Research Article

Agricultural Engineering., 48(4) (2025) 611- 626 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2026.51655.1798 ISSN (E): 2588-5944

Determination of the Optimal Dilution Ratio of Complete Liquid NPK Fertilizer to Reduce Nitrate Leaching & Improve Phosphorus & Potassium Distribution in Calcareous Loamy Soil Columns under Drip Irrigation Simulation

Sh. Soleimani Manesh[1] , F. Sadegh-Zadeh[2*] , M.A. Bahmanyar[3] and S.M. Emadi[4]

1. Master's degree in Soil Science , Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Iran
3. Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Iran
4. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Iran

Received: 29 January 2026 Accepted: 6 March 2026 *Corresponding Author: Fardin.upm@gmail.com

Abstract

Introduction Nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) are considered among the most important essential macronutrients for plants. The vertical movement of nitrate beyond the root zone (which was simulated to a depth of 30 cm in this study) is one of the primary factors contributing to groundwater contamination and the incidence of eutrophication in surface waters. In the calcareous soils utilized in this research, characterized by a loam texture, the behavior of these elements under the application of liquid fertilizers and drip irrigation has not been fully elucidated. This study was conducted with the objective of determining the optimal dilution ratio for a complete NPK liquid fertilizer and investigating the vertical dynamics of nitrate, phosphorus, and potassium in calcareous loam soil. The fertilizer used in this research was a base commercial liquid fertilizer under the brand name “Vahishta”.

Materials and Methods The experiment was designed as a factorial experiment within a completely randomized design, with three replications, using soil columns (35 cm in height and 2.8 cm in diameter). The study was carried out in the Soil Fertility Laboratory of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources in 2024 (1403 Solar Hijri). The treatments comprised four dilution levels of the complete NPK liquid fertilizer (Control, 1:5, 1:10, and 1:20 fertilizer to water) and three soil depths (0 to 10 cm, 10 to 20 cm, and 20 to 30 cm). The soil exhibited a loam texture, a pH of 7.7, and a high calcium carbonate content (30%). Irrigation was performed in three stages, with the first stage being the only one accompanied by fertilizer application. Soil moisture was maintained at 60% of saturation.

Results and Discussion Following the separate analysis of the water drain from each stage and the soil from each layer, the results indicated that at a 1:5 dilution, 48% of the soluble nitrate was transported to the 30 cm depth during the first irrigation stage. In contrast, this amount decreased to 18% in the 1:10 dilution, equivalent to a 62% reduction compared to the 1:5 treatment. Phosphorus demonstrated very low mobility, with over 92% of it being fixed in the 0 to 10 cm soil layer. Potassium exhibited moderate mobility and, unlike nitrate, was associated with a relatively uniform distribution throughout the soil profile (0 to 30 cm).

© 2025 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.

The 1:10 dilution ratio established the best balance between the availability of nutrients for potential plant uptake at depth and the reduction of nitrate efflux from the 30 cm depth.

Conclusion The results of this research showed that the application of the complete NPK liquid fertilizer at a 1:10 dilution ratio within a drip irrigation system is recommended as a practical strategy for optimal nutrient management and reducing the risk of water source pollution in the calcareous soils of Iran's arid and semi-arid regions.

Keywords: ***Calcareous soil, Drip irrigation, Fertigation, Leaching, Loamy soil, Mobility, Retention, Soil columns.***

مقاله پژوهشی

تعیین نسبت بهینه رقیق‌سازی کود مایع کامل NPK برای کاهش آبشویی نیترات و بهبود توزیع فسفر و پتاسیم در ستون‌های خاک آهکی لومی با شبیه سازی آبیاری قطره‌ای

شقایق سلیمانی منش[۱]، فردین صادق زاده[۲*] ، محمدعلی بهمنیار[۳] و سید مصطفی عمادی[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

کلمات کلیدی:
آبیاری قطره‌ای،
تثبیت،
تحرک،
خاک آهکی،
خاک لومی،
کودآبیاری،
آبشویی

* عهده دار مکاتبات

Email: Fardin.upm@gmail.com

چکیده

نیتروژن، فسفر و پتاسیم از مهم‌ترین عناصر غذایی پرمصرف برای گیاهان به‌شمار می‌روند. جابجایی عمقی نیترات به خارج از ناحیه ریشه (که در این مطالعه تا عمق ۳۰ سانتی‌متری شبیه‌سازی شده) یکی از عوامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی و بروز پدیده پرغذایی (اوتریفیکاسیون) آب‌های سطحی است. در خاک‌های آهکی مورد استفاده در این پژوهش که دارای بافت لومی بودند، رفتار این عناصر تحت کاربرد کودهای مایع و آبیاری قطره‌ای به‌طور کامل شناخته‌نشده است. این پژوهش با هدف تعیین نسبت بهینه رقیق‌سازی کود مایع کامل NPK و بررسی پویایی عمودی نیترات، فسفر و پتاسیم در خاک آهکی لومی انجام شد. کود مورد استفاده در این پژوهش، یک کود مایع تجاری پایه با برند «وهیشتا» است.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در ستون‌های خاک (ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و قطر ۸/۲ سانتی‌متر) در آزمایشگاه حاصلخیزی خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۳ اجرا شد. تیمارها شامل چهار سطح رقیق‌سازی کود مایع کامل NPK (شاهد، ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ کود به آب) و سه عمق خاک (۰ تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) بود. خاک دارای بافت لوم، pH=۷/۷ و کربنات کلسیم بالا بود (۳۰٪). آبیاری در سه مرحله انجام شد که فقط مرحله اول همراه با کود بود و رطوبت خاک تا ۶۰ درصد اشباع حفظ شد. پس از تجزیه جداگانه زه‌آب هر مرحله و خاک هر لایه، نتایج نشان داد که در رقیق‌سازی ۱:۵، ۴۸ درصد از نیترات محلول در مرحله اول آبیاری به عمق ۳۰ سانتی‌متری منتقل شد، در حالی که این مقدار در رقیق‌سازی ۱:۱۰ به ۱۸ درصد کاهش یافت (معادل کاهش ۶۲ درصدی

نسبت به تیمار ۱:۵). فسفر تحرک بسیار کمی داشت و بیش از ۹۲ درصد آن در لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری خاک تثبیت شد. پتاسیم تحرک متوسطی داشت و برخلاف نیترات، با توزیع نسبتاً یکنواخت در پروفیل خاک (۰ تا۳۰ سانتی‌متری) همراه بود. نسبت رقیق‌سازی ۱:۱۰ بهترین تعادل را بین در دسترس بودن عناصر غذایی برای جذب احتمالی گیاه در عمق خاک و کاهش خروج نیترات از عمق ۳۰ سانتی‌متری برقرار کرد. بنابراین، کاربرد کود مایع کامل NPK با نسبت رقیق‌سازی ۱:۱۰ در سیستم آبیاری قطره‌ای به‌عنوان راهکاری عملی برای مدیریت بهینه عناصر غذایی و کاهش ریسک آلودگی منابع آبی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران توصیه می‌شود.

مقدمه

نیتروژن، فسفر و پتاسیم از عناصر ضروری و پرمصرف برای تغذیه و رشد گیاهان هستند که نقش کلیدی در فرآیندهای متابولیکی و افزایش عملکرد محصول ایفا می‌کنند (۱۵و۲). نیتروژن به چندین شکل وارد خاک می‌شود. فرم نیترات (NO_3^-) و آمونیوم از فرم‌های قابل جذب توسط گیاه هستند که فرم آمونیوم (NH_4^+) آن در خاک متحرک نیست (معمولاً در لایه‌های بالاتر انباشته می‌شود). نیترات (NO_3^-) به دلیل داشتن بار منفی و دافعه الکترواستاتیکی با سطح منفی کانی‌های رسی، توسط ذرات خاک جذب نمی‌شود و بسیار متحرک است (۶،۷،۱۲). جابجایی عمقی نیترات به خارج از عمق مؤثر برای جذب توسط گیاه، که اغلب به عنوان فرآیند آبشویی شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین مسیرهای هدررفت نیتروژن و عامل بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات (فراتر از حد مجاز ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) و ایجاد پدیده پرغذایی (اوتریفیکاسیون) در آب‌های سطحی است (۲۱و۶). بنابراین انجام مطالعات به منظور روشن شدن اثر عوامل مختلف از جمله بافت خاک، ساختمان خاک و مقدار آهک خاک، بر حرکت نیترات مهم است.

پس از نیتروژن، فسفر یکی از عناصر ضروری و پرمصرف برای رشد گیاهان است. این عنصر در خاک به دو شکل آلی و معدنی وجود دارد . فسفر در خاک‌های اسیدی و قلیایی به‌ترتیب به صورت اکسیدهای آهن، آلومینیوم و اکسیدهای کلسیم تثبیت می‌شود (۸،۱۲،۱۴). حرکت فسفر در خاک عمدتاً از طریق فرایند انتشار انجام می‌گیرد. سرعت و میزان حرکت فسفر موجود در کودها در خاک به رطوبت خاک، فشردگی و ظرفیت جذب فسفر بستگی دارد (۱۲و۳). در میان کانی‌های فسفاته هیدروکسی آپاتیت منبع اصلی فسفات مورد استفاده در تولید کودهای‌فسفاته صنعتی است. طیف وسیعی از کودهای فسفر در سیستم‌های کشاورزی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند، اگرچه رایج‌ترین آنها شامل کودهایی است که در افزایش غلظت ارتوفسفات در محلول خاک مؤثر هستند؛ مونو کلسیم فسفات، مونو آمونیوم فسفات و دی آمونیوم فسفات هستند که پویایی آنها در خاک‌ها بررسی شده است (۱۴و۱۲).

پتاسیم در خاک به چهار شکل مختلف شامل محلول، قابل تبادل، غیرقابل تبادل و پتاسیم‌ساختاری وجود دارد (۲۴و۲۰). از بین چهار شکل، پتاسیم محلول و پتاسیم قابل‌تبادل برای گیاه قابل جذب هستند، ولی پتاسیم غیرقابل‌تبادل و ساختاری برای تغذیه گیاه در دسترس نیستند. پتاسیم در خاک از طریق انتشار و جریان توده‌ای حرکت می‌کند. انتشار مهم‌ترین مکانیسم مؤثر در حرکت کود پتاسیم به سمت ریشه جذب است (۲۴). انتشار پتاسیم

در محلول خاک رخ می‌دهد و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله رطوبت حجمی و دما قرار می‌گیرد. رطوبت خاک از طریق تأثیرات آن بر رشد و فعالیت ریشه بر قابلیت دسترسی پتاسیم و شار انتشاری و همچنین جذب پتاسیم تأثیر می‌گذارد. اثرات رطوبت خاک بر تحرک پتاسیم، دینامیک پتاسیم خاک، تثبیت پتاسیم خاک، رشد گیاه و جذب پتاسیم مورد مطالعه قرار گرفته است. پتاسیم بصورت کودهای سولفات پتاسیم و منیزیم، نیترات پتاسیم، فسفات پتاسیم، کربنات پتاسیم، بی‌کربنات پتاسیم، تیوسولفات پتاسیم در دسترس می‌باشد (۲۴).

حرکت آب یکی از فرآیندهای مهم در حمل عناصر غذایی موجود در کود است. آبیاری بارانی و قطره‌ای از جمله آبیاری تحت فشار به‌شمار می‌روند. آبیاری قطره‌ای، یکی از پرکاربردترین روش‌های آبیاری کارآمد است که تنظیم دقیق رطوبت خاک را بر اساس نیاز آب ریشه و ویژگی‌های خاک فراهم می‌کند و منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود. این فناوری با هدف تأمین آب و عناصر غذایی به‌صورت مستقیم در محدوده در دسترس برای جذب توسط ریشه، باعث کاهش هدررفت آب و بهبود محیط خاک می‌شود. امروزه کشاورزان کودهای مورد نیاز گیاه را ابتدا حل می‌کنند و سپس در آبیاری تحت فشار مصرف می‌نمایند (۹،۱۰،۱۳).

در خاک‌های آهکی که بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران را تشکیل می‌دهند، تثبیت شدید فسفر و تحرک بالای نیترات از چالش‌های اصلی در مدیریت کوددهی به‌شمار می‌روند. کاربرد کودهای مایع کامل NPK از طریق سیستم‌های کودآبیاری قطره‌ای می‌تواند توزیع بهتر عناصر غذایی را فراهم کند، اما غلظت بالای کود ممکن است منجر به جابجایی عمقی شدید نیترات شود. در این راستا، یافته‌های اولیه نشان‌داد که مقدار نیترات منتقل شده به عمق ۳۰ سانتی‌متری در تیمار ۱:۵ (کود مایع رقیق شده با نسبت ۱ به ۵) به میزان ۴۸ درصد کاهش یافت؛ این موضوع ضرورت بررسی دقیق‌تر نسبت‌های بهینه رقیق‌سازی و اثرات آن بر جابجایی عمقی نیترات را در کنار حفظ دسترسی فسفر و پتاسیم برجسته می‌سازد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنظیم نسبت رقیق‌سازی کود مایع و زمان تزریق آن در چرخه آبیاری می‌تواند جابجایی عمقی نیترات را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد، در حالی که دسترسی فسفر و پتاسیم در ناحیه ریشه حفظ می‌شود (۲و۱).

با توجه به گسترش روزافزون سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و کاربرد کودهای مایع در خاک‌های آهکی ایران، بررسی پویایی و آبشویی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در این شرایط ضروری به‌نظر می‌رسد. لذا، این پژوهش با هدف بررسی تحرک عناصر پرمصرف (NPK) ناشی از کود مایع، تعیین نسبت بهینه رقیق‌سازی آن برای کاربرد در سیستم آبیاری قطره‌ای، و ارزیابی رفتار عمودی این عناصر در خاک آهکی لومی تحت شرایط شبیه‌سازی‌شده انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار و سه تکرار در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا گردید. نسبت‌های رقیق‌سازی بر اساس محدوده‌های رایج در کاربردهای عملی کودآبیاری انتخاب شدند. فاکتورهای آزمایش شامل چهار سطح رقیق‌سازی (A_0: شاهد بدون کود، A_1 ۱:۵، A_2 ۱:۱۰ و A_3 ۱:۲۰ کود مایع: آب آبیاری) و سه سطح عمق خاک (D_1 ۰ تا ۱۰، D_2 ۱۰ تا ۲۰ و D_3 ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) بودند. استفاده از آزمایش ستون خاک امکان کنترل دقیق شرایط و شبیه‌سازی حرکت عمودی عناصر را فراهم کرد.

نمونه‌برداری خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر مزرعه تحقیقاتی‌دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. خاک جمع‌آوری‌شده هوا خشک گردید و از الک ۲

میلی‌متری عبور داده شد. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری (۴)، کربن آلی با روش والکی و بلک (۲۱)، هدایت الکتریکی و pH خاک با روش عصاره اشباع (۱۸)، کربنات کلسیم معادل خاک با روش تیتراسیون (۱۶)، نیتروژن خاک به روش کجلدال (۵)، نیترات هم با روش اسپکتروفتومتری با اسید سولفوسالیسیلیک، فسفر خاک به روش اولسن و با دستگاه اسپکتروفتومتر (۱۷)، و پتاسیم تبادلی نیز به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار و با دستگاه فلیم فتومتر (۷) اندازه گیری شد.

ستون‌های خاک با استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلن ضخیم به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۸/۲ سانتی‌متر ساخته شدند. انتهای تحتانی هر ستون با توری و لایه نازکی از شن (۲ تا ۵ میلی‌متر) پوشانده شد تا خاک حفظ شود و زهکشی مناسب ایجاد گردد. در هر ستون، ۸۱۸ گرم خاک خشک با وزن مخصوص ظاهری ۲/۴۶ گرم‌برسانتی‌مترمکعب، تخلخل کل ۴۷ درصد، اشباع ۶۰ درصد، ظرفیت زراعی ۲۷ درصد و رطوبت اولیه ۲/۳۸ درصد کوبیده شد.

در این پژوهش، برای ارزیابی اثر سطوح مختلف تغذیه‌ای، غلظت نهایی عناصر غذایی در محلول‌های مورد استفاده برای تیمارهای مختلف، به صورت هدفمند متغیر بود. این تنظیمات نه تنها با تغییر حجم آب، بلکه با تغییر در میزان یا غلظت خود کود تجاری صورت گرفت. کود مایع تجاری مورد استفاده (با نام تجاری وهیشتا) که به دلیل داشتن ۱۷ عنصر ضروری رشد گیاه با عنوان کود مایع کامل شناخته می‌شود، حاوی نیتروژن (نیترات) با غلظت ۲/۱۴٪، فسفر با غلظت ۱/۳۳٪ و پتاسیم با غلظت ۱/۹۸٪ است.

در این آزمایش، سه مرحله آبیاری انجام شد. آبیاری اول همراه با کود برای تیمارهای A_1، A_2 و A_3 و با آب خالص برای تیمار شاهد A_0 انجام گرفت. برای این منظور، حجم کل ۴۹۰ میلی‌لیتر محلول برای هر ستون تهیه شد. این محلول شامل آب یا آب و کود با رقیق‌سازی‌های ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ برای تیمارهای A_1، A_2 و A_3 و آب خالص برای تیمار شاهد A_0 بود. حجم محلول (آب یا آب و کود) بر اساس محاسبه دقیق مقدار آب لازم جهت حفظ رطوبت در درصد اشباع ۶۰٪ خاک و با در نظر گرفتن وزن خاک موجود در هر ستون (۸۱۸ گرم) تعیین گردید تا شرایط آبیاری در همه تیمارها یکسان و کنترل‌شده اعمال شود. محلول تهیه شده از بالای ستون به‌صورت آبیاری قطره‌ای به خاک اضافه گردید؛ به این صورت که با اتصال شیر آب در بالای هر ستون، کود مایع یا آب به‌صورت قطره‌قطره به خاک تزریق شد. پس از افزودن محلول، وزن ستون‌ها (۱۷۵۱ گرم) اندازه‌گیری شد تا مشخص شود که رطوبت خاک به ۶۰ درصد اشباع رسیده است. سپس زه‌آب‌های خروجی جمع‌آوری شدند و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری شد. آبیاری در مرحله دوم و سوم بدون کود انجام گرفت. برای شروع هر مرحله، وزن ستون‌ها اندازه‌گیری شد و هنگامی که وزن هر ستون به ۱۴۹۰/۶۴ گرم رسید، که نشان‌دهنده رسیدن رطوبت خاک به ۶۵ درصد ظرفیت زراعی بود، آبیاری با آب خالص آغاز شد. در هر مرحله، به هر ستون معادل ۲۲۰/۸۶ میلی‌لیتر آب اضافه شد. پس از آن، زه‌آب‌های خروجی جمع‌آوری و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری گردید. در پایان نیز با وارد کردن ضربه به اطراف لوله پلی‌اتیلن، خاک موجود به‌صورت ستونی و دست‌نخورده خارج شد. هر ستون خاک به سه قسمت مساوی تقسیم گردید و از بالای ستون به سمت پایین با شماره‌های ۱ تا ۳ شماره‌گذاری شد. سپس، نمونه‌های خشک‌شده در کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفتند تا آزمایش‌های تجزیه خاک روی آن‌ها انجام شود. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistix نسخه ۱۰ تجزیه و تحلیل آماری شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی رقیق‌سازی کود مایع بر غلظت نیترات، فسفر و پتاسیم در زه‌آب تمام مراحل آبیاری و همچنین در لایه‌های مختلف خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر مراحل آبیاری و اثر متقابل رقیق‌سازی × مراحل آبیاری بر غلظت نیترات و پتاسیم در زه‌آب و اثر عمق خاک و اثر متقابل رقیق‌سازی × عمق بر غلظت هر سه عنصر در خاک معنی‌دار بود (جدول ۲ و ۳).

جدول(۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table (1) Selected physical & chemical characteristics of the studied soil

پتاسیم قابل دسترس	فسفر قابل دسترس	نیتروژن کل	قابلیت هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربنات کلسیم	کربن آلی	شن	سیلت	رس	وزن مخصوص ظاهری	بافت خاک
Available K	Available P	Total N	(EC)	pH	$CaCO_3$	(OC)	Sand	Silt	Clay	Bulk Density	Soil texture
($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	(%)	(dSm^{-1})		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	($g\ cm^{-3}$)	
184.38	9	0.15	0.91	7.7	30	1.57	38	49	14	1.3	لوم

جدول(۲) تجزیه واریانس اثر ساده نسبت‌های مختلف کود مایع کامل به آب در دورهای مختلف آبیاری بر غلظت نیترات، فسفر و پتاسیم در خاک.

Table (2) Analysis of variance for the simple effects of different ratios of complete liquid fertilizer to water applied at various irrigation cycles on soil nitrate, phosphorus, & potassium concentrations.

غلظت پتاسیم در خاک Potassium concentration in soil			غلظت فسفر در خاک Phosphorus concentration in soil			غلظت نیترات در خاک Nitrate concentration in soil			درجه آزادی df	منابع تغییرات Sources of variance
مرحله سوم The third stage	مرحله دوم The second stage	مرحله اول The first stage	مرحله سوم	مرحله دوم The second stage	مرحله اول The first stage	مرحله سوم The third stage	مرحله دوم The second stage	مرحله اول The first stage		
4209	64650	510777	0.5107	1.1691	5591	2437	20789	98	2	تکرار Repetition
1267217**	1677833**	1.267**	58.7965**	74.6817**	418814**	1308068**	1384472**	4235531**	3	غلظت کود مایع کامل liquid Complete fertilizer concentration
2097	80673	519765	0.0915	1.2040	3979	1201	10060	86547	6	خطا Error
10.48	27	26.79	8.01	24.08	12.55	7.05	13.09	18.22		ضریب تغییرات (٪) C.V (%)

** بیانگر اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

** represent significant effect at $P < 0.01$.

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر نسبت‌های مختلف کود مایع کامل به آب در عمق‌های مختلف و اثر متقابل آنها بر غلظت نیترات، فسفر و پتاسیم در خاک.

Table 3. Analysis of variance for the effects of different complete liquid fertilizer-to-water ratios, soil depths, & their interaction on soil concentrations of nitrate, phosphorus, & potassium.

منابع تغییرات Sources of variance	درجه آزادی df	غلظت نیترات در خاک Nitrate concentration in soil	غلظت فسفر در خاک Phosphorus concentration in soil	غلظت پتاسیم در خاک Potassium concentration in soil
تکرار Repetition	2	36509	7.5	3235
غلظت کود مایع کامل Complete liquid fertilizer concentration	3 2 6	9522194**	71067.3**	7885016**
عمق Depth		916510**	4226.7**	345707**
غلظت کود مایع کامل× عمق Complete liquid fertilizer concentration × depth		518126**	8920.6**	272991**
خطا Error	22	41200	315.1	7875
ضریب تغییرات (٪) C.V (%)		5.88	15.77	9.23

** بیانگر اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

** represent significant effect at P < 0.01.

نیترات خاک

در مرحله اول آبیاری (همراه با کود)، با افزایش غلظت کود مایع از شاهد تا رقیق‌سازی ۱:۵، غلظت نیترات زه‌آب به‌طور معنی‌داری در سطح ۱ درصد افزایش یافت و بیش‌ترین مقدار در تیمار ۱:۵ مشاهده گردید. ستون‌های شکل ۱ نشان می‌دهد که تیمار ۱:۵ بالاترین غلظت نیترات را در مرحله اول داشت و نسبت به شاهد و تیمارهای رقیق‌تر (۱:۱۰ و ۱:۲۰) اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد نشان داد، در حالی که تیمار ۱:۲۰ کم‌ترین افزایش را نسبت به شاهد نشان داد. این رفتار عمدتاً ناشی از حلالیت بسیار بالای نیترات و بار منفی آن است که موجب دافعه الکترواستاتیکی با سطوح منفی کانی‌های رسی ۲:۱ در خاک آهکی می‌شود (کامرون وهمکاران ۲۰۱۳)[1]. در مراحل دوم و سوم آبیاری که فقط با آب مقطر انجام شد، غلظت نیترات زه‌آب در همه تیمارها به‌شدت کاهش یافت، به‌طوری‌که در مرحله سوم در اکثر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد مشاهده نگردید. این کاهش سریع بیانگر آن است که بخش عمده نیترات همراه با اولین زه‌آب خارج شده و مقدار باقی‌مانده در خاک به‌سرعت تحلیل می‌رود (شکل ۱). در شکل ۱ غلظت نیترات در مراحل دوم و سوم برای تیمارهای رقیق‌تر (۱:۱۰ و ۱:۲۰) به سطوح نزدیک به شاهد رسید و تفاوت‌های معنی‌دار فقط در مرحله اول مشاهده شد؛ این الگو با آبشویی سریع نیترات در خاک‌های آهکی لوم همخوانی دارد. علاوه بر این، کاهش غلظت نیترات در مراحل بعدی احتمالاً نشان‌دهنده تأثیر بافت لوم و ظرفیت نگهداری آب خاک است که بخشی از نیترات را حفظ کرده و اجازه خروج تدریجی می‌دهد (لیو و همکاران ۲۰۲۴[2]، لی و همکاران ۲۰۱۸[3]). در توزیع عمقی نیز بیش‌ترین تجمع نیترات در لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری و در تیمارهای غلیظ‌تر (۱:۵ و ۱:۱۰) مشاهده شد و با افزایش عمق کاهش یافت (شکل ۲). در شکل ۲، در رقیق‌سازی ۱:۵ غلظت نیترات در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بیش‌ترین مقدار را نسبت به

1- Cameron *et al*

2- Liu *et al*

3- Li *et al*

عمق‌های ۱۰ تا ۲۰ و ۰ تا ۱۰ نشان داد؛ در رقیق‌سازی ۱:۱۰ عمق ۱۰ تا۲۰ بالاترین بود و سپس عمق ۰ تا ۱۰ و ۲۰ تا ۳۰؛ در رقیق‌سازی ۱:۲۰ عمق ۰ تا ۱۰ بیش‌ترین و سپس ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰، و در شاهد نیز عمق ۰ تا ۱۰ بیش‌ترین بود؛ این الگوها نشان‌دهنده تأثیر غلظت کود بر توزیع عمقی نیترات است و تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها در تمام عمق‌ها مشاهده گردید. یافته کلیدی این پژوهش، که در راستای دانش پیشین (وانگ و همکاران ۲۰۲۴[1]، ژائو و همکاران ۲۰۲۴[2]، لی و همکاران ۲۰۱۸[3] و لیو و همکاران ۲۰۲۴[4]) است، نشان می‌دهد که رقیق‌سازی ۱:۱۰، ضمن حفظ غلظت کافی نیترات در لایه‌های سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) برای جذب گیاه، توانست آبشویی نیترات را تا ۶۳ درصد نسبت به کاربرد غلیظ‌تر (۱:۵) کاهش دهد، که این میزان با یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۴) در خصوص خروج ۴۸ درصد نیترات در اولین زه‌آب تیمار غلیظ مطابقت دارد. الگوی مشاهده‌شده کاهش تدریجی نیترات با عمق، ناشی از جابجایی عمودی همراه با جریان آب و رقیق‌سازی آن است؛ چرا که نیترات به دلیل ماهیت آنیونی، جذب سطحی قابل توجهی توسط کانی‌های رسی ندارد و بنابراین پویایی آن بیشتر تحت تأثیر جریان آب قرار می‌گیرد. توزیع عمقی یکنواخت‌تر نیترات در تیمارهای رقیق‌تر، تعادل بهتری بین تحرک بالای نیترات و محدود شدن آبشویی شدید را نشان می‌دهد که می‌تواند به کاهش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی کمک نماید.

فسفر خاک

غلظت فسفر در زه‌آب در تمام مراحل آبیاری و در همه تیمارها بسیار کم و نزدیک به صفر بود، و تفاوت معنی‌داری بین تیمارها دیده نشد (شکل ۳). در شکل ۳،

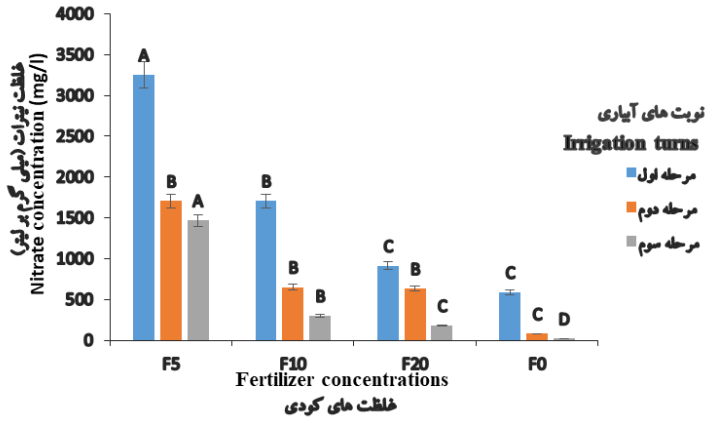
غلظت فسفر در مرحله اول (همراه با کود) برای تیمارهای کوددار به‌طور معنی‌داری بالاتر از مراحل دوم و سوم بود، با بیش‌ترین مقدار در رقیق‌سازی ۱:۵، سپس ۱:۱۰ و ۱:۲۰، و کم‌ترین در شاهد، که نشان‌دهنده آبشویی ناچیز فسفر حتی در غلظت‌های بالا است. علاوه بر این، افزایش غلظت فسفر در مرحله اول بیانگر تأثیر مستقیم کود مایع است، اما کاهش سریع در مراحل بعدی به دلیل تثبیت سریع در خاک آهکی رخ می‌دهد. بیش از ۹۲ درصد فسفر افزوده در لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری باقی ماند و حرکت عمودی قابل‌توجهی نداشت (شکل ۴).

در شکل ۴، لایه ۰ تا۱۰ سانتی‌متری بیش‌ترین غلظت فسفر را در تیمارهای کوددار نشان داد و تفاوت معنی‌داری با شاهد داشت، در حالی که در لایه‌های ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر غلظت فسفر به کم‌ترین مقدار نزدیک صفر رسید و مشابه شاهد بود. این رفتار عمدتاً به واکنش سریع یون فسفات با کلسیم خاک و تشکیل ترکیبات بسیار کم‌محلول فسفات کلسیم، مانند هیدروکسی‌آپاتیت و اکتاکلسیم فسفات در محیط قلیایی با pH حدود ۷/۷، و وجود کربنات کلسیم بالا در خاک، مربوط است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین هم‌راستا است. هستربرگ(۲۰۱۰)[5] در مروری بر مکانیسم‌های جذب فسفر در خاک‌های آهکی نشان داد که در pH بالاتر از ۷/۲، بیش از ۹۵ درصد فسفات افزوده‌شده در ساعات اولیه به صورت رسوبات فسفات کلسیم تثبیت می‌شود و تحرک آن محدود می‌گردد. شومانز و شاردون (۲۰۱۵)[6] در مطالعه بر خاک‌های آهکی اروپا با کاربرد کودهای فسفری مایع گزارش کردند که کمتر از ۱ درصد فسفر پس از چندین آبیاری وارد زه‌آب می‌شود و تقریباً تمام آن در ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر بالای پروفیل خاک تثبیت می‌شود. لیو و همکاران (۲۰۱۹)[7] در آزمایش ستونی مشابه در خاک آهکی ایران، با کاربرد کود فسفری مایع از طریق آبیاری قطره‌ای مشاهده کردند که بیش از ۹۰ ٪ فسفر در لایه ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری باقی می‌ماند و مقدار قابل‌توجهی به عمق‌های‌پایین‌تر نفوذ نمی‌کند.

به‌تازگی نیز ژائو و همکاران (۲۰۲۴)[8] در خاک لومی آهکی با کودآبیاری قطره‌ای تأکید کردند که تثبیت فسفر در

1- Wang *et al*
2- Zhao *et al*
3- Li *et al*
4- Liu *et al*
5- Hesterberg
6- Schoumans & chardon
7- Lio *et al*
8- Zhao *et al*

خاک‌های با کربنات کلسیم بالای ۲۰ درصد به‌قدری بالاست که حتی در غلظت‌های بالای کود مایع، آبشویی فسفر ناچیز باقی می‌ماند. نتایج این پژوهش نیز تأیید می‌کند که در خاک‌های آهکی لومی ایران، فسفر کود مایع تقریباً کاملاً در ناحیه ریشه حفظ شده و خطر آلودگی زیست‌محیطی بسیار پایینی دارد.

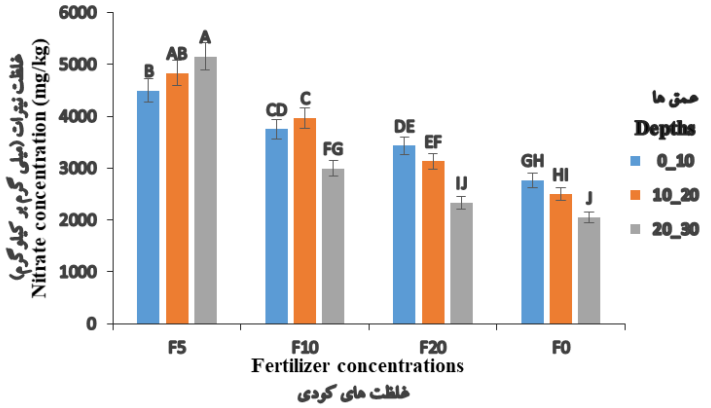


شکل ۱_ مقایسه میانگین رقت‌های مختلف کود مایع کامل در مراحل آبیاری بر غلظت نیترات زه‌آب

Fig. 1. Mean comparison of the average of different dilutions of complete liquid fertilizer in irrigation stages on nitrate concentration in drain water.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد. (F_0، F_5، F_{10}، F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و آب و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively).



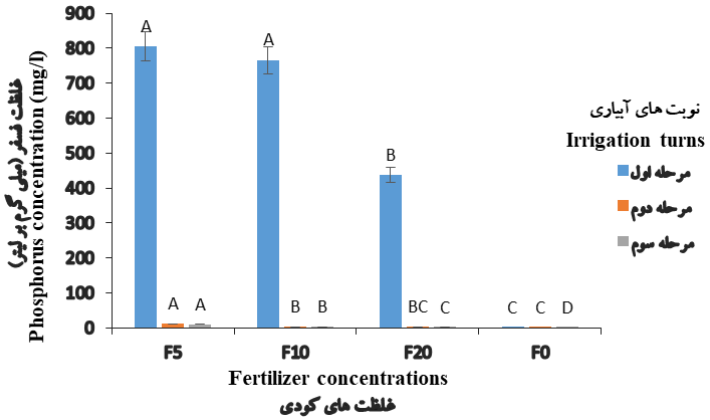
شکل ۲_ مقایسه میانگین تاثیر نسبت‌های مختلف کود مایع کامل در عمق‌های مختلف بر غلظت نیترات خاک

Fig. 2. Mean comparison of the average effect of different ratios of complete liquid fertilizer at different depths on soil nitrate concentration.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

(F_0، F_5، F_{10}، F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و آب و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively).



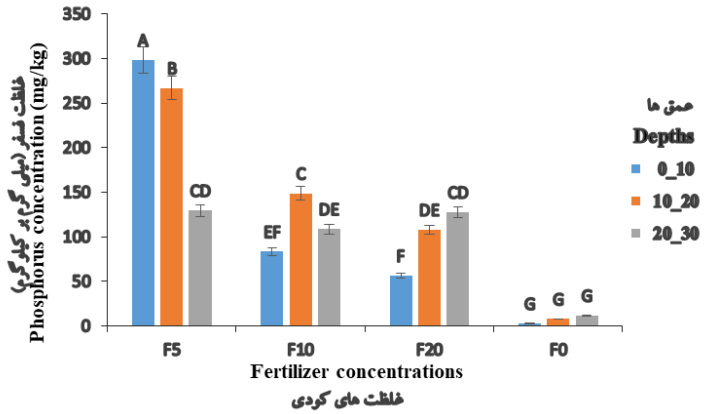
شکل ۳_ مقایسه میانگین رقت‌های مختلف کود مایع کامل در مراحل آبیاری بر غلظت فسفر زه‌آب

Fig. 3. Mean comparison of the average of different dilutions of complete liquid fertilizer in irrigation stages on the concentration of phosphorus in drain water.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

(F_0، F_5، F_{10} و F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively).



شکل ٤_ مقایسه میانگین تاثیر نسبت‌های مختلف کود مایع کامل در عمق‌های مختلف بر غلظت فسفر خاک

Fig. 4. Mean comparison of the average effect of different ratios of complete liquid fertilizer at different depths on soil phosphorus concentration.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

(F_0، F_5، F_{10} و F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively).

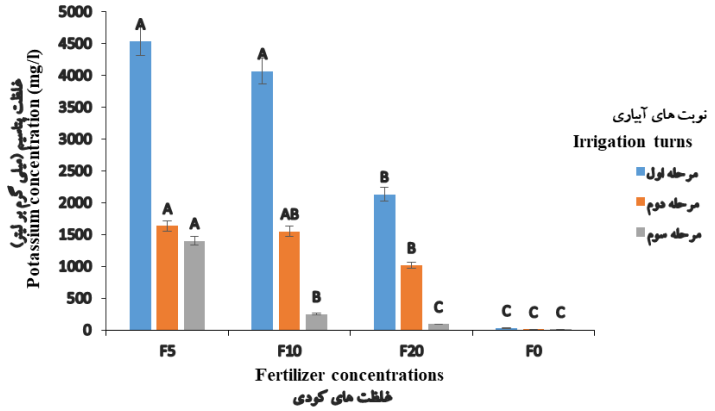
پتاسیم خاک

غلظت پتاسیم در زه‌آب مرحله اول با افزایش غلظت کود به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و بیش‌ترین مقدار در تیمار A_1 مشاهده شد. در شکل ۵ نیز تیمار ۱:۵ بالاترین غلظت پتاسیم را در مرحله اول زه‌آب نشان داد؛ این مقدار نسبت به شاهد بیش از دو برابر بود. تیمار ۱:۱۰ افزایش متوسط داشت و تیمار ۱:۲۰ کم‌ترین افزایش را نشان داد، و تمامی تیمارهای کوددار تفاوت معنی‌داری با شاهد داشتند. این غلظت بالای پتاسیم در تیمارهای غلیظ‌تر در مرحله اول نشان‌دهنده تحرک سریع اولیه پتاسیم است که با حلالیت بالای کود مایع مرتبط است.

در مراحل دوم و سوم نیز همچنان مقداری پتاسیم آبشویی شد اما به‌مراتب کمتر از مرحله اول بود (شکل ۵). این کاهش نشان‌دهنده آبشویی تدریجی پتاسیم است و غلظت در تیمارهای ۱:۵ و ۱:۱۰ همچنان بالاتر از شاهد باقی ماند، هرچند تفاوت‌ها نسبت به مرحله اول کمتر معنی‌دار شد. علاوه بر این، باقی‌ماندن بخشی از پتاسیم در خاک پس از مرحله اول نشان‌دهنده ظرفیت نگهداری متوسط خاک مورد مطالعه است که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، مانع از خروج کامل پتاسیم در فرآیند آبشویی می‌شود. همچنین در لایه‌های خاک، پتاسیم توزیع نسبتاً یکنواخت‌تری نسبت به نیترات و فسفر نشان داد. بیش‌ترین افزایش پتاسیم قابل جذب در لایه ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر و در تیمارهای A_1 و A_2 بود و در لایه‌های ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز افزایش معنی داری نسبت به شاهد دیده شد (شکل۶). این افزایش مربوط به ماهیت محلول بودن کود و تحرک متوسط پتاسیم در خاک‌های لومی–آهکی نسبت داد که امکان نفوذ تدریجی آن به عمق را فراهم می‌کند.

در شکل ۶، تیمارهای ۱:۵ و ۱:۱۰ بیش‌ترین غلظت پتاسیم را در تمامی لایه‌ها داشتند و توزیع تقریباً یکنواخت در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر ایجاد کردند، به‌طوری‌که لایه ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر گاهی بیش‌ترین مقدار را داشت و تفاوت آن با شاهد در همه عمق‌ها معنی‌دار بود. این الگوی توزیع نشان‌دهنده تحرک متوسط پتاسیم در مقایسه با نیترات (تحرک بالا) و فسفر (تحرک پایین) است و امکان تأمین تدریجی پتاسیم برای ریشه‌های عمیق‌تر را فراهم می‌کند. علاوه بر این، افزایش پتاسیم در لایه‌های پایین‌تر نسبت به شاهد بیانگر نفوذ بهتر پتاسیم از کود مایع در خاک آهکی است که می‌تواند کارایی مصرف کود را بهبود بخشد. این رفتار به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی متوسط و نگهداری پتاسیم توسط کانی‌های رسی ۲:۱ است. در این میان، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نقش تعیین کننده‌ای در تعادل بین پتاسیم تبادلی و پتاسیم در فاز محلول دارد؛ به طوری که با وجود توان نگهداری نسبتاً بالا، بخشی از پتاسیم همچنان می‌تواند به‌صورت تدریجی به لایه‌های زیرین منتقل شود. یافته‌ها با نتایج اوبورن و همکاران (۲۰۰۵)[1] و ژائو و همکاران (۲۰۲۴)[2] همخوانی دارد؛ بطوریکه کودهای مایع پتاسیم در خاک‌های آهکی تحرک بیشتری نسبت به کود جامد ایجاد می‌کنند، اما آبشویی بسیار کمی دارند. این نتایج با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک مورد مطالعه (حدود ۲۵ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک) همخوانی دارد که پتاسیم را به‌صورت قابل تبادل حفظ کرده و از آبشویی بیش از حد جلوگیری می‌کند.

1- Oboren *et al*
2- Zhao *et al*



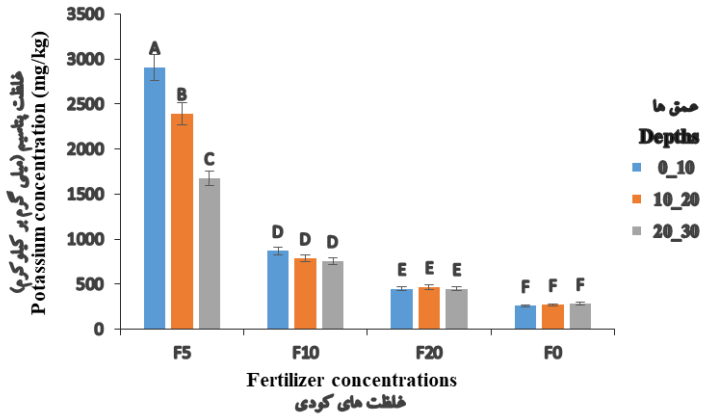
شکل ۵_ مقایسه میانگین رقت‌های مختلف کود مایع کامل در مراحل آبیاری بر غلظت پتاسیم زه‌آب

Fig. 5. Mean comparison of the average of different dilutions of complete liquid fertilizer in irrigation stages on the concentration of potassium in the drain water.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

(F_0،F_5، F_{10}، F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و آب و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively).



شکل ٦_ مقایسه میانگین تاثیر نسبت‌های مختلف کود مایع کامل در عمق‌های مختلف بر غلظت پتاسیم محلول خاک

Fig. 6. Mean comparison of the average effect of different ratios of complete liquid fertilizer at different depths on the concentration of soil soluble potassium.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

(F_0،F_5، F_{10}، F_{20} به‌ترتیب به معنی آب خالص و آب و کود مایع با رقت ۱:۵، ۱:۱۰ و ۱:۲۰ می‌باشد).

Columns having at least one common letter indicate no significant difference at the 5% probability level according to the LSD test ($P < 0.05$). (F_0, F_5, F_{10}, & F_{20} represent distilled water & liquid fertilizer diluted at ratios of 1:5, 1:10, & 1:20, respectively)

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد کود مایع کامل NPK در الگوی شبیه‌سازی شده‌ی سیستم آبیاری قطره‌ای در خاک آهکی لومی، منجر به جابجایی عمودی متفاوت عناصر (نیترات، فسفر و پتاسیم) شد. نیترات به‌علت حلالیت بالا و تحرک زیاد، به اعماق بیشتری منتقل گردید (دارای جابجایی عمقی بالا بود)، در حالی‌که فسفر عمدتاً در لایه سطحی تثبیت گردید. پتاسیم نیز تحرک متوسطی از خود نشان داد که ناشی از تعادل بین جذب سطحی و حضور در محلول خاک بود؛ و این امر، توزیع نسبتاً یکنواخت آن در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر را برای تغذیه تدریجی گیاه مناسب ساخت. با توجه به تفاوت در الگوهای جابجایی عمودی این عناصر و ضرورت مدیریت مصرف کود، نسبت رقیق‌سازی ۱:۱۰ به‌عنوان بهینه‌ترین حالت شناسایی گردید. این نسبت، ضمن بهبود کارایی مصرف کود، به کاهش پتانسیل مخاطرات زیست‌محیطی مانند آلودگی نیتراتی آب‌های زیرزمینی کمک شایانی می‌کند و با محدود کردن جابجایی عمقی نیترات به خارج از عمق مؤثر ریشه، از هدررفت آن جلوگیری می‌کند. این امر، به عنوان راهکاری عملی برای کشاورزان مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود. بنابراین، کاربرد کود مایع NPK با نسبت رقیق‌سازی ۱:۱۰ در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به منظور بهبود کارایی مصرف و کاهش اثرات زیست‌محیطی توصیه می‌گردد. پیشنهاد می‌شود این یافته‌ها در تحقیقات آتی در شرایط مزرعه و با در نظر گرفتن گیاه زراعی نیز ارزیابی‌شوند.

سپاس گزاری

بدینوسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و همچنین اساتید محترم و کارشناسان گروه علوم و مهندسی خاک به جهت یاری و همکاری و تأمین تجهیزهای لازم برای انجام این طرح پژوهشی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

1. Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M. H., and Lal, R. (2025). Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. Journal of Plant Nutrition, 48(13), 2179-2200. DOI: 10.1080/01904167.2025.2477269.
2. Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., and Abbasi, F. (2020). An analysis of optimal fertigation implications in different soils on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching. Scientific Reports, 10(1), 7797. DOI: 10.1038/s41598-020-64856-x.
3. Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O., Nagarajan, L., and Roy, A. H. (2020). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. Biology and Fertility of Soils, 56(5), 603-621. DOI: 10.1007/s11104-020-04467-2.
4. Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal, 54(5), 464-465. DOI: 10.2134/agronj1962.00021962005400050028x
5. Bremner, J. M., and Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—Total. In A. L. Page *et al*. (Eds.), Methods of soil analysis*: Part 2* (2nd ed., pp. 595-624). Madison, WI: American Society of Agronomy.
6. Cameron, K. C., Di, H. J., and Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. Annals of Applied Biology, 162(2), 145-173. DOI: 10.1111/aab.12014
7. Helmke, P. A., and Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In D. L. Sparks *et al*. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 3 (pp. 551-574). Madison, WI: Soil Science Society of American.
8. Hesterberg, D. (2010). Phosphorus sorption in soils. Soil Science Society of American Journal, 74(4), 1123-1132. DOI: 10.2136/sssaj2009.0354.
9. Hochmuth, G. J., and Smajstrla, A. G. (2003). Fertilizer management for drip irrigation (Publication No. CIR1136). University of Florida Extension. https://edis.ifas.ufl.edu/publication/CIR1136.
10. Jing, J., Zhang, F., Rengel, Z., and Shen, J. (2017). Long-term nitrogen fertilization increases nitrate leaching in red soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 107(1), 33-45. DOI: 10.1007/s10705-016-9809-z.
11. Ju, X. T., Xing, G. X., Chen, X. P., *et al*. (2009). Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(9), 3041-3046.
12. Kvakić, M., Pellerin, S., and Ciais, P. (2018). Phosphorus availability in soils: A global perspective. Plant and Soil, 427(1), 1-16. DOI: 10.1007/s11104-018-3612-2.
13. Li, J., Zhang, M., and Kong, D. (2018). Optimizing nitrogen fertilizer application in drip-irrigated systems. Journal of Plant Nutrition, 41(6), 789-799. DOI: 10.1080/01904167.2018.1425437.
14. Liu, J., Hu, H., and Zhang, F. (2019). Liquid phosphorus fertilizers in calcareous soils. Journal of Soils and Sediments, 19(7), 2945-2956. DOI: 10.1080/01904167.2019.1457067.
15. Marschner, P. (2021). Marschner's mineral nutrition of plants (4th ed.). Academic Press.
16. Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. In A. L. Page *et al*. (Eds.), Methods of soil analysis: *Part 2* (pp. 181-197). American Society of Agronomy. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400040022x.
17. Olsen, S. R., and Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page *et al*. (Eds.), Methods of soil analysis*: Part 2* (2nd ed., pp. 403-430). Madison, WI: American Society of Agronomy. DOI: 10.2134/agronj1990.00021962008200020024x.
18. Öborn, I., Edwards, A. C., and Witter, E. (2005). Potassium dynamics in calcareous soils. European Journal of Soil Science, 56(5), 649-659. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00702.x.
19. Rhoades, J. D. (1982). Cation exchange capacity. In A. L. Page *et al*. (Eds.), Methods of soil analysis: *Part 2* (2nd ed., pp. 149-157). Madison, WI: American Society of Agronomy.
20. Schoumans, O. F., and Chardon, W. J. (2015). Phosphorus management in agriculture. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 101(1), 1-17. DOI: 10.1007/s10705-014-9642-1.

21. Sparks, D. L. (1987). Potassium dynamics in soils. Advances in Soil Science, 6, 1-63. DOI: 10.1007/978-1-4612-4682-4_1.

22. 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. DOI: 10.1097/00010694-193401000-00003.

23. Wang, H., Xu, J., and Liu, Q. (2024). Nitrate leaching under liquid fertilizer application in calcareous soils. Soil Use and Management, 40(1), e12945. DOI: 10.1111/sum.12945.

24. Zhao, Y., Wang, H., and Li, X. (2025). Liquid fertilizers and nitrogen dynamics in drip irrigation systems. Agricultural Systems, 224, 103876. DOI: 10.1016/j.agsy.2024.103876.