصد و در افق زیرسطحی بین ۳/۴ تا ۲۶/۷ درصد متغیر بود. خاک‌های ۴، ۱۵ و ۱۲ بیشترین سهم پتاسیم غیرتبادلی را داشتند (جدول ۴).

پتاسیم غیرتبادلی شکلی از پتاسیم است که در بین لایه‌های کانی‌های تثبیت کننده پتاسیم مانند ایلیت، ورمیکولیت و اسمکتیت قرار گرفته است. این شکل پتاسیم می‌تواند در طولانی مدت بتدریج آزاد شود و بخشی از پتاسیم مورد نیاز گیاه را برطرف کند. چند مطالعه نقش پتاسیم غیرتبادلی به‌عنوان منبع حد واسط پتاسیم گیاهان در هنگام تخلیه پتاسیم قابل جذب خاک را نشان داده است (Bhat et al., 2023؛ Rosolem et al, 2017 و Javan et al., 2025). براتی و همکاران (۱۴۰۳) گزارش نمودند که پتاسیم غیرتبادلی از ۱۰۶ تا ۸۷۸ (میانگین ۵۱۵) میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک جنگلهای بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد متغیر بود. خلیلی و همکاران (۱۴۰۴) مقدار پتاسیم غیرتبادلی را در خاک باغات مرکبات استان فارس ۱۶۲۶–۳۸۱ (میانگین ۶۳۷) و استان کهگیلویه و بویراحمد ۱۲۶۴–۳۲۴ (میانگین ۵۷۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمودند. نجفی قیری و همکاران (۲۰۱۱) گزارش نمودند که خاکهایی که کانی غالب آنها اسمکتیت است نسبت به خاکهای با کانی غالب پالیگورسکیت و کلریت پتاسیم غیرتبادلی بیشتری دارند. نجفی قیری (۱۳۹۸) گزارش نمود که پتاسیم غیر تبادلی با مقدار رس و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت معنی‌داری داشت و با کربنات کلسیم معادل خاکها همبستگی منفی معنی‌دار نشان داد. آنان مشاهده نمودند که میانگین پتاسیم غیرتبادلی در عمق سطحی و زیرسطحی خاکهای آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد به‌ترتیب ۵۲۰ و ۴۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود و در برخی خاک‌ها تا ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسید و در برخی حتی کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که نیاز به مصرف کودهای پتاسیمی را برای بهبود تغذیه گیاه نشان می‌دهد. زارعیان و همکاران (۱۳۹۶) در ۱۱ نیمرخ خاک از دشت قره‌باغ استان فارس محدوده پتاسیم غیرتبادلی را ۹۴–۵۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش نمودند. آنان بیشترین مقدار پتاسیم غیرتبادلی را در افق سطحی خاک اینسپتی‌سول با خاصیت ورتیک و کمترین مقدار را در افق زیر سطحی خاک انتی‌سول با بافت لوم‌شنی، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی کم، و آهک خیلی زیاد مشاهده کردند. مقادیر پتاسیم غیرتبادلی نزدیک به ۷۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های با بافت سبک تا متوسط در نگاه اول زیاد به نظر می‌رسند. با این حال، مقدار پتاسیم غیرتبادلی را نمی‌توان تنها بر اساس بافت خاک قضاوت کرد، زیرا نوع و مقدار کانی‌های رسی و کانی‌های پتاسیم‌دار، به‌ویژه میکاها و کانی‌های مرتبط، نقش تعیین‌کننده دارند. در این پژوهش کانی‌شناسی خاک‌ها بررسی نشده است و به همین دلیل منشأ این مقادیر را نمی‌توان به‌طور قطعی تعیین کرد. در مطالعات انجام‌شده در شهرستان دشتستان استان بوشهر، کانی‌های ایلیت، کلریت، اسمکتیت، کلریت/ایلیت لایه‌ای و کائولینیت در کنار پالیگورسکیت گزارش شده است (نادری‌زاده، ۱۴۰۳)؛ همچنین کوددهی پتاسیمی درازمدت نخلستان‌ها، می‌تواند در افزایش پتاسیم غیرتبادلی نقش داشته باشد. تفسیر این مقادیر باید با احتیاط و بدون نتیجه‌گیری قطعی درباره منشأ کانی‌شناختی آن‌ها انجام شود.

پتاسیم ساختمانی

ویرایش نشده

پتاسیم ساختمانی بیشترین سهم را از پتاسیم کل خاک به خود اختصاص داد. مقدار این شکل در افق سطحی بین ۱۳۹۶ تا ۳۲۷۰ و میانگین ۲۴۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در افق زیرسطحی نیز دامنه تغییرات ۱۳۰۸ تا ۳۳۳۴ (میانگین ۲۳۷۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. بیشترین مقدار پتاسیم ساختمانی در افق سطحی در خاک‌های ۸ و ۱۰ و در افق زیرسطحی در خاک ۱۱ مشاهده گردید. در مقابل، کمترین مقدار در خاک ۴ در افق سطحی و خاک ۱۵ در افق زیرسطحی اندازه‌گیری شد.

پتاسیم ساختمانی به‌طور میانگین ۷۷/۸ درصد پتاسیم کل در افق سطحی و ۷۶/۶ درصد در افق زیرسطحی را تشکیل داد. بیشترین سهم نسبی این شکل در خاک‌های ۷ تا ۱۰ مشاهده شد که در برخی موارد بیش از ۹۰ درصد پتاسیم کل را شامل می‌شد (جدول ۴). این موضوع نشان می‌دهد که بخش عمده ذخایر پتاسیم این خاک‌ها در ساختار کانی‌ها قرار داشته و آزادسازی آن به شدت تحت تأثیر فرایندهای هوادیدگی قرار دارد.

پتاسیم ساختمانی شکلی از پتاسیم است که در ساختار کانی‌های خاک قرار گرفته است و از تفاضل پتاسیم کل و پتاسیم قابل عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان محاسبه می‌شود. این شکل پتاسیم بصورت مستقیم قابل جذب گیاه نیست و در طولانی مدت با هوادیدگی به شکل های قابل جذب گیاه تبدیل می شود. در واقع این شکل پتاسیم منشاء اصلی سایر شکل ها در شرایط طبیعی است. پتاسیم ساختمانی در خاک‌های با هوادیدگی و تخریب بیشتر کاهش می‌یابد؛ زیرا در خاک‌های جوان‌تر که میکا بیشتر است، پتاسیم بیشتری موجود است.

جدول ۴- غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مقدار نسبی (درصد) شکل‌های پتاسیم در خاکهای مورد مطالعه در دو عمق مختلف.

	شکل‌های مختلف پتاسیم ($mg\ kg^{-1}$)					توزیع نسبی شکل‌های مختلف پتاسیم (٪)			
خاک	محلول	تبادلی	غیرتبادلی	ساختمانی	کل	محلول	تبادلی	غیرتبادلی	ساختمانی
				عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر					
۱	۲۸/۳	۳۰۵	۶۴۸	۲۳۴۰	۳۳۲۳	۰/۹	۹/۶	۲۰/۳	۶۹/۳
۲	۲۵/۷	۳۰۸	۶۹۳	۲۹۴۱	۳۹۶۹	۰/۷	۷/۸	۱۷/۵	۷۴/۱
۳	۱۹/۲	۱۰۳	۴۷۸	۲۰۸۷	۲۸۹۳	۰/۷	۳/۶	۲۳/۸	۷۲/۰
۴	۲۱/۹	۲۰۶	۶۲۱	۱۳۹۶	۲۲۴۳	۱/۰	۹/۲	۲۷/۷	۶۲/۲
۵	۲۹/۱	۷۲/۹	۶۸۲	۲۳۱۹	۲۸۹۹	۱/۱	۲/۷	۹/۵	۸۶/۹
۶	۱۸/۵	۱۲۵/۷	۶۱۶	۲۳۴۷	۳۱۰۸	۰/۶	۴/۲	۲۰/۰	۷۵/۲
۷	۲۲/۷	۵۸/۱	۱۸۷	۲۶۲۴	۲۸۹۳	۰/۸	۲/۰	۶/۵	۹۰/۷
۸	۱۸/۲	۸۳/۷	۹۷	۳۲۷۰	۳۴۶۹	۰/۵	۲/۴	۴/۷	۹۲/۵
۹	۱۵/۲	۸۶/۷	۲۱۱	۳۰۱۰	۳۳۲۳	۰/۵	۲/۶	۶/۵	۹۰/۵
۱۰	۱۵/۷	۶۵/۰	۲۱۴	۳۲۷۰	۳۵۶۵	۰/۵	۱/۹	۵/۴	۹۲/۳
۱۱	۳۰/۱	۲۸۲	۶۶۹	۲۹۸۶	۳۹۶۹	۰/۸	۷/۲	۱۶/۹	۷۵/۲
۱۲	۲۰/۹	۲۰۷	۳۹۸	۲۰۵۰	۲۶۷۷	۰/۸	۷/۸	۱۴/۹	۷۶/۶
۱۳	۲۴/۵	۳۰۹	۴۷۱	۲۰۸۷	۲۸۹۳	۰/۹	۱۰/۸	۱۶/۲	۷۲/۲
۱۴	۲۸/۱	۲۲۱	۲۵۶	۲۵۹۶	۳۱۰۲	۰/۹	۶/۷	۱۴/۶	۷۷/۹
۱۵	۲۷/۲	۳۰۶	۶۴۸	۱۴۷۹	۲۴۶۲	۱/۱	۱۲/۶	۲۶/۶	۵۹/۸
میانگین	۲۳	۱۸۲/۹	۴۵۹/۸	۲۴۵۴/۱	۳۱۱۹/۸	۰/۸	۶/۰	۱۵/۴	۷۷/۸
حداقل	۱۵/۲	۵۸/۱	۹۷/۳	۱۳۹۶/۸	۲۲۴۶/۶	۰/۵	۱/۹	۴/۷	۵۹/۸
حداکثر	۳۰/۱	۳۰۹/۲	۶۹۳	۳۲۷۰/۸	۳۹۶۹	۱/۱	۱۲/۶	۲۷/۷	۹۲/۵
				عمق ۶۰-۳۰ سانتی متر					
۱	۳۰/۸	۲۱۹/۰	۶۸۸/۷	۳۰۳۰/۴	۳۹۶۸/۸	۰/۸	۵/۶	۱۷/۷	۷۶/۰
۲	۲۰/۹	۲۰۷/۸	۷۰۹/۸	۲۶۰۰/۴	۳۵۳۸/۸	۰/۶	۵/۹	۲۰/۶	۷۳/۰

ویراستاری نشده

۳	۲۲/۲	۲۶۹/۵	۶۰۲/۴	۱۹۹۹/۱	۲۸۹۳/۲	۰/۸	۹/۴	۲۰/۷	۶۹/۲
۴	۱۷/۷	۲۱۱/۰	۶۲۱/۲	۲۰۴۳/۳	۲۸۹۳/۲	۰/۶	۷/۳	۲۱/۵	۷۰/۶
۵	۲۷/۳	۷۴/۶	۷۱۴/۰	۲۵۷۹/۷	۳۳۹۵/۷	۱/۰	۲/۷	۷/۴	۸۹/۰
۶	۱۸/۵	۱۴۶/۹	۵۹۵/۷	۲۳۴۷/۵	۳۱۰۸/۶	۰/۶	۴/۸	۱۹/۲	۷۵/۵
۷	۲۳/۹	۷۸/۰	۱۶۶/۵	۲۸۴۰/۲	۳۱۰۸/۶	۰/۸	۲/۵	۵/۴	۹۱/۴
۸	۱۶/۸	۱۲۷/۵	۱۸۷/۶	۲۷۵۰/۱	۳۰۸۲/۰	۰/۶	۴/۱	۶/۹	۸۸/۵
۹	۱۳/۹	۶۶/۹	۱۶۶/۴	۲۷۱۵/۲	۲۹۶۲/۴	۰/۵	۲/۳	۳/۴	۹۳/۹
۱۰	۱۹/۵	۱۲۴/۸	۱۶۹/۲	۳۰۱۰/۳	۳۳۲۳/۸	۰/۶	۳/۹	۵/۲	۹۰/۵
۱۱	۲۳/۱	۳۱۰/۷	۵۱۶/۲	۳۳۳۳/۹	۴۱۸۳/۸	۰/۶	۷/۵	۱۲/۴	۷۹/۶
۱۲	۱۷/۳	۲۳۲/۵	۶۰۰/۲	۱۳۹۶/۷	۲۲۴۶/۶	۰/۸	۱۰/۴	۲۶/۷	۶۲/۲
۱۳	۲۲/۸	۲۶۹/۰	۵۵۸/۱	۱۶۱۲/۳	۲۴۶۲/۲	۱/۰	۱۱/۰	۲۳/۰	۶۵/۱
۱۴	۲۹/۰	۲۸۳/۹	۱۹۸/۵	۲۰۸۱/۹	۲۵۹۳/۳	۱/۰	۹/۲	۲۳/۰	۶۷/۰
۱۵	۲۷/۹	۳۲۶/۸	۵۸۳/۸	۱۳۰۸/۲	۲۴۴۶/۶	۱/۳	۱۴/۶	۲۶/۰	۵۸/۳
میانگین	۲۲/۱	۱۹۶/۶	۴۷۱/۹	۲۳۷۶/۶	۳۰۶۷/۲	۰/۷	۶/۷	۱۵/۹	۷۶/۶
حداقل	۱۳/۹	۶۶/۹	۱۶۶/۴	۱۳۰۸/۲	۲۲۴۶/۶	۰/۵	۲/۳	۳/۴	۵۸/۳
حداکثر	۳۰/۸	۳۲۶/۸	۷۱۴/۰	۳۳۳۴/۰	۴۱۸۳/۸	۱/۳	۱۴/۶	۲۶/۷	۹۳/۹

پتاسیم قابل جذب با عصاره‌گیرهای مختلف

در پژوهش حاضر، عصاره‌گیر مورگان بیشترین میانگین پتاسیم استخراجی را در هر دو عمق خاک نشان داد. این عصاره‌گیر که شامل استات سدیم و اسید استیک با pH ۴/۸ است، به‌دلیل خاصیت اسیدی ملایم و بافری بودن، توانایی نسبتاً بالایی در آزادسازی پتاسیم دارد. این عصاره‌گیر در اصل برای استخراج همزمان پتاسیم، کلسیم و منیزیم پیشنهاد شده است و غلظت استات سدیم موجود در آن برای جانشینی بخش عمده کاتیون‌های تبادلی کافی است. بالا بودن پتاسیم استخراج‌شده با عصاره‌گیر مورگان در خاک‌های مورد مطالعه احتمالاً به وجود ذخایر نسبتاً زیاد پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی در خاک‌های آهکی نخلستان‌های استان بوشهر مرتبط است.

عصاره‌گیر بیکربنات آمونیوم–DTPA مقادیر نسبتاً بالایی از پتاسیم را استخراج نمود. این عصاره‌گیر چندعنصری دارای pH حدود ۷/۶ بوده و به‌دلیل نزدیک بودن pH آن به شرایط طبیعی خاک‌های آهکی، تغییر کمتری در تعادل شیمیایی خاک ایجاد می‌کند؛ از این رو برای خاک‌های خنثی و آهکی مناسب گزارش شده است.

در مقابل، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار کمترین مقدار پتاسیم را استخراج نمود (میانگین ۹۵ و ۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب در لایه‌های سطحی و زیرسطحی). این عصاره‌گیر رقیق و غیربافری است و انتظار می‌رود مقادیر استخراج‌شده با آن کمتر از سایر عصاره‌گیرها باشد. با این حال، پتاسیم استخراج‌شده با کلرید کلسیم سه تا چهار برابر پتاسیم محلول (حدود ۳۲ تا ۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود که نشان می‌دهد این عصاره‌گیر بخشی از پتاسیم تبادلی را نیز عصاره‌گیری کرده است؛ بنابراین مقدار کم پتاسیم استخراج‌شده را نمی‌توان تنها به غیربافری بودن آن و استخراج پتاسیم محلول خاک نسبت داد. به طور کلی، ترتیب نسبی توانایی عصاره‌گیرها برای استخراج پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه به صورت مورگان > بیکربنات آمونیوم–DTPA >استات آمونیوم ۱ مولار > اسید نیتریک > استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار >مهلیچ ۱ > کلرید کلسیم بود.

در بیشتر نمونه‌های لایه زیرسطحی و تعدادی از نمونه‌های لایه سطحی، مقدار پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک از عصاره‌گیر مورگان بیشتر بود. این تفاوت را می‌توان به ماهیت اسیدی‌تر و قدرت انحلال‌کنندگی بیشتر اسید نیتریک نسبت داد. بالا بودن پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک در برخی خاک‌ها الزاماً به معنی بیشتر بودن پتاسیم قابل جذب گیاه نیست، بلکه می‌تواند بیانگر استخراج

ویراستاری نشده

بخشی از ذخایر کمتر در دسترس پتاسیم باشد. این موضوع به‌ویژه در خاک‌های زیرسطحی که احتمال حضور کانی‌های رسی و ذخایر پتاسیم معدنی در آنها بیشتر است، می‌تواند موجب افزایش نسبی پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک شود.

نتایج این پژوهش تا حد زیادی با یافته‌های سایر محققان همخوانی داشت. خلیلی (۱۳۹۳) در خاک‌های آهکی استان فارس میانگین پتاسیم استخراج‌شده با عصاره‌گیرهای مورگان و استات آمونیوم را به ترتیب ۲۲۹ و ۱۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کرد که با نتایج این پژوهش قابل مقایسه است. فتحی و همکاران (۱۳۹۳) نیز میانگین توانایی عصاره‌گیرهای مختلف برای استخراج پتاسیم از خاک‌های آهکی استان کردستان را به صورت استات آمونیوم> کلرید باریم> کلرید سدیم> استات سدیم> اسید نیتریک> اسید سولفوریک> کلرید کلسیم گزارش نمودند. آنان همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری میان همه روش‌های عصاره‌گیری مشاهده کردند و استات آمونیوم مولار خنثی را به‌دلیل هزینه کمتر، سرعت مناسب و همبستگی با پاسخ گیاهی، مناسب‌ترین عصاره‌گیر معرفی نمودند.

ضرابی و جلالی (۱۳۸۸) در خاک‌های آهکی استان همدان ترتیب توانایی عصاره‌گیرها را به صورت استات آمونیوم> کلرید باریم> کلرید کلسیم> کلرید سدیم> اسید سولفوریک گزارش نمودند و بیان کردند که اسید سولفوریک کمترین همبستگی را با سایر عصاره‌گیرها داشت. حسین‌پور و متقیان (۲۰۱۳) نیز توانایی عصاره‌گیرها را به صورت اسید نیتریک> کلرید باریم> استات آمونیوم> کلرید سدیم> نیترات منیزیم> بیکربنات آمونیوم–DTPA> کلرید کلسیم> مهلیچ ۱ گزارش نمودند. بالا بودن قدرت استخراج اسید نیتریک در این پژوهش به توانایی آن در آزادسازی بخشی از پتاسیم غیرتبادلی نسبت داده شد (Hosseinpur and Motaghian, 2013). توفیقی (۱۳۷۸) نیز میانگین پتاسیم استخراج‌شده را به صورت اسید نیتریک> اسید سولفوریک> استات آمونیوم> نیترات منیزیم گزارش نمود. همچنین شهبازی و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که مقدار پتاسیم استخراج‌شده به روش‌های استات آمونیوم و مهلیچ ۳ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، در حالی که هر دو روش به طور معنی‌داری بیشتر از بیکربنات آمونیوم–DTPA پتاسیم استخراج کردند.

جدول ۵– مقدار پتاسیم استخراج شده توسط عصاره‌گیرهای مورد مطالعه در دو عمق مختلف (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

خاک	مورگان	مهلیچ۱	استات‌آمونیوم ۱ مولار	استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار	کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار	بیکربنات آمونیوم–DTPA	اسیدنیتریک ۰/۰۰۱ مولار
				عمق ۳۰-۰ سانتی متر			
۱	۳۴۱	۲۷۴	۲۵۹	۲۳۹	۱۵۰	۳۰۲	۳۸۲
۲	۲۸۵	۲۶۹	۲۴۲	۲۱۹	۱۴۵	۲۳۱	۳۴۹
۳	۳۱۲	۹۸	۲۸۴	۲۰۴	۶۹	۲۹۸	۱۳۵
۴	۲۵۷	۱۹۸	۲۳۰	۱۸۸	۱۳۰	۲۴۱	۲۱۸
۵	۱۶۹	۹۹	۱۲۵	۹۵	۷۹	۱۵۳	۱۳۶
۶	۲۲۴	۸۰	۱۸۸	۱۶۸	۷۵	۲۰۱	۱۶۰
۷	۱۲۱	۶۹	۹۸	۸۹	۳۶	۱۰۲	۱۰۱
۸	۱۹۱	۹۰	۱۶۹	۱۳۳	۵۹	۱۷۵	۱۱۲
۹	۱۳۴	۹۱	۹۹	۹۵	۵۴	۱۱۱	۱۳۲
۱۰	۱۹۸	۶۴	۱۶۴	۱۱۱	۶۵	۱۷۶	۱۴۶
۱۱	۳۴۵	۱۵۸	۳۰۰	۲۳۱	۱۰۸	۲۱۱	۳۴۱
۱۲	۳۰۴	۱۰۸	۲۶۴	۱۹۸	۹۱	۳۰۸	۲۳۴
۱۳	۳۱۲	۱۵۰	۲۷۱	۲۱۳	۱۱۱	۲۷۸	۲۹۱
۱۴	۳۴۶	۲۱۲	۳۰۱	۲۲۱	۱۰۴	۳۰۰	۲۱۰
۱۵	۴۰۵	۱۹۸	۳۹۰	۲۹۸	۱۵۰	۳۹۹	۳۲۰
میانگین	۲۶۳ a	۱۴۴ b	۲۲۶ a	۱۸۰ b	۹۵ c	۲۳۳ ab	۲۱۸ b
				عمق ۶۰-۳۰ سانتی متر			

ویرایشی نشده

۱	۴۱۲	۲۳۱	۳۸۵	۲۰۱	۸۷	۳۹۴	۳۰۴
۲	۳۹۸	۲۲۰	۳۴۶	۲۲۴	۶۹	۳۶۱	۲۰۱
۳	۱۵۱	۲۳۱	۱۲۶	۷۹	۷۴	۱۲۴	۲۶۵
۴	۲۸۴	۱۹۸	۲۳۱	۲۰۴	۶۱	۲۵۴	۲۵۸
۵	۱۴۵	۱۰۲	۱۱۲	۱۰۳	۴۷	۱۳۱	۱۶۹
۶	۱۷۹	۱۸۹	۱۸۰	۸۱	۶۱	۱۵۸	۲۰۰
۷	۱۲۴	۱۰۵	۸۹	۶۰	۳۹	۱۱۰	۱۲۶
۸	۱۳۶	۱۳۲	۱۰۴	۷۷	۶۸	۱۱۶	۲۰۴
۹	۱۲۱	۱۰۱	۱۱۳	۸۹	۳۵	۱۰۵	۱۰۰
۱۰	۱۵۴	۱۳۱	۹۲	۶۹	۴۸	۱۳۴	۱۹۸
۱۱	۳۴۱	۲۴۵	۳۱۱	۱۶۲	۸۴	۳۲۵	۲۲۴
۱۲	۲۶۶	۲۳۴	۲۳۸	۹۹	۷۰	۲۵۷	۳۰۷
۱۳	۳۵۴	۲۴۱	۳۴۵	۱۶۸	۷۲	۳۴۴	۲۶۹
۱۴	۲۴۰	۲۶۸	۲۵۰	۱۹۵	۸۷	۲۲۴	۲۰۲
۱۵	۳۴۵	۲۳۵	۳۴۸	۲۰۱	۹۸	۳۴۹	۳۸۴
میانگین	۲۴۴ a	۱۹۷ a	۲۱۸ a	۱۳۴ b	۶۷ c	۲۲۶ a	۲۲۷ a

ضرایب همبستگی بین مقادیر پتاسیم استخراج‌شده توسط عصاره‌گیرهای مختلف نشان داد که در هر دو عمق خاک، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین بیشتر روش‌های عصاره‌گیری وجود داشت (جدول ۶). در لایه سطحی، بیشترین ضریب همبستگی بین عصاره‌گیرهای مورگان و استات‌آمونیوم یک مولار (**۰/۹۸۴) مشاهده شد. همچنین همبستگی بالایی بین روش مورگان و استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار (r=۰/۹۷۴)، و مورگان و بیکربنات آمونیوم–DTPA (r=۰/۹۲۷) وجود داشت. در این عمق، مهلیچ ۱ نیز با کلریدکلسیم (r=۰/۹۱۴) و اسیدنیتریک (r=۰/۸۱۴) همبستگی بالایی نشان داد.

در عمق زیرسطحی نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین بیشتر عصاره‌گیرها مشاهده شد. بالاترین ضریب همبستگی مربوط به عصاره‌گیرهای مورگان و بیکربنات آمونیوم–DTPA (r=۰/۹۹۷) بود. همچنین همبستگی بسیار بالایی بین استات‌آمونیوم یک مولار و بیکربنات آمونیوم–DTPA (r=۰/۹۸۶) و بین مورگان و استات‌آمونیوم یک مولار (r=۰/۹۸۲) مشاهده گردید. در مقابل، کمترین ضریب همبستگی مربوط به اسیدنیتریک و استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار (r=۰/۴۹۱) بود که از نظر آماری معنی‌دار نبود.

به طور کلی، ضرایب همبستگی نشان دادند که عصاره‌گیرهای مورگان، استات‌آمونیوم و بیکربنات آمونیوم–DTPA رفتار نسبتاً مشابهی در استخراج پتاسیم خاک‌های مورد مطالعه داشتند. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین بیشتر عصاره‌گیرهای مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود رابطه مشابه بین مقدار پتاسیم عصاره‌گیری شده به این روش‌ها، در مجموعه خاک‌های مورد مطالعه است. با این حال، صرفاً بر اساس ضرایب همبستگی نمی‌توان نتیجه گرفت که این عصاره‌گیرها دقیقاً بخش‌های یکسانی از پتاسیم خاک را استخراج می‌کنند، زیرا هر عصاره‌گیر بر اساس ترکیب شیمیایی، اسیدیته و یون‌های موجود در محلول استخراج‌کننده، می‌تواند بر بخش‌های متفاوتی از پتاسیم خاک اثر بگذارد.

استات آمونیوم یک مولار خنثی برای برآورد پتاسیم تبادلی استفاده می‌شود. یون آمونیوم با کاتیون‌های جذب‌شده در سطوح تبادلی رقابت کرده و سبب آزادسازی پتاسیم از جایگاه‌های تبادلی می‌شود. مطالعات انجام‌شده در خاک‌های آهکی ایران نیز از استات آمونیوم یک مولار برای تعیین پتاسیم تبادلی استفاده کرده‌اند. عصاره‌گیرهای اسیدی قوی‌تر می‌توانند علاوه بر پتاسیم تبادلی، مقداری از پتاسیم ثبیت شده را نیز آزاد کنند.

عصاره‌گیر مورگان از استات سدیم و اسید استیک تشکیل شده و اسیدیته آن حدود ۴/۸ است. در این عصاره‌گیر، یون سدیم می‌تواند با یون پتاسیم در سطوح تبادلی رقابت کند. در مقایسه با استات آمونیوم خنثی، اسیدیته پایین‌تر عصاره‌گیر مورگان یکی از تفاوت‌های مهم این دو روش است. بالا بودن همبستگی دو روش لزوماً به معنی یکسان بودن سازوکار استخراج آنها نیست. در پژوهش حاضر، همبستگی

ویراستاری نشده

زیاد بین عصاره‌گیر مورگان و استات آمونیوم یک مولار در هر دو عمق خاک نشان می‌دهد که تغییرات مقدار پتاسیم عصاره‌گیریشده با این دو روش در نمونه‌های مورد مطالعه مشابه بوده است. از این نظر عصاره‌گیر مورگان می‌تواند به عنوان یک عصاره‌گیر قابل بررسی در مطالعات آینده مطرح باشد. با این حال، صرفا براساس این همبستگی نمی‌توان عصاره‌گیر مورگان را جایگزین مناسب استات آمونیوم معرفی نمود.

در عصاره‌گیر مورگان–ولف (استات سدیم ۰/۷۲ نرمال و اسید استیک ۰/۵۲ نرمال pH ۴/۸) زمان تعادل نسبت به استات آمونیوم مولار خنثی کوتاه‌تر است و در آزمایشگاه‌های خدماتی که تعداد نمونه‌ها زیاد است، سرعت کار را افزایش می‌دهد. این عصاره‌گیر در اصل برای استخراج هم‌زمان پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر پیشنهاد شده است (Morgan, 1941) و با یک بار عصاره‌گیری می‌توان چند عنصر را در آزمایش‌های ارزیابی حاصلخیزی خاک اندازه‌گیری کرد. این مزایا جنبه عملی و آزمایشگاهی دارند. همبستگی بالا یا مقدار بیشتر پتاسیم استخراج‌شده به‌تنهایی برتری این عصاره‌گیر را از نظر پیش‌بینی پتاسیم قابل جذب گیاه ثابت نمی‌کند و مناسب بودن آن برای نخل خرما نیازمند واسنجی با جذب پتاسیم یا غلظت پتاسیم برگ است.

رفتار اسید نیتریک با عصاره‌گیرهای ملایم‌تر متفاوت است. در مطالعات انجام‌شده در خاک‌های آهکی غرب ایران، مقادیر پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک، به‌ویژه اسید نیتریک یک مولار، بیشتر از استات آمونیوم گزارش شده است (فتحی و همکاران، ۱۳۹۳). این تفاوت به قدرت اسیدی بیشتر اسید نیتریک و توانایی آن در آزادسازی پتاسیم از کانی‌های خاک نسبت داده شده است.

همبستگی بسیار زیاد عصاره‌گیر مورگان با استات‌آمونیوم یک مولار در هر دو عمق خاک نشان می‌دهد که این دو عصاره‌گیر احتمالاً بخش مشابهی از پتاسیم قابل جذب، به‌ویژه پتاسیم تبادلی، را استخراج می‌کنند. استات‌آمونیوم یک مولار به عنوان عصاره‌گیر استاندارد پتاسیم قابل جذب شناخته می‌شود و همبستگی زیاد آن با روش مورگان می‌تواند بیانگر مناسب بودن روش مورگان برای ارزیابی پتاسیم قابل جذب خاک‌های آهکی باشد. خاصیت بافری و pH نسبتاً اسیدی عصاره‌گیر مورگان احتمالاً موجب افزایش کارایی آن در آزادسازی پتاسیم از محل‌های تبادلی و غیرتبادلی شده است. ضریب همبستگی کم اسیدنیتریک با برخی عصاره‌گیرها، به‌ویژه استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار در عمق زیرسطحی، نشان می‌دهد که اسیدنیتریک احتمالاً بخشی متفاوت از ذخایر پتاسیم خاک را استخراج می‌کند. اسیدنیتریک رقیق علاوه بر پتاسیم محلول و تبادلی، قادر به استخراج بخشی از پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم موجود در نواحی لبه‌ای کانی‌های رسی نیز می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود رفتار آن تا حدودی با عصاره‌گیرهای خنثی و ملایم متفاوت باشد.

جدول ۶- ضرایب همبستگی میان پتاسیم استخراج شده با عصاره‌گیرهای مختلف در خاکهای مختلف در دو عمق مورد مطالعه.

	مهلیچ۱	استات‌آمونیوم ۱ مولار	استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار	بی‌کربنات آمونیوم-DTPA	کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار	اسیدنیتریک ۰/۰۰۱ مولار
			عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر			
مورگان	۰/۶۶۷**	۰/۹۸۴**	۰/۹۷۴**	۰/۹۲۷**	۰/۷۸۱**	۰/۷۶۸**
مهلیچ۱		۰/۵۹۳*	۰/۷۲۷**	۰/۵۶۹**	۰/۹۱۴**	۰/۸۴۰**
استات‌آمونیوم ۱ مولار			۰/۹۶۶**	۰/۹۳۳**	۰/۷۳۱**	۰/۶۹۲**
استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار				۰/۹۰۸**	۰/۸۳۵**	۰/۸۱۱**
بی‌کربنات آمونیوم-DTPA					۰/۷۲۰**	۰/۶۰۷*
کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار						۰/۹۰۰**

ویرایشی نشده

	عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر					
مورگان	۰/۷۴۴**	۰/۹۸۲**	۰/۸۷۶**	۰/۹۹۷**	۰/۷۰۹**	۰/۶۴۸**
مهلیچ۱	۱	۰/۸۰۱**	۰/۶۸۸**	۰/۷۵۵**	۰/۹۲۱**	۰/۸۱۸**
استات‌آمونیوم ۱ مولار		1	۰/۸۷۳**	۰/۹۸۶**	۰/۷۶۰**	۰/۶۵۶**
استات‌آمونیوم ۰/۲۵ مولار			۱	۰/۸۶۳**	۰/۶۵۰**	۰/۴۹۱ns
بی‌کربنات آمونیوم- DTPA				۱	۰/۷۱۹**	۰/۶۶۷**
کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار					۱	۰/۸۰۳**

ns معنی‌دار نیست.* و ** به‌ترتیب در سطح ۵ درصد و ۱ درصد آماری معنی‌دار است.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که خاک نخلستان‌های مورد مطالعه در استان بوشهر عمدتاً بافت سبک تا متوسط، با مقدار زیاد کربنات کلسیم معادل، ماده آلی کم، ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً کم و در بخش قابل‌توجهی از نمونه‌ها دارای شوری متوسط تا زیاد بودند. بخش عمده پتاسیم کل خاک‌های مورد مطالعه در شکل ساختمانی و کم‌تحرک قرار داشت و سهم پتاسیم قابل‌تبادل و محلول نسبتاً محدود بود. مقدار پتاسیم استخراج‌شده به نوع عصاره‌گیر وابسته بود وعصاره‌گیر مورگان در هر دو عمق بیشترین مقدار پتاسیم را استخراج کرد و با استات آمونیوم یک مولار، که در این پژوهش به‌عنوان روش استاندارد در نظر گرفته شد، همبستگی بسیار بالایی داشت. همچنین همبستگی بالای عصاره‌گیر مورگان و بی‌کربنات آمونیوم ـ دی‌تی‌پی‌ا نشان‌دهنده شباهت نسبی مقدار پتاسیم استخراج‌شده با این روش‌ها بود. بنابراین، عصاره‌گیر مورگان می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی پتاسیم قابل‌استخراج در خاک‌های آهکی نخلستان‌های استان بوشهر باشد. با این حال، انتخاب این عصاره‌گیر به‌عنوان جایگزین روش استاندارد نیازمند ارزیابی بیشتر و ارتباط دادن مقادیر پتاسیم استخراج‌شده با شاخص‌های واقعی تغذیه و جذب پتاسیم توسط نخل خرما است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارتباط پتاسیم استخراج‌شده با روش‌های مختلف با غلظت پتاسیم برگ و وضعیت تغذیه‌ای نخل بررسی شود. همچنین کارایی عصاره‌گیر مورگان در دامنه گسترده‌تری از خاک‌های آهکی با ویژگی‌های متفاوت و از نظر زمان و هزینه آزمایش با روش استات آمونیوم مقایسه شود.

ویراستاری نشده

منابع

۱. احراری، مهری؛ اولیایی، حمیدرضا؛ ادهمی، ابراهیم؛ و نجفی قیری، مهدی. ۱۳۹۶. مطالعه وضعیت پتاسیم و ارزیابی عصارهگیرهای شیمیایی برای استخراج پتاسیم قابل جذب در برخی خاکهای زیتونکاری استان فارس. *نشریه آب و خاک*. ۳۱ (۳): ۸۴۵-۸۳۵.

۲. اولیایی، حمیدرضا؛ حیدرماه، صفورا؛ ادهمی، ابراهیم؛ و نجفی‌قیری، مهدی. ۱۳۹۳. سینتیک آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در ارتباط با کانی‌شناسی رس برخی از خاکهای آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد *علوم آب و خاک*، ۶۸: ۱۱۰-۹۹

۳. براتی، زینب؛ اولیایی، حمیدرضا؛ ادهمی، ابراهیم؛ و نجفی قیری، مهدی. ۱۴۰۳. ارزیابی وضعیت پتاسیم در خاک جنگل های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد. *نشریه آب و خاک*. ۳۸ (۴): ۵۲۴-۵۱۱.

۴. توفیقی، حسن. ۱۳۷۸. مقایسه چهارعصاره گیر شیمیایی برای برآورد پتاسیم قابل استفاده درخاکهای شالیزاری شمال ایران. *مجله علوم کشاورزی ایران*. ۳۰ (۳): ۶۴۸-۶۳۱.

۵. خلیلی، صفیه؛ اولیایی، حمیدرضا؛ چاکرالحسینی، محمدرضا؛ و ادهمی، ابراهیم. ۱۴۰۴. بررسی وضعیت پتاسیم در برخی خاکها و درختان باغهای پرتقال استانهای فارس و کهگیلویه و بویراحمد. *نشریه پژوهش های خاک*، ۳۹ (۱): ۱۰۱-۷۵.

۶. دیالمی، حجت. ۱۳۹۳. تعیین حد بحرانی پتاسیم در برگ نخل خرما و بررسی اثر پتاسیم بر عملکرد و کیفیت خرمای رقم سایر (استعمران). *تولیدات گیاهی*. ۳۷ (۴): ۳۵-۴۵.

۷. زارعیان، غلامرضا؛ فرپور، محمدهادی؛ حجازی، مجید؛ و جعفری، اعظم. ۱۳۹۶. ارتباط شکل‌های مختلف پتاسیم با خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی رسی خاکهای دشت قره‌باغ در استان فارس. *نشریه پژوهش‌های خاک*. ۳۱ (۲): ۳۲۸-۳۱۵.

۸. سازمان جهاد کشاورزی استان بوشهر. ۱۳۹۴. آمارنامه کشاورزی استان بوشهر. بوشهر: سازمان جهاد کشاورزی استان بوشهر.

۹. شهبازی، کریم؛ چراغی، میثم؛ مارزی، مصطفی؛ و هاشمی‌نسب زواره، کبری‌سادات. ۱۴۰۱. تأثیر نوع عصاره‌گیر و نسبت خاک به عصاره‌گیر بر استخراج میزان پتاسیم قابل جذب خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۷): ۱۴۸۱-۱۴۹۷.

۱۰. ضرابی، محبوبه؛ و جلالی، محسن. ۱۳۸۸. مقایسه چند عصاره‌گیر برای استخراج پتاسیم قابل جذب گندم در برخی از خاکهای استان همدان. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۰ (۲): ۱۵۵-۱۴۹.

۱۱. فتحی، سامان؛ صمدی، عباس؛ داوری، مسعود؛ و اسدی کپورچال، صفورا. ۱۳۹۳. ارزیابی عصاره گیرهای مختلف برای تعیین پتاسیم قابل استفاده ذرت در خاک های آهکی استان کردستان. *تحقیقات غلات*، ۴ (۳): ۲۵۳-۲۶۶.

۱۲. نادری‌زاده، زینب؛ خادمی، حسین؛ و ایوبی، شمس‌الله. ۱۴۰۳. پراکنش پالیگورسکیت و عوامل خاکی مهم مؤثر بر آن در بخشی از خاک‌های استان بوشهر. نشریه علوم آب و خاک. ۲۸ (۱): ۲۱-۱.

۱۳. نجفی قیری، مهدی. ۱۳۸۹. بررسی خصوصیات مورفولوژیکی و کانی شناسی و وضعیت پتاسیم در خاکهای استان فارس. رساله دکتری بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۱۴. نجفی قیری، مهدی؛ اولیایی، حمیدرضا؛ و بوستانی، حمیدرضا. ۱۳۹۸. عوامل مؤثر بر توزیع شکلهای پتاسیم در برخی خاکهای آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد. *تحقیقات کاربردی خاک*. ۷(۲): ۲۰۷-۱۹۶.

15. Ahrari, M., Owliaie, H. R., Adhami, E., and Najafi-Ghiri, M. (2017). Study of potassium status and evaluating chemical extractants for estimating available K in some soils of olive orchards of Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 835–845. (in Persian)
16. Allison, L. E., and Moodie, C. D. (1965). Carbonate. In *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 1379-1396). ASA.
17. Al-Maiman, S. A., and Al-Hassani, S. S. (2011). Effect of potassium on yield and fruit quality of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv. Barhee. *Journal of Agricultural Sciences*, 3(1), 1–6.
18. Barati, Z., Owliaie, H. R., Adhami, E., and Najafi-Ghiri, M. (2024). Evaluation of potassium status in the soils of oak forests of Kohgilouye and Boyerahmad Province. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 511–524. (in Persian)
19. Bhat MA, Tomar D, Grewal KS, Sahoo J, Dar EA. Non-exchangeable potassium release and supplying power of soils of Haryana, Northwest India. *Journal of Plant Nutrition*. 2023;46(17):4140–55. https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2221683
20. Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. In *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 891-901). ASA.
21. Dialami, H. (2015). Determination of potassium critical level in date palm leaf and effect of potassium on yield and quality of date fruit (cv. Sayer). *Plant Production*, 37(4), 35–45. (in Persian)
22. Evangelou, V. P. (1998). Environmental Soil Chemistry. New York, USA: John Wiley and Sons.

ویرایش نشده

23. Fathi, S., Samadi, A., Davari, M., and Asadi Kapourchal, S. (2014). Evaluating different extractants for determining corn available potassium in some calcareous soils of Kurdistan province. *Cereal Research*, 4(3), 253–266. (in Persian)
24. Gee, G. W., and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In *Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383-411). ASA, SSSA.
25. Harhash, M. M., and Abdel-Nasser, G. (2007). Impact of potassium fertilization and bunch thinning on Zaghloul date palm. In: Proceedings of the Fourth Symposium on Date Palm in Saudi Arabia: Challenges of Processing, Marketing and Pest Control (pp. 5–8). Al-Hassa, Saudi Arabia: Date Palm Research Center, King Faisal University.
26. Harhash, M. M., and Abdel-Nasser, G. (2010). Improving fruit set, yield and fruit quality of 'Khalas' tissue culture-derived date palm through bunch spraying with potassium and/or boron. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4, 4164–4172.
27. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., and Beaton, J. D. (2005). Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management (7th ed.). Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
28. Hashemi SS, Abbaslou H. 2016. Potassium reserves in soils with arid and semi-arid climate in southern Iran: a perspective based on potassium fixation. Iran Agricultural Research. 35 (2): 88-95.
29. Hesami A, Bavi R, Hashemi A, Pouzesh Shirazi M. 2025. Yield and fruit quality responses of 'Kabkab' date palm (*Phoenix dactylifera* L.) to potassium and iron fertilization under calcareous soil conditions. BMC Plant Biology. 25: 1631
30. Hosseinpur, A.R., and Motaghian, H.R. (2013). Application of kinetic models in describing soil potassium release characteristics and their correlations with potassium extracted by chemical methods. *Pedosphere*, 23(4), 482–492. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60041-7.
31. Hosseinpur, A.R., and Zarenia, M. 2012. Evaluating chemical extractants to estimate available potassium for pinto beans (Phaseolus vulgaris) in some calcareous soils. *Plant, Soil and Environment*, 58(1): 42-48.
32. Jackson, M. L. (1975). *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall.
33. Javan, M., Abtahi, A., Zareian, G., and Haghighatnia, H. (2025). Soil mineralogy and potassium forms distribution and release in some calcareous soils of the Darab Region, Iran. *Plos one*, 20(12), e0334155.
34. Jones, J. B. (1990). *Plant tissue analysis for diagnostic purposes*. Soil and Plant Analysis Council.
35. Khalili, S., Owliaie, H. R., Chakeralhoseini, M. R., and Adhami, E. (2025). Assessment of potassium status in soils and orange orchards of Fars and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces. *Iranian Journal of Soil Research*, 39(1), 75–101. (in Persian)
36. Lopez-Pineiro, A. and Garcia Navarro, A. (1997) Potassium release kinetics and availability in unfertilized vertisols of south western Spain. *Soil Science*, 162, 912-918.
37. Molavi, R., Baghernejad, M., Ghasemi-Fasaei, R., and Zarei, M. (2020). Release characteristics of potassium from native reserves of some calcareous soils of Iran and their relationship with yield and potassium uptake by ryegrass (Lolium perenne L.). *Soil Research*, 58, 770–778.
38. Morgan, M. F. (1941). Chemical soil diagnosis by the universal soil testing system. Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin 450.
39. Naderizadeh, Z., Khademi, H., and Ayoubi, S. (2024). Occurrence of palygorskite and the major soil properties influencing its distribution in selected soils of Bushehr Province. *Journal of Water and Soil Science*, 28(1), 1–21. (in Persian)
40. Najafi-Ghiri, M. (2010). *Study of morphological and mineralogical properties and potassium status of soils of Fars province*. Ph.D. thesis, Department of Soil Science, Shiraz University, Iran. (in Persian)

41. Najafi-Ghiri, M., A. Abtahi, H. R. Owliaie, S.S. Hashemi, and H. Koohkan. 2011. Factors affecting potassium pools distribution in calcareous soils of Southern Iran. Arid Land Research and Management, 25(4), 313-327.
42. Najafi-Ghiri, M., Owliaie, H. R., and Boostani, H. R. (2019). Factors affecting chemical forms of potassium distribution in some calcareous soils of Kohgilouye and Boyerahmad Province. *Applied Soil Research*, 7(2), 196–207. (in Persian)
43. Owliaie, H. R., Heydarmah, S., Adhami, E., and Najafi-Ghiri, M. (2014). Kinetics of nonexchangeable potassium release in relation to clay mineralogy in some calcareous soils of Kohgilouye Province. *Journal of Water and Soil Science*, 18(68), 99–110. (in Persian)
44. Poozesh Shirazi M, Enjavinezhad SM, Moosavi AA. 2024. Chemical fractions of potassium in arid region calcareous soils: The impact of microclimates and physiographic variability. PLOS ONE. e0314239 (11): 19.
45. Pratt, P. F. (1965). Potassium. In *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 1022-1030). ASA.
46. Rhoades, J. D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 417-434). ASA, SSSA.
47. Rosolem CA, Steiner F. Effects of soil texture and rates ofKinput on potassium balance in tropical soil. *European Journal Soil Science*, 2017;68(5):658– 66. https://doi.org/10.1111/ejss.12460
48. Sarkar, G. K., Chattopadhyay, A. P., and Sanyal, S. K. (2013). Release pattern of non-exchangeable potassium reserves in Alfisols, Inceptisols and Entisols of West Bengal, India. *Geoderma*, 207–208, 8–14.
49. Shahbazi, K., Cheraghi, M., Marzi, M., and Hasheminasab Zavareh, K. S. (2022). The effect of extractant type and soil/extractant ratio on the extraction of soil available potassium. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1481–1497. (in Persian)
50. Simmons, R. W., Peverill, K. I., and Heffernan, B. (1996). Evaluation of soil test methods for available potassium. *Australian Journal of Soil Research*, 34(3), 369-380.
51. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 475-490). ASA, SSSA.
52. Tofighi, H. (1999). Comparison of four chemical extractants for estimation of available potassium in paddy soil of north of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 30(3), 631–648. (in Persian)
53. Ullah Khan, S., Ahmad Alizai, A., Ahmed, N., Sayed, S., Junaid, M., Kanwal, M., Ahmed, S., Alqubaie, A. I., Alamer, K. H., and Ali, E. F. (2022). Investigating the role of potassium and urea to control fruit drop and improve fruit quality of 'Dhakki' date palm. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3806–3814.
54. Zareian, G. R., Farpoor, M. H., Hejazi, M. M., and Jafari, A. (2017). Relationship of potassium forms with soil physicochemical properties and clay mineralogy in Ghrehbagh Plain, Fars Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(2), 315–328. (in Persian)
55. Zarrabi, M., and Jalali, M. (2009). A comparison of some extractants used for the assessment of available potassium in some Hamadan soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 40(2), 149–155. (in Persian)
56. Zörb, C., Senbayram, M., and Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture: Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669.