



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation

Meisam Rezaei^{a*}, Mostafa Marzi^a, Kambiz Bazargan^a, Karim Shahbazi^a, and Meysam Cheraghi^a

^a Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

August 24, 2025

Revised

October 05, 2025

Accepted

October 26, 2025

Published online

December 20, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives: Agricultural systems in arid and semi-arid regions face significant challenges, including water scarcity, climate change, and inefficient resource management. Drip fertigation, which delivers water and fertilizers directly to the root zone, enhances resource use efficiency by synchronizing nutrient supply with crop demand. Understanding the dynamics of essential nutrients like phosphorus (P) and potassium (K) under this system is vital, as their behavior differs significantly. Phosphorus is relatively immobile in soil due to strong adsorption and precipitation reactions, particularly in calcareous soils. In contrast, potassium exhibits greater mobility, moving via both diffusion and mass flow. The distribution of these nutrients is influenced by the soil's wetting pattern, soil properties, irrigation regime, and crop root architecture. This field study investigates the spatiotemporal dynamics of P and K for two crops with contrasting root systems—maize and potato—under drip fertigation. This study aimed to: 1) Evaluate the horizontal and vertical distribution of soluble and available forms of P and K in the soil profile around maize and potato roots; 2) Compare the nutrient depletion profiles in the rhizosphere of both crops; and 3) Investigate the transformation of applied P and K into less mobile forms over time.

Keywords

Drip irrigation,
Fertigation,
Model,
Simulation,
Soil moisture,
Solute transport and
movement.

Materials and Methods: The research was carried out at the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran. The soil texture was clay loam with a calcareous nature (0.6% organic carbon and 9.4% calcium carbonate equivalent). Potato (*Agria* cultivar) was cultivated in a ridge-and-furrow system, while maize (Single Cross 704 hybrid) was planted in a strip pattern. The field was equipped with a surface drip irrigation system. Irrigation was applied twice weekly for 4 hours per session, delivering 4 liters per meter of drip tape. The fertilizer requirement (e.g., NPK), determined based on soil test results, was applied in two split applications. Fertigation commenced one hour after the start of irrigation and continued for three hours. Soil moisture was monitored twice daily using TDR sensors installed at various depths (10–50 cm). Following the first and second fertigation events, intensive soil sampling was performed at specific time intervals (4, 24, 98, 624, and 1632 hours after each). Samples were taken at horizontal distances of 0, 5, 10, and 15 cm from the emitter and at vertical depth intervals of 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 25–30, and 30–40 cm using an auger, with two replicates per treatment (including a non-cropped control plot). The collected soil samples were analyzed for soluble P, available P (Olsen method), soluble K, exchangeable K, and non-exchangeable K.

*Corresponding author's email

Meisam.rezaei1@gmail.com

Results: The results revealed distinctly different distribution patterns for potassium and phosphorus. The maximum accumulation for both elements was confined to a zone within 0–15 cm vertically and 0–35 cm horizontally from the drip emitter, closely following the advance of the soil wetting front. Phosphorus movement was limited. Maximum vertical and horizontal movement reached only 13 cm and 20 cm, respectively. Soluble P concentrations increased sharply shortly after

fertigation and returned to baseline within five days. Available P showed greater horizontal dispersion than soluble P. Crop-specific differences were evident; maize restricted vertical P movement, while potato promoted lateral dispersion, reflecting their distinct root architectures and water uptake patterns. Potassium was significantly more mobile, moving up to 20 cm vertically and over 35 cm horizontally. The distributions of soluble and exchangeable K were highly correlated and dependent on moisture flow. Rapid K movement occurred initially when soil moisture was high. Importantly, K concentrations in the root zone of cropped plots were substantially lower than in the non-cropped control, demonstrating significant plant uptake.

Conclusion: This study demonstrates that the dynamics and distribution of phosphorus and potassium under drip fertigation are strongly influenced by soil properties, soil moisture, and the specific crop and its root system. The practice of split fertigation with lower concentrations per application is highly recommended, particularly for crops with shallow root systems, as it synchronizes nutrient supply with root activity, thereby improving fertilizer use efficiency and mitigating environmental risks. The successful application of geostatistical interpolation to visualize these complex patterns underscores the potential of integrating simulation models like HYDRUS for optimizing fertigation management strategies, reducing the need for costly and time-intensive field trials. This research provides practical insights for enhancing nutrient management in drip-irrigated maize and potato systems in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Rezaei, M, Marzi, M., Bazargan, K., Shahbazi, K., and Cheraghi, M., 2025. Dynamics and Distribution of Different Forms of Phosphorus and Potassium in the Rhizosphere of Maize and Potato under Drip Fertigation. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 263-286.



DOI: [10.22092/IJSR.2025.370697.787](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370697.787)

Publisher: Soil Science Society of Iran



پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای

میثم رضائی^{۱*}، مصطفی مارزی^۱، کامبیز بازرگان^۱، کریم شهبازی^۱ و میثم چراغی^۱

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹ واژه‌های کلیدی آبیاری قطره‌ای، حرکت و انتقال املاح، رطوبت خاک، شبیه‌سازی، کودآبیاری، مدل‌سازی *ایمیل نویسنده مسئول Meisam.rezaei1@gmail.com	پویایی، انتقال و توزیع عناصر غذایی در اغلب خاک‌ها غیریکنواخت بوده و این غیریکنواختی در سیستم آبیاری قطره‌ای نمود بیشتری می‌یابد. مطالعه حاضر باهدف بررسی پویایی فسفر و پتاسیم در کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه اجرا گردید. سیب‌زمینی به‌صورت جوی و پشته و ذرت به‌صورت نواری کشت شد. برنامه آبیاری به‌صورت ۲ بار در هفته و هر بار ۴ ساعت معادل ۴ لیتر بر هر متر طول تیپ بود. مقدار کود موردنیاز بر اساس آزمون خاک در دو نوبت تقسیم شد و از طریق کودآبیاری (یک ساعت پس از شروع آبیاری، به مدت سه ساعت) اعمال شد. پس از کودآبیاری اول، نمونه‌برداری خاک در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت و کودآبیاری دوم در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت با فواصل افقی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و فواصل عمقی ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۱۵، ۱۵-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر (روش آگر) از قطره‌چکان با دو تکرار (در ۲ بوته گیاه) انجام شد. رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR در اعماق ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و در دو نوبت روزانه اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل با استفاده از روش‌های درون‌یابی و تحلیل مکانی-زمانی مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج حاکی از الگوی کاملاً متمایز توزیع عناصر پرتحرک پتاسیم و کم‌تحرک فسفر بود. به‌طوری‌که بیشترین تجمع این عناصر در محدوده ۱۵-۰ سانتی‌متر عمودی و ۳۵-۰ سانتی‌متر افقی از قطره‌چکان مشاهده شد. همچنین همبستگی معناداری بین الگوی پیشروی جبهه رطوبتی و توزیع عناصر غذایی مشاهده شد. نتایج نشان داد در گیاهان با سیستم ریشه‌زایی سطحی (مانند سیب‌زمینی)، کاربرد تقسیمی کود با دوز کمتر نسبت به کاربرد یکباره کود برتری دارد. بنابراین مدیریت تقسیم کود در سیستم آبیاری قطره‌ای با توجه به الگوی توزیع رطوبت و ویژگی‌های ریشه‌زایی محصول، می‌تواند به‌طور مؤثری کارایی و فراهمی مصرف کود را افزایش داده و از تلفات عناصر غذایی جلوگیری کند.

استناد: رضائی، م.، مارزی، م.، بازرگان، ک.، شهبازی، ک.، چراغی، م.، ۱۴۰۴. پویایی و توزیع شکل‌های مختلف فسفر و پتاسیم در خاک اطراف ریشه ذرت و سیب‌زمینی در اثر کودآبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳)، ۳۹، ص ۲۶۳-۲۸۶.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370697.787



مقدمه

در سال‌های اخیر سیستم‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به‌ویژه ایران با چالش‌های تغییرات اقلیمی، کمبود آب و شیوه نامناسب و ناکارآمد مصرف منابع مواجه است (Li et al., 2023)؛ علاوه بر آن، به دلیل آبیاری سنتی و مدیریت تغذیه نامناسب، امنیت غذایی و پایداری سیستم نیز به مخاطره می‌افتد (Li et al., 2023; Mohamadzade et al., 2022). این موارد به افزایش استفاده از منابع آب برای تولید بیشتر می‌انجامد. بنابراین، بهره‌برداری حداکثری از منابع محدود بارش، آب قابل دسترس، جبران عناصر غذایی خاک، افزایش کارایی مصرف آن‌ها و استفاده از فناوری‌های نوین، از ارکان اساسی در تحقق توسعه پایدار و متوازن عملکرد محصولات کشاورزی در این مناطق به شمار می‌رود (Phogat et al., 2023). آبیاری قطره‌ای توأم با کودآبیاری^۱ که امکان عرضه دقیق آب و مواد مغذی را مستقیماً به منطقه ریشه فراهم می‌کند (مقادیر مناسب، در زمان مناسب و در محل مناسب) به‌عنوان یک راهکار امیدبخش مطرح‌شده است (Kuldeep et al., 2024). ترکیب آبیاری قطره‌ای و کودآبیاری برای تحویل آب و مواد غذایی مستقیماً به ریشه و با هدف هم‌زمان کردن کاربرد کود و نیاز گیاه صورت می‌گیرد. این سیستم همچنین امکان نگهداشتن غلظت و توزیع یون‌ها و آب را در یک سطح دلخواه در خاک فراهم می‌نماید (Chtouki et al., 2024; Gärdenäs et al., 2005; Phogat et al., 2014; Zhang et al., 2015). از آنجا که نهاده‌ها پرهزینه و محدود هستند، این رویکرد تلفات را به حداقل می‌رساند، کارایی استفاده از منابع را بهبود می‌بخشد و دسترسی به مواد مغذی را با نیاز محصول هم‌زمان می‌سازد که از مزایای حیاتی در شرایط خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌روند (Gheysari et al., 2021; Guido et al., 2020; Phogat et al., 2023; Surendran and Madhava Chandran, 2022). برنامه کودآبیاری برای افزایش کیفیت و کمیت بسیاری از محصولات در حال گسترش است. در این سیستم‌ها حرکت و دسترسی عناصر غذایی پتاسیم و فسفر به رطوبت خاک، جریان آب در خاک و جبهه رطوبتی و توزیع مجدد آن وابسته است.

نیتروژن، پتاسیم و فسفر از عناصر ضروری برای رشد گیاه هستند و در بخش سطحی خاک فراوانند، اما این به معنای دسترس‌پذیری بیشتر برای گیاه نیست (Havlin, 2014; Selim et al., 2018). فاکتورهای زیادی بر دسترسی، تجمع و انتقال مواد غذایی مؤثرند، در عین حال دارای اثرات متقابل پیچیده‌ای نیز

هستند. بارندگی (زمان و شدت) یا آبیاری، نوع آبیاری، ویژگی‌های خاک، مدیریت شخم، سیستم کشت و کار، نوع و مقدار کود مصرفی، شرایط محیطی، زمان و پوشش گیاهی بر دینامیک مواد غذایی مؤثر است و ممکن است بر جذب پتاسیم و فسفر و حرکت آن‌ها در خاک تأثیرگذار باشند. همچنین، برای دستیابی به عملکرد بالای محصول و بهبود راندمان مصرف عناصر غذایی، کاربری مناسب و متعادل کودها ضروری است و منجر به بهبود کارایی مصرف کود و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی می‌گردد (Hafeez et al., 2019; Li et al., 2023). مطالعات تعادل عناصر غذایی نشان می‌دهد که نیاز به عرضه پتاسیم و فسفر برای رشد گیاه ضروری است (Sheldrick et al., 2002). به‌طور کلی متوسط پتاسیم افزوده‌شده به خاک از همه منابع (شامل بقایای گیاهی) کمتر از مقداری است که از طریق برداشت محصول از خاک خارج می‌شود (Manning et al., 2017). محدودیت آب آبیاری ممکن است تثبیت و تجمع این نمک‌ها را به دنبال داشته باشد. بنابراین برآورد کمی رفتار، حرکت و تجمع املاح در خاک برای ارزیابی کارایی مصرف کود اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر کاربرد منطقی منابع و جلوگیری از مدیریت نادرست، مستلزم درک عمیق فرآیندهای انتقال آب و املاح در پروفیل خاک‌های تحت آبیاری است (Corwin, 2021; Šimůnek et al., 2024).

عناصر پتاسیم و فسفر (کودهای فسفره و پتاسیمی) که در خاک بکار برده می‌شوند به علت فعل‌وانفعالات شدید با اجزاء خاک (مخصوصاً یون فسفات) معمولاً فواصل خیلی کوتاهی در خاک حرکت می‌کنند و سپس جذب سطوح ذرات فعال خاک مثل رس‌ها و مواد آلی می‌شوند (Rezaei and Movahedi Naeini, 2009a; Rezaei and Movahedi Naeini, 2009b). برهمکنش یون فسفات با کانی‌های کربناتی و گونه‌های کربناتی موجود در محلول خاک از دیگر علل مهم تحرک کم فسفر در پروفیل خاک است (Zhang et al., 2022). نتایج نشان داده است که غلظت فسفر در محل قطره‌چکان‌های سیستم قطره‌ای بیشتر بوده و تدریجاً بافاصله از آن کاهش می‌یابد (Chtouki et al., 2024). Hanson و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که در تمامی زمان‌های آبیاری صرف‌نظر از نوع آبیاری و کوددهی، پتاسیم و فسفر فقط در محدوده نزدیک خطوط آبیاری تجمع داشتند که به دلیل جذب بالای این دو عنصر بر اجزای خاک و جلوگیری از حرکت آن‌ها در طول پروفیل خاک است (Hanson et al., 2006). حرکت فسفر در خاک عمدتاً از طریق پخشیدگی انجام می‌شود و مقدار فسفر

^۱ Fertigation

(شکل‌های تبادلی و غیرتبادلی) با گذشت زمان در اثر کاربرد کود از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب (به مختصات جغرافیایی $28^{\circ}45'$ شمالی و $51^{\circ}36'$ شرقی)، کرج، ایران انجام شد. قبل از هرگونه عملیات شخم و کشت، نمونه‌برداری از خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر انجام و ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری گردید. EC و pH نمونه‌ها در عصاره ۱ شباع (Visconti and de Paz, 2012)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید (Page, 1965)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر در حضور دی‌کرومات پتاسیم (Walkley and Black, 1934) بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) اندازه‌گیری شد. پتاسیم قابل استفاده به روش استات آمونیم، فسفر قابل استفاده به روش اولسن و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش سه مرحله‌ای استات سدیم-استات آمونیم اندازه‌گیری گردید (Shahbazi et al., 2024). بر اساس نتایج تجزیه خاک، خاک دارای بافت لوم رسی، مقدار کربن آلی خاک ۰/۶ درصد و مقدار کربنات کلسیم معادل خاک ۹/۴ درصد بود که تایید کننده ماهیت آهکی بودن خاک است. غلظت پتاسیم و فسفر قابل دسترس خاک نیز به ترتیب ۳۱۰ و ۹/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. همچنین غلظت عناصر میکرو آهن (۲/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم)، روی (۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم)، مس (۱/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و منگنز (۷/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز تعیین شد تا در مرحله کشت بر اساس سطح آزمون خاک، توصیه کودی انجام گیرد.

سیستم کشت عملیات کاشت، برنامه آبیاری و سیستم کوددهی

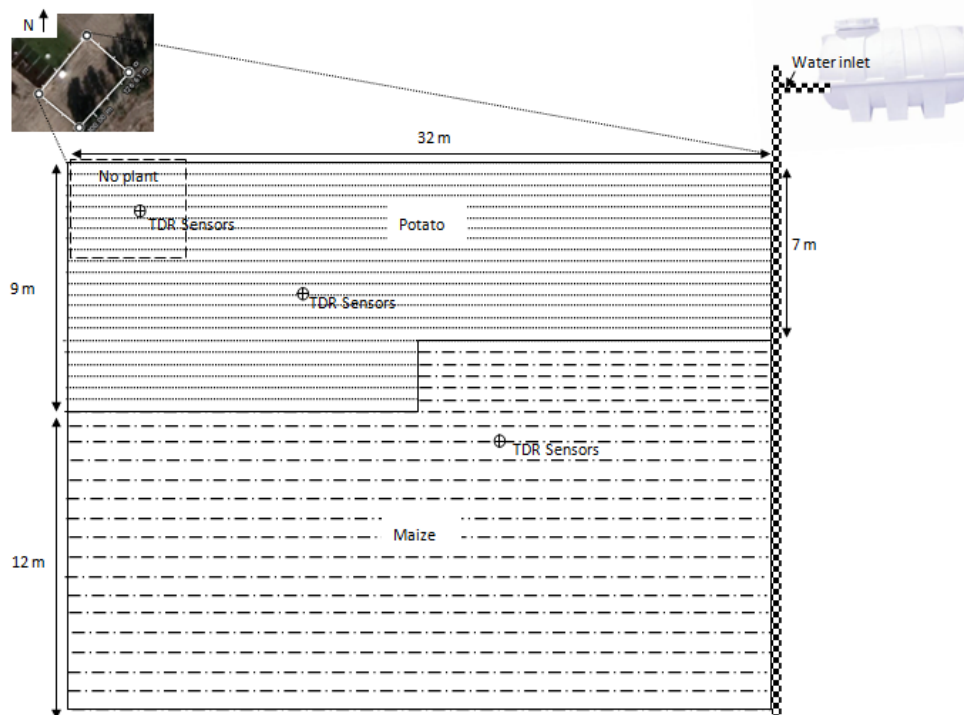
برای اجرای عملیات کشت، آماده‌سازی زمین به صورت خاکورزی سنتی انجام شد که با سیستم قطره‌ای در شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک و در یک فصل زراعی بهاره اجرا و مورد مطالعه قرار گرفت. شکل شماتیک تحقیق حاضر در شکل ۱ آمده است. قبل از اجرای عملیات کشت زمین با آبیاری غرقابی خیس گردید و در مرحله گاورو شدن عملیات خاکورزی سنتی مشابه روش معمول کشاورزان انجام شد تا بتوان بهترین نتیجه کاربردی را حصول نمود. کشت سیب‌زمینی (رقم میان رس آگریا) به صورت جوی و پشته به فاصله ردیف‌های ۷۰ سانتی‌متر و فاصله هر گیاه از گیاه دیگر ۶۰ سانتی‌متر در طول پشته بود. کشت ذرت هیبرید (SC704)،

انتقال یافته در خاک بستگی به تراکم خاک، مقدار رطوبت و کلوئیدهای فعال خاک که تعیین‌کننده ظرفیت جذب فسفر است، دارد (Barber, 1995). درحالی‌که پتاسیم در خاک از هم از طریق مکانیسم پخشیدگی و هم طریق مکانیسم جریان انبوه حرکت می‌کند. فرایند پخشیدگی در اثر شیب غلظت پتاسیم بین سطح ریشه و توده خاک اتفاق می‌افتد (Havlin, 2014). با جذب پتاسیم توسط گیاه غلظت آن در نزدیکی سطح ریشه کاهش یافته و در اثر آن شیب غلظتی به وجود می‌آید. پخشیدگی از چندین فاکتور نیز تأثیر می‌پذیرد که شامل دما و مقدار رطوبت است. Phogat و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که تجمع املاح در اثر کودآبیاری به مدت ۱۵۰ روز ادامه داشته و از آن به بعد به علت بارندگی بالا و آبیاری زیاد نمک‌ها شسته شده و از منطقه ریشه خارج می‌شود. نتایج الگوهای مختلف کودآبیاری (ابتدا، وسط یا انتهای مدت آبیاری) نشان داد که وقتی کاربرد کود در یک یا دو ساعت آخر هر آبیاری صورت می‌گیرد مقدار بیشتری از کود در مقایسه با کاربرد کود در ابتدای آبیاری، جذب گیاه می‌گردد (Phogat et al., 2014). Ajdary و همکاران (۲۰۰۷) در بررسی حرکت عناصر غذایی در مزرعه آزمایشی تحت کشت پیاز و کوددهی به روش کودآبیاری نشان دادند که تأثیر نوع خاک (بافت و رفتار هیدرولیکی) بیشتر از مقادیر آب خروجی از قطره‌چکان‌ها بود. همچنین، در همه استراتژی‌های آبیاری مورد استفاده، املاح به مقدار کافی در منطقه رشد ریشه باقی‌ماند (Ajdary et al., 2007).

باوجود مطالعات محدود در ایران در زمینه انتقال آب و برخی عناصر غذایی در اثر کاربرد با سیستم آبیاری قطره‌ای، تحقیق جامعی در زمینه حرکت و توزیع پتاسیم و فسفر در خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان در سیستم آبیاری قطره‌ای سیب‌زمینی و ذرت گزارش نشده است. گیاهان سیب‌زمینی و ذرت با الگوی متفاوت رشد ریشه و همچنین نیازهای متفاوت به عناصر غذایی و فسفر پتاسیم الگوهای تخلیه متفاوتی در ناحیه ریشه ایجاد می‌کنند. این تفاوت‌ها باعث تحرک متفاوت عنصر غذایی در پروفیل خاک مخصوصاً در محدوده ریشه می‌شود. در این راستا، آگاهی از دینامیک کاربرد این مواد غذایی به صورت کودآبیاری در طراحی سیستم‌ها و برنامه‌ریزی کودآبیاری و توصیه کودی بسیار مفید خواهد بود؛ بنابراین، تحقیق حاضر با اهداف (۱) ارزیابی توزیع عمقی و افقی شکل محلول عناصر پتاسیم و فسفر در پروفیل خاک در مجاورت ریشه‌های سیب‌زمینی و ذرت، (۲) مقایسه پروفیل تخلیه عنصر غذایی در مجاورت ریشه‌های سیب‌زمینی و ذرت و (۳) بررسی میزان تبدیل فسفر و پتاسیم به شکل‌های کمتر متحرک

لازم برای گیاه در دو تقسیط بر اساس توصیه کودی دستورالعمل تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه موسسه خاک و آب از کل مقدار توصیه‌ای ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل، ۲۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۴۵۰ کیلوگرم اوره به‌منظور دستیابی به بیشترین عملکرد به‌صورت کودآبیاری یک ساعت پس از آبیاری اعمال شد (Khavazi et al., 2014; Tehrani et al., 2015) (شکل ۲).

سینگل کراس (۷۰۴) به‌صورت نواری به فاصله ردیف‌های ۶۰ سانتی-متر و فاصله هر گیاه از گیاه دیگر به‌طور میانگین ۱۵ سانتی‌متر در طول ردیف بود. به دلیل وسعت کم کشت و نیاز به دقت بالا، کشت سیب‌زمینی و ذرت به‌صورت دستی انجام گردید. برنامه آبیاری به‌صورت دوبار در هفته و هر بار معادل ۴ ساعت به مقدار ۴ لیتر بر هر متر طول تیپ (لوله) آبیاری اجرا شد. مقدار کود



شکل ۱- موقعیت مکانی و نمای طرح شماتیک پروژه کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت آبیاری قطره‌ای

Figure 1. The geographical location and schematic view of the potato and maize cultivation project under drip irrigation.



شکل ۲- نحوه کودآبیاری یک ساعت پس از آبیاری (نوبت اول) برای ذرت، سیب‌زمینی و تیمار شاهد (محل بدون کشت)
Figure 2. Fertigation system one hour after the irrigation (first event) for maize, potatoes, and the control treatment (uncultivated area).

اندازه‌گیری و نمونه‌برداری

برای اندازه‌گیری رطوبت، در مکان مورد نظر در هر کشت (شکل ۱) جهت نمونه‌برداری و انجام آزمایشات، حسگر رطوبت‌سنج (تی دی آر^۲) نصب شد تا میزان رطوبت و حرکت آب در خاک رصد شود. در طول دوره رشد، رطوبت خاک در اعماق مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در فاصله افقی حدود ۸-۱۰ سانتی‌متری از نازل قطره چکان در دو نوبت در روز اندازه‌گیری شد. شاخص‌ها و پارامترهای گیاهی مانند عملکرد، اجزای عملکرد، عمق ریشه، ارتفاع گیاه و سطح برگ در طول رشد گیاه به‌صورت هفتگی اندازه‌گیری شده و همچنین میزان دقیق آبیاری ثبت گردید. اینگونه داده‌های مشاهده‌ای کمک شایانی به بررسی توزیع و پیش‌بینی حرکت املاح می‌کنند. برای بررسی میزان غلظت عناصر در زمان کشت و توصیه کودی، ابتدا توزیع غلظت عناصر مورد نظر در خاک از عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر با تهیه ۴ نمونه با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر قبل از کشت مشخص شد.

مقدار کود لازم برای گیاه در دو تقسیم بر اساس توصیه کودی دستورالعمل تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه موسسه خاک و آب و نتایج تجزیه خاک اعمال شد (شکل ۲). پس از دور اول

کودآبیاری نمونه‌برداری خاک در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت پس از کودآبیاری و در دور دوم در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت انجام شد. نمونه‌برداری خاک در فواصل افقی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و فواصل عمقی/عمودی ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۱۵، ۱۵-۲۰، ۲۰-۲۵ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر (روش آگر) از قطره‌چکان با دو تکرار (دو بوته گیاه) انجام شد. این نمونه‌برداری‌ها از نزدیک‌ترین گیاه به حسگر (برای نقطه بدون گیاه موارد ذکرشده اعمال گردید) برداشته شد تا پراکندگی/تغییرپذیری مکانی به حداقل برسد. در حقیقت فرض گردید که تغییرپذیری مکانی تا یک متر وجود ندارد. نحوه نمونه‌برداری در شکل ۴ قابل مشاهده است. نمونه‌های خاک فوراً به آزمایشگاه منتقل و در یخچال نگهداری شد تا در اسرع وقت غلظت فسفر و پتاسیم و همچنین رطوبت در نمونه‌های برداشت‌شده به روش وزنی اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری غلظت فسفر و پتاسیم محلول عصاره‌های ۱:۱۰ تهیه شد و در عصاره تهیه‌شده غلظت فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقادیر قابل استفاده خاک مرطوب توزین و با روش معمول عمل استخراج عصاره انجام و اندازه‌گیری در عصاره مربوطه انجام شد. از محتوای رطوبت اندازه‌گیری شده برای تبدیل وزن مرطوب

²Time-Domain Reflectometer, TDR

خاک به وزن خشک استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری پتاسیم غیرتبادلی از روش عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان استفاده شد (Shahbazi et al., 2024).



شکل ۳- مکان و نحوه نمونه‌برداری خاک در کشت ذرت و مناطق شاهد (بدون گیاه)
Figure 3. Soil sampling location in maize cultivation and control (uncultivated) areas.

ارزیابی حرکت و وضعیت فسفر و پتاسیم خاک استفاده از ابزارهای زمین آمار

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهداتی و کمی‌سازی توزیع مکانی-زمانی فسفر و پتاسیم در پروفیل خاک، از رویکردهای زمین‌آمار و مدل‌سازی استفاده شد. داده‌های غلظت عناصر (شامل فسفر محلول، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی) که در نقاط و زمان‌های مختلف نمونه‌برداری شده بودند، در محیط نرم‌افزار OriginLab وارد و برای تجسم اولیه و تحلیل‌های پایه (مانند رسم نمودارهای کانتوری و سطوح پاسخ) مورد استفاده قرار گرفتند. برای درون‌یابی داده‌ها و ایجاد سطوح پیوسته از توزیع غلظت در فضای دو بعدی (عمق و فاصله افقی از قطره‌چکان) از روش درون‌یابی کریجینگ^۳ استفاده شد. این روش به دلیل توانایی در نظریه ساختار مکانی داده‌ها و ارائه برآوردهای بهینه، انتخاب گردید. واریوگرام تجربی برای هر مجموعه داده محاسبه و بهترین مدل نظری (مانند مدل گوسی یا نمایی) بر اساس کمترین خطای برآورد به آن برازش داده شد. خروجی این فرآیند، نقشه‌های هم‌غلظت^۴ برای هر عنصر در زمان‌های مختلف پس از کودآبیاری بود که الگوی حرکت و تجمع عناصر را به وضوح نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

ویژگی خاک، آب و محلول کودی

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده برای آبیاری و غلظت املاح مراحل کودآبیاری را نشان می‌دهد. آب آبیاری بدون کود دارای pH ۸/۵ و هدایت الکتریکی ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. با افزودن املاح کودی pH کاهش و هدایت الکتریکی افزایش یافت که دور از انتظار نبود. غلظت فسفر، پتاسیم، آمونیوم و نیترات در دو محلول اندکی متفاوت بود هرچند مقدار مواد شیمیایی یکسانی استفاده شده بود. بیشترین تفاوت در مقدار بی‌کربنات و کربنات، منیزیم و پتاسیم دو محلول کودی بود.

^۴ Contour maps

^۳ Kriging

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده در آبیاری و غلظت املاح مراحل کودآبیاری

Table 1. Chemical composition of the water used for irrigation and the solute concentrations during the fertigation stages.

CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	EC	pH	
mg/L									%	dS/m		
0.2	103.7	7.2	35.5	13.75	0.8	46	6.44	3.92	0	0.34	8.5	آب آبیاری Irrigation Water
0	256	3	18	18	514	3	504.6	516	0.04	1	7.8	کودآبیاری مرحله اول First-Stage fertigation
0	628	9	25	19	423	5	479.3	500	0.03	1	7.8	کودآبیاری مرحله دوم Second-stage fertigation

افزایش یافت (جدول ۲). لایه ۳۵-۶۵ سانتی‌متری خاک دارای بافت سنگین‌تر و سیلت و رس بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی و زیرین بود. البته باید متذکر شد که تغییرات مقادیر شن با افزایش عمق ابتدا کاهشی و سپس افزایشی می‌شود. ظرفیت تبادل کاتیونی لایه‌ها تقریباً یکسان بود.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک در جدول ۲ خلاصه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش عمق مقادیر هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش یافت درحالی‌که غلظت یون‌های محلول و تبادلی دارای نوسان بوده و اغلب در لایه اول بیشتر از لایه دوم بود و از عمق ۱۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متری

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک

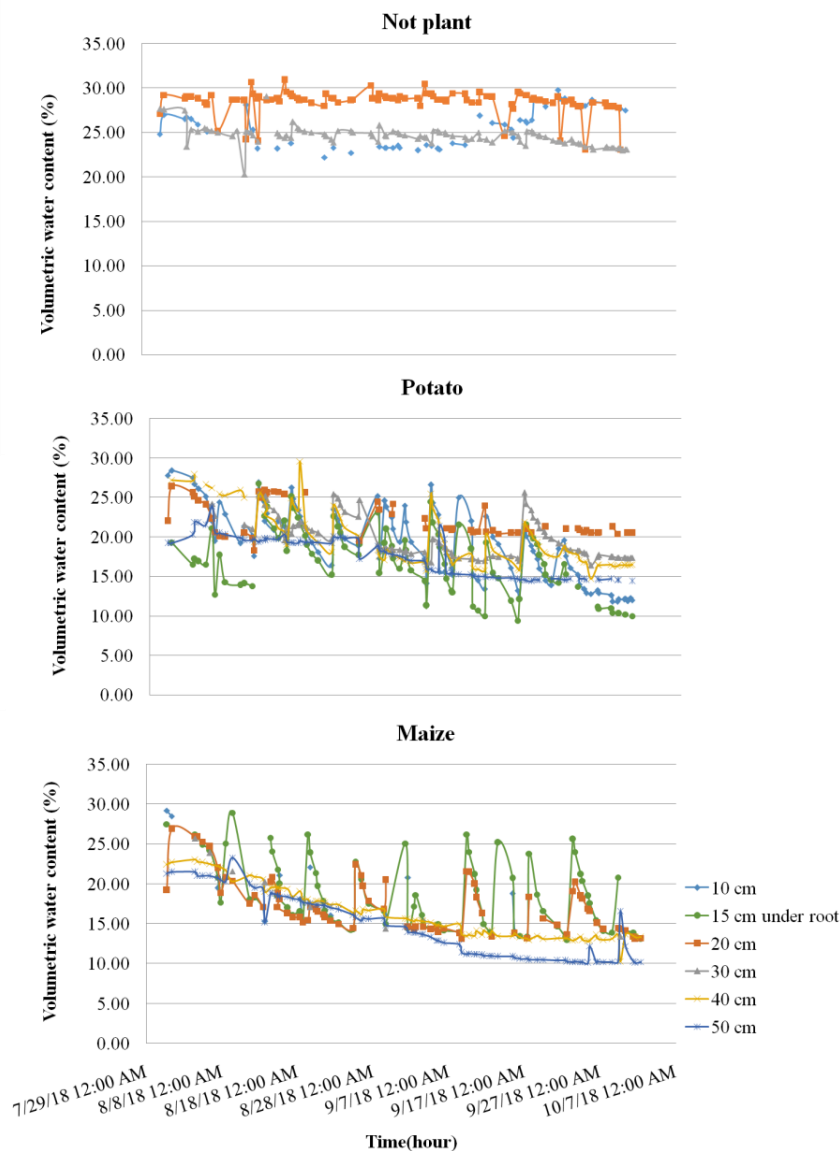
Table 2. Physical and chemical characteristics of the soil layers.

CEC	یون‌های محلول Dissolved ions					P _{ava}	K _{ava}	pH	EC	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	عمق Depth
(meq/100gr)	(mg/L)					mg/kg			(dS/m)		(%)		(cm)
	P	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺								
29.48	0.7	23.5	16	135	51.6	10.2	270	7.9	1.51	28	30	42	0-15
29.75	1.1	18	19	88	25.2	9.6	270	7.9	1.55	24	32	44	15-35
30.81	0.8	24	22	96	46.7	8.4	252	7.9	2.66	30	40	30	35-65
29.75	2.4	23	15	98	58.4	5	191	7.8	2.58	12	38	50	65-100

بیشتر بودن نسبت به کشت سیب‌زمینی و ذرت در این منطقه شده است. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که میزان رطوبت خاک در کشت سیب‌زمینی غالباً ۵-۱۰ درصد بیشتر از ذرت بود که دلیل آن را می‌توان به تراکم گیاه و نیاز آبی بیشتر ذرت (تغرق بیشتر) مرتبط دانست (Allen et al., 1998). نکته قابل‌توجه آن است که از نیمه فصل رشد تا پایان به دلیل رشد ریشه و جذب آب مقادیر آب اضافه‌شده از طریق آبیاری به عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری نفوذ نکرده و یا اینکه با توجه به معماری ریشه و توزیع آن به‌ویژه در ذرت، رطوبت این اعماق نیز جذب‌شده است. علت را نیز می‌توان به توزیع مجدد و جریان رو به بالای آب مرتبط دانست (Rezaei, 2016). همچنین، تغییرات زمانی-دمایی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شرایط مزرعه، علاوه بر میزان آب می‌تواند عاملی در کاهش رطوبت لایه‌های زیرین باشد (Rezaei, 2016; Rezaei et al., 2016).

تغییرات روزانه رطوبت خاک

نتایج داده‌های رطوبت روزانه خاک در طول فصل کشت در شکل ۵ آمده است. نتایج نشان داد که حسگرها بیشترین رطوبت را در عمق ۱۵-۲۰ سانتی‌متری برای هر سه محل نصب ثبت کرده‌اند. در برخی عمق‌ها (به‌طور مثال ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متری در کشت ذرت) حسگرها به‌خوبی داده‌ای را ثبت نکردند (عدم عملکرد سنجش). نو سانات مقدار آب خاک با حضور گیاه شدیدتر از بدون کشت بود که این نشان‌دهنده تقاضای گیاه برای جذب، تعرق و به‌طور کل جریان حرکت آب است. در قسمت بدون گیاه، مقدار رطوبت در عمق‌های ۱۰-۳۰ سانتی‌متری خاک بین ۲ تا ۳۲ درصد حجمی در طول فصل متغیر بود و بیشترین مقادیر برای عمق ۲۰ سانتی‌متری ثبت شد. به نظر می‌رسد عدم پوشش گیاهی، خشک شدن یکنواخت سطح خاک، کم بودن تقاضا برای تبخیر و تعرق و نیز به مقادیر آبیاری، سبب یکنواخت بودن رطوبت عمق خاک و



شکل ۵- رطوبت حجمی خاک در عمق‌های مختلف برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. حسگرهای تی دی آر در عمق ۱۵ سانتی‌متری با فاصله افقی ۵ سانتی‌متری از بقیه حس‌گرها جایگذاری شد.

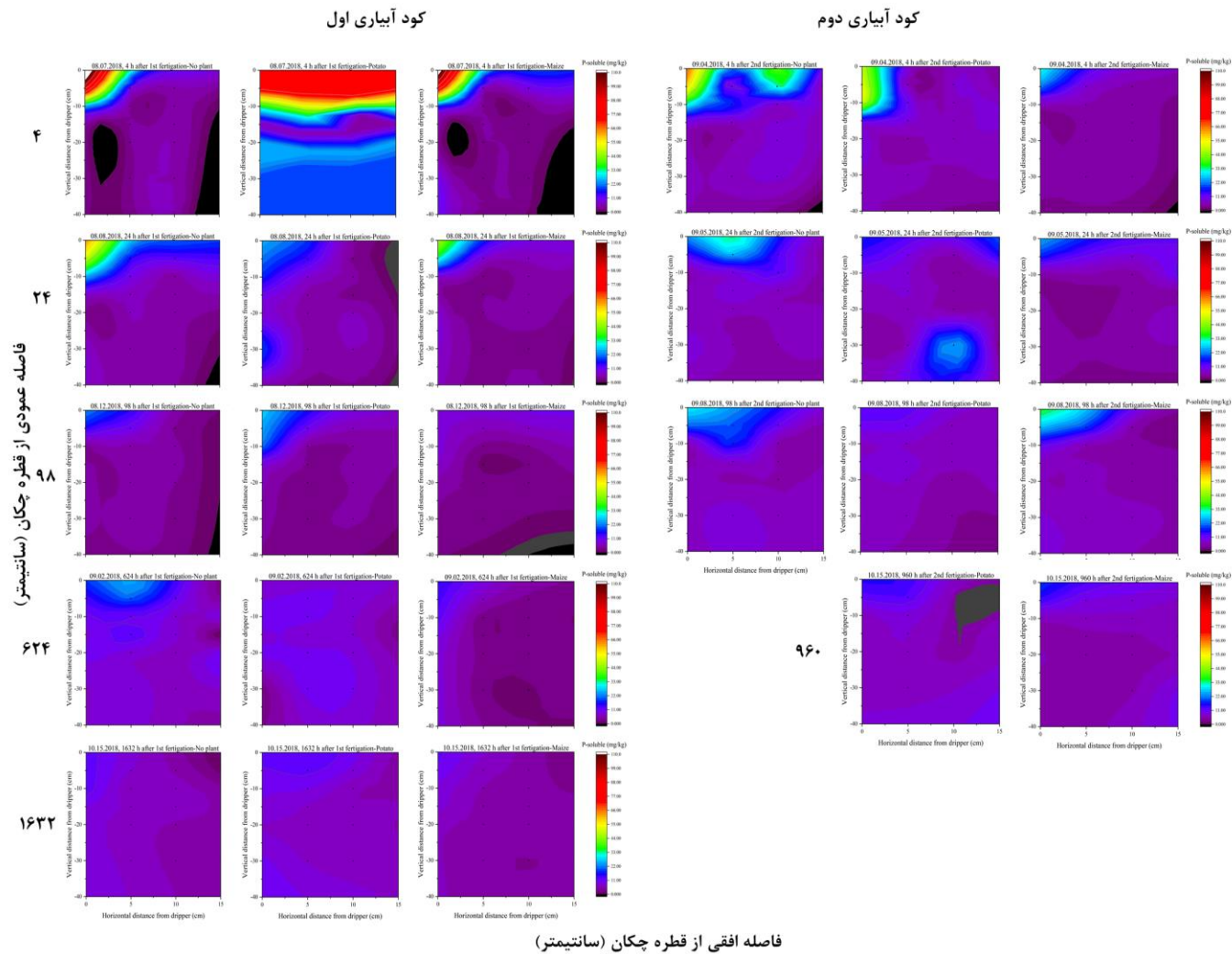
Figure 5. Volumetric soil water content at different depths for the uncultivated area, potato, and maize. The TDR sensors were placed at a depth of 15 cm with a horizontal distance of 5 cm from the other sensors.

فسفر محلول و قابل‌دسترس در ناحیه بدون گیاه، کشت سیب‌زمینی و ذرت

در شکل ۶ روند تغییرات زمانی و مکانی فسفر محلول در فاصله افقی و عمودی از قطره‌چکان بعد از کودآبیاری برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت نمایش داده شده است. به‌طور کلی با شروع کودآبیاری و پس از گذشت ۴ ساعت غلظت فسفر محلول به‌صورت افقی (۵ سانتی‌متر) و عمودی (۱۰ سانتی‌متر) در خاک افزایش یافت که تابع حرکت و جریان آب در خاک بود. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است مقادیر حرکت افقی و عمودی در ۴ ساعت اولیه در ناحیه بدون کشت یا شاهد اندکی بیش از سیب‌زمینی و ذرت است. در ناحیه‌های بدون کشت و سیب‌زمینی باگذشت زمان و پس از ۲۴ ساعت غلظت فسفر محلول خاک در فواصل ۷-۸ سانتی‌متری افقی و ۱۳-۱۵ سانتی‌متری عمودی از قطره‌چکان بیشتر می‌شود (حدود ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)؛ اما در ناحیه کشت ذرت تغییرات عمودی (حرکت عمودی) کاهش یافت، در حالی که تغییرات افقی تقریباً مشابه سایر نواحی بود. این موضوع می‌تواند به تفاوت در سیستم ریشه‌ای و الگوی جذب آب توسط گیاه مربوط باشد. درنهایت، باگذشت ۹۸ ساعت از کوددهی اول و انجام آبیاری مجدد غلظت فسفر محلول به‌تدریج به حالت تعادل رسید.

تغییرات فسفر محلول خاک در کوددهی دوم متفاوت از کوددهی اول مشاهده شد. در کشت سیب‌زمینی در فاصله عمودی (حرکت عمودی) غلظت بیشتر (تا ۷ سانتی‌متر) و در ذرت حرکت افقی بیشتر (۱۵ سانتی‌متر) ثبت شد که ممکن است به دلیل ماهیت سیستم کشت جوی و پشته و توزیع ریشه‌ها و همچنین تغییرات مکانی باشد. تغییرات افقی بیشتر (تا ۱۵ سانتی‌متری از قطره‌چکان) در ناحیه بدون کشت نسبت به مناطق کشت‌شده مشاهده شد که می‌تواند به دلیل حرکت افقی محلول کودی و آب در بدو ورود به سیستم و توزیع مجدد پس از آن باشد. به‌طور کلی پس از کوددهی دوم تغییرات افقی بیشتر (در فواصل بیشتر نسبت به قطره‌چکان) نسبت به دور اول مشاهده شد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد بعد از کوددهی غلظت فسفر (محلول و قابل‌دسترس) بالا رفته و پس از گذشت نهایتاً پنج روز به شرایط قبل از کوددهی بازمی‌گردد. می‌توان گفت در این دوره مقدار فراوان فسفر در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و گیاه به‌راحتی از آن بهره خواهد برد. هرچند در این دوره چند روزه تغییرات تدریجی به‌واسطه دورهای آبیاری نشان داده شد اما کاهش غلظت فسفر به‌واسطه احتمالاً تثبیت شدن در خاک اتفاق افتاده است.



شکل ۶- غلظت فسفر محلول در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸ و ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 6. Soluble phosphorus concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertilization) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertilization)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

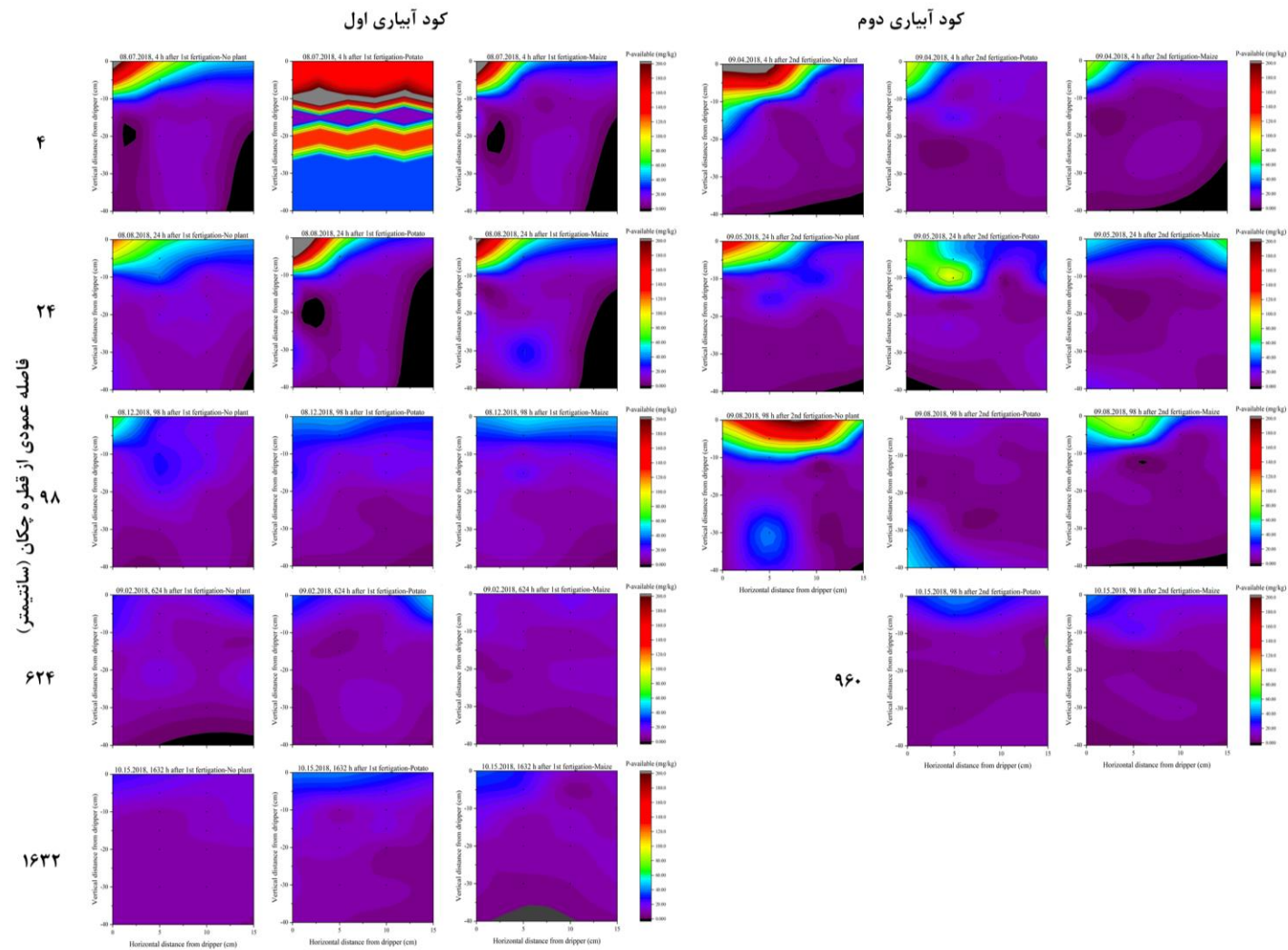
قطره‌چکان‌های سیستم قطره‌ای بیشتر بوده و تدریجاً بافاصله از آن کاهش می‌یابد (Hanson et al., 2006). از آنجایی که در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای بخش خاصی که تحت آبیاری قطره‌ای است خیس می‌شود بنابراین ریشه گیاه در منطقه محدودی (منطقه خیس) گسترش می‌یابد و در نتیجه تغییرات غلظت در آن نواحی شدیدتر است (Coelho and Or, 1999; Raji et al., 2016; Singh et al., 2006).

به‌طور کلی می‌توان گفت که حرکت عمودی فسفر حداکثر به ۱۳ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان (محل تزریق کود) و حرکت افقی حدود ۲۰ سانتی‌متر است (تغییر معنادار نسبت به شرایط اولیه غلظت). دلیل این تفاوت را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در سیستم آبیاری قطره‌ای تیپ حرکت جانبی آب بیش از حرکت عمودی آن است (به دلیل شیب افقی^۵) و بنابراین حرکت املاح از جبهه رطوبتی پیروی نماید.

بر اساس نتایج، میزان فسفر قابل‌استفاده در ساعات اولیه (۴ ساعت) و همچنین روز اول افزایش یافت (شکل ۷). باگذشت زمان و با افزایش عمق غلظت آن کاهش یافت (غلظت در نقطه ورودی، قسمت بالا سمت چپ هر گراف)، اما بافاصله از قطره‌چکان و به‌صورت افقی افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که ابتدا فسفر به‌صورت عمودی حرکت نموده و پس از یک روز حرکت افقی آن بیشتر شده است. این پدیده برای ذرت نسبت به سیب‌زمینی بسیار بیشتر و مشهودتر در مقایسه با منطقه بدون گیاه است. در زمان طولانی‌تر (بعد از ۱۶۰۰ ساعت) حرکت افقی-سطحی در سیب‌زمینی بیشتر بود. به‌طور کلی، غلظت فسفر قابل‌استفاده تغییرات افقی بیشتری (تغییرات افقی بیش از ۱۵ سانتی‌متری نسبت به محل قطره‌چکان یا منبع ورود کود) نسبت به فسفر محلول نشان داد. با توجه به اینکه فسفر محلول بخشی از فسفر قابل‌استفاده است، می‌توان استنباط نمود که فسفر پخش‌شده به‌صورت افقی نسبت به فسفری که به عمق حرکت کرده است، برای مدت طولانی‌تری قابلیت استفاده دارد. این امر ممکن است به دلیل وجود بیشتر مواد آلی در لایه‌های سطحی خاک باشد که از طریق برهمکنش با فسفر، از رسوب آن جلوگیری کرده و برای مدت طولانی‌تری قابلیت دسترسی آن را حفظ می‌نمایند.

در مرحله دوم کود دهی، قسمت بدون گیاه مقادیر بیشتری از فسفر قابل‌استفاده را نشان می‌دهد که باگذشت زمان جریان عمودی و افقی فسفر دیده می‌شود. به تعادل رسیدن خاک با مقادیر غلظت ورودی می‌تواند عامل این روند باشد. در مرحله دوم کوددهی، در ذرت و سیب‌زمینی میزان فسفر در زمان‌های اولیه بیشتر و سپس کاهش یافت. به غیر چند ساعت اول پس از آبیاری و کودآبیاری روند تغییرات فسفر در گیاه ذرت و سیب‌زمینی کاملاً متفاوت است. نتایج همچنین نشان داد که پس از ۹۸ ساعت تغییرات میزان فسفر چه به‌صورت افقی و چه عمودی در گیاه سیب‌زمینی و ذرت مشابه بود اما باگذشت زمان تغییرات فسفر این دو گیاه به‌طور معنی‌داری متفاوت شد (بالاخص برای زمان ۱۶۳۲ ساعت). این تفاوت‌ها در زمان کودآبیاری دوم بسیار بیشتر و قابل‌تامل‌تر است زیرا در قسمت بدون گیاه میزان غلظت فسفر بسیار زیاد شده و تغییرات آن با زمان کمتر می‌شود. در حقیقت غلظت فسفر با توجه به نیاز گیاهی و جذب گیاه در زمان‌های اولیه کودآبیاری دوم سبب تفاوت در میزان غلظت‌ها در دو گیاه است. هرچند به نظر می‌رسد مقدار فسفر قابل‌استفاده از حد کفایت (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر است. نتایج تحقیقی نشان داد که غلظت فسفر در محل

⁵ Horizontal water potential gradients



فاصله افقی از قطره چکان (سانتیمتر)

شکل ۷- غلظت فسفر قابل استفاده (اولسن) در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸ و ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 7. Available phosphorus concentration (Olsen) at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertigation) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertigation)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

پتاسیم محلول، تبادلی و غیر تبادلی در ناحیه بدون گیاه، کشت سیب‌زمینی و ذرت

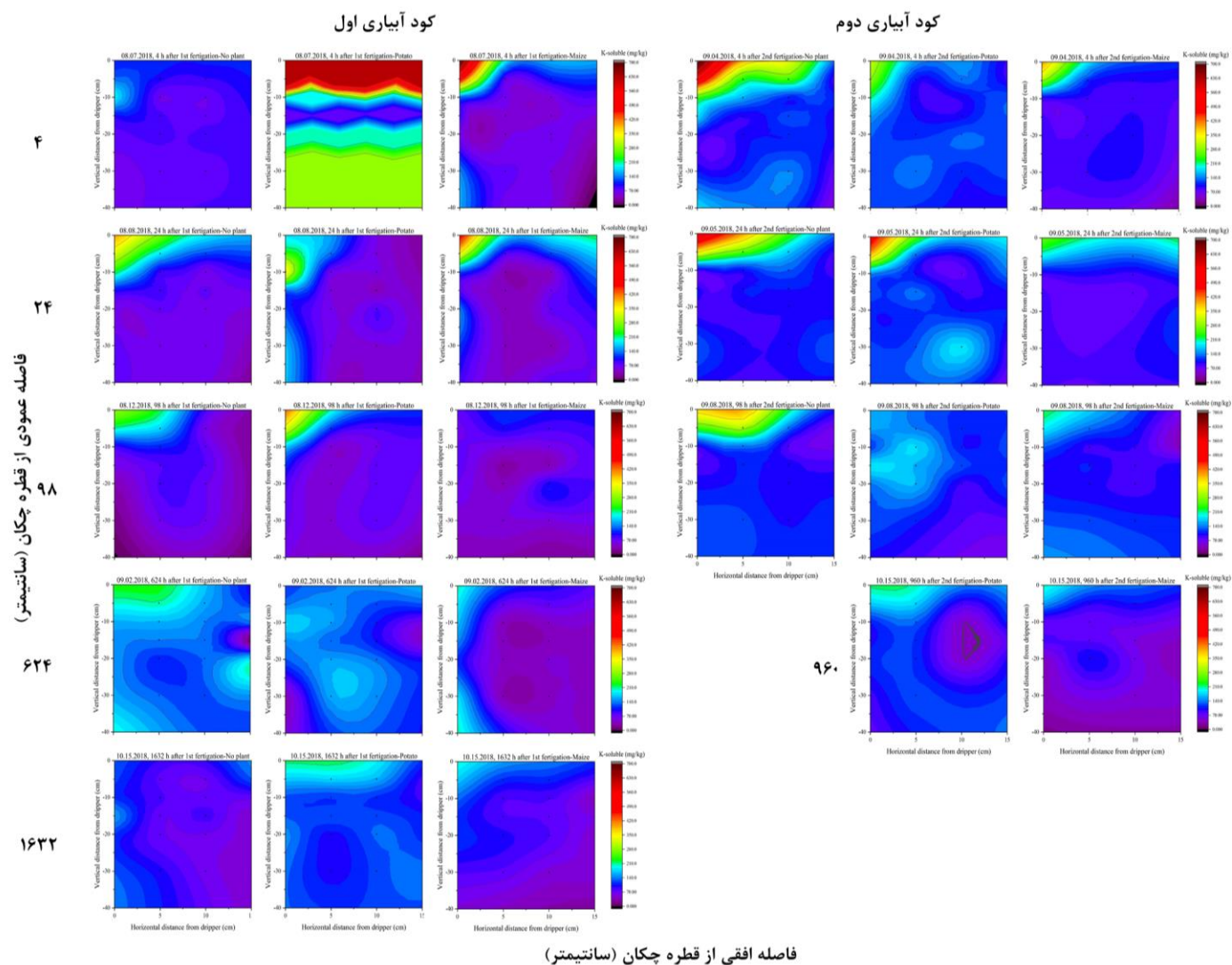
نتایج تغییرات زمانی و مکانی غلظت گونه‌های مختلف پتاسیم (محلول، تبادلی و غیر تبادلی) در زمان‌های مختلف برای خاک تحت کشت ذرت، سیب‌زمینی و فاقد کشت/شاهد در شکل-های ۸-۱۰ آمده است. به‌طور کلی با توجه به غلظت کودی اعمال‌شده، تغییرات غلظت پتاسیم در فواصل افقی و عمودی نیز متأثر از مقادیر آب و حرکت آن است. در زمان کوتاه بعد از کودآبیاری اول (۹۸ ساعت پس از کوددهی) میزان پتاسیم محلول و قابل استفاده به‌صورت افقی و عمودی از محل قطره‌چکان افزایش یافته و این مقدار برای خاک فاقد کشت و تحت کشت سیب‌زمینی نسبت به کشت ذرت مشهودتر است. برخلاف فسفر، پتاسیم محلول و تبادلی با گذر زمان تغییرات مکانی یکسانی را نشان دادند (شکل‌های ۸ و ۹). اگر چه عمده تغییرات پتاسیم محلول نهایتاً تا ۱۰ سانتی‌متری فاصله عمودی (عمقی) از قطره‌چکان (منبع کود) بود اما پتاسیم قابل استفاده تا ۲۰ سانتی‌متری عمقی تغییرات مشهودی نشان داد. همان‌طور که بیان شد توزیع پتاسیم متناسب با توزیع جبهه رطوبتی است و با کاهش حرکت جبهه رطوبتی توزیع پتاسیم نیز کاهش می‌یابد. مطالعه Nie و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که پتاسیم در ۱۰ سانتی‌متری افقی کودآبیاری شده و در ۳۶۰ دقیقه ابتدایی (۶ ساعت اول) توزیع می‌یابد و حرکت افقی/جانبی بیشتر از حرکت عمودی و کمتر از ۱۵ سانتی‌متری از محل کودآبیاری گزارش شد (Nie et al., 2021).

با ورود آب و افزایش رطوبت حرکت جبهه رطوبتی تسریع شده و زمان جذب پتاسیم توسط کلوئیدهای خاک کاهش می‌یابد؛ بنابراین در زمان‌های اولیه حرکت پتاسیم بیشتر و سریع‌تر است. می‌توان بیان نمود که با افزایش غلظت ورودی نمک و مقدار جریان آب، املاح می‌توانند حرکت یا توزیع عمودی و افقی بیشتری داشته باشند. از آنجا که کوددهی یک ساعت پس از شروع آبیاری رخ داده است، می‌توان گفت که مکش خاک (پتانسیل ماتریک) در جهت عمودی نسبت به جانبی با افزایش رطوبت کاهش یافته و سبب کاهش حرکت جبهه رطوبتی و حرکت املاح به‌صورت عمودی شده است. با مرطوب شدن اولیه خاک شاید سرعت حرکت آب و محلول کودی کمتر و زمان لازم برای جذب در سطوح کلوئیدهای خاک فراهم آمده است. علاوه بر آن مقدار آب ورودی (حجم کودآبیاری) نیز می‌تواند بر حرکت املاح پتاسیم و فسفر مؤثر بوده باشد (حجم کمتر در نتیجه حرکت کمتر در زمان‌های اولیه کودآبیاری). Nie و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه حرکت پتاسیم و شبیه‌سازی آن در

سیستم غرقابی جوی و پشته نشان دادند که پتاسیم نهایتاً در ۲۳-۲۶ سانتی‌متر عمودی و ۲۵-۲۷ سانتی‌متر افقی از سطح خاک در پشته توزیع می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش دادند که با افزایش غلظت تا چهار برابر، میزان افزایش حرکت افقی ۹٪ و حرکت عمودی ۴/۸٪ بود که تنها معادل ۱ سانتی‌متر بود. این نتیجه می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که غلظت تأثیر کمی بر حرکت نمک دارد. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های محققان دیگر نیز تطابق دارد (Hanson و Ebrahimian et al., 2012; Zhang et al., 2012). همکاران (۲۰۰۶) نتایج مشابهی برای سیستم قطره‌ای سطحی و زیرسطحی گزارش کردند و حرکت عمودی پتاسیم را حدود ۲۰ سانتی‌متر و حرکت افقی را ۳۵ سانتی‌متر از محل قطره‌چکان شبیه‌سازی نمودند. Grecco و همکاران (۲۰۱۹) حرکت بیشتر افقی/جانبی پتاسیم را نسبت به عمودی گزارش دادند و رفتار و حرکت پتاسیم را پایدار و ثابت دانستند با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، به نظر می‌رسد توزیع و حرکت افقی پتاسیم (محلول و تبادلی) در کشت ذرت بیشتر از سیب‌زمینی است. این موضوع برای پتاسیم تبادلی در کشت ذرت بیشتر صدق می‌کند. در خاک تحت کشت ذرت و سیب‌زمینی میزان تغییرات پتاسیم در مرحله دوم کودآبیاری بسیار بیشتر از خاک فاقد کشت است. توزیع/حرکت عمودی در منطقه کشت شده کمتر از خاک بدون گیاه است. احتمالاً جذب عناصر معدنی توسط گیاهان موجب بروز این تفاوت‌هاست. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که پتاسیم قابل استفاده در منطقه رشد ریشه هم برای سیب‌زمینی و هم برای ذرت تا مقادیر بیش از ۳۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پس از ۹۸ ساعت در کوددهی اول حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد در زمان ۱۶۳۲ ساعت پس از کوددهی اول و ۹۶۰ ساعت پس از کوددهی دوم، حرکت افقی و جانبی آب به‌ویژه بر روی پشته در کشت سیب‌زمینی سبب افزایش بیشتر غلظت پتاسیم در ۵ سانتی‌متری سطح خاک شد. پس از کوددهی دوم مقادیر محلول و تبادلی در خاک بدون گیاه بیشتر بود هرچند توسعه افقی بیشتری نسبت به عمودی را نشان داد. تفاوت حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم تبادلی در ناحیه بدون کشت و کشت‌شده نشان‌دهنده میزان جذب پتاسیم توسط گیاهان کشت‌شده است که این میزان جذب در سیب‌زمینی در اواخر دوره رشد احتمالاً بیشتر بوده است. این موضوع برای ذرت در زمان‌های کوددهی دوم بیشتر صدق می‌کند. لذا از آنجا که زمان بهینه کوددهی به تغییرات غلظت و نیاز گیاه وابسته است، پیش‌بینی حرکت و برآورد دقیق پتاسیم، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتباط با کارایی مصرف کود مهم دارد (Jalali and Rowell, 2009). بنابراین عرضه کافی پتاسیم و فسفر

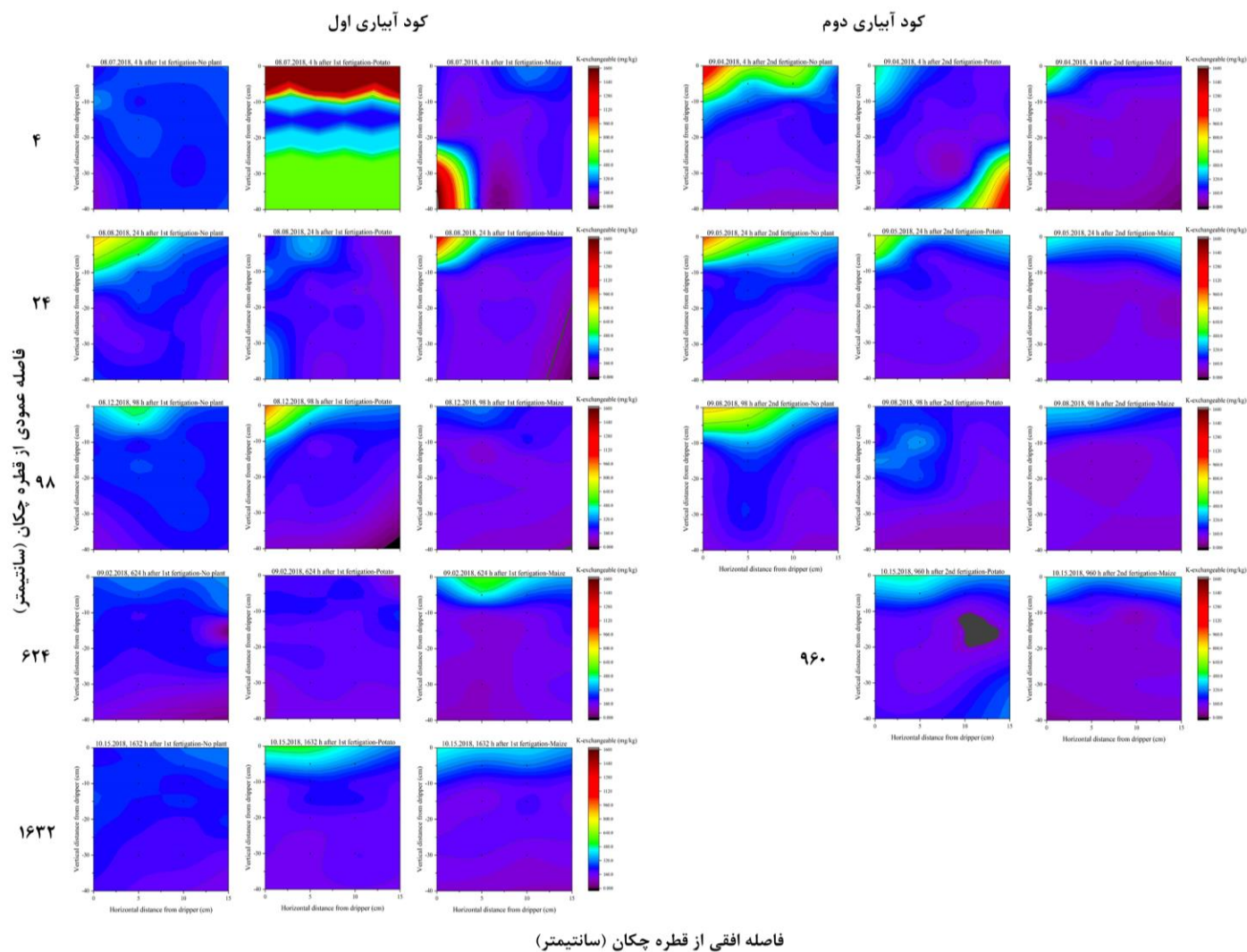
در زمان و مکان مناسب برای دستیابی به عملکرد و کیفیت بهینه محصول ضروری است.

در مورد پتاسیم غیرتبادلی تغییرات قابل ملاحظه‌ای مرتبط با کوددهی دور اول در زمان‌های ابتدایی (تا ۹۸ ساعت) مشاهده نشد؛ اما از زمان ۶۲۴ ساعت به بعد پتاسیم غیرتبادلی مقداری کاهش نشان داد که احتمالاً متناظر و متناسب با پتاسیم تبادلی و محلول و جذب گیاه است. به‌طور کلی بعد از کوددهی دوم مقادیر پتاسیم تبادلی نسبت به قبل از آن افزایش یافت. به‌طور کلی می‌توان فرآیند جذب و رهاسازی (تبادل میانی فاز محلول-تبادلی و غیر تبادلی) را در عمل و در طبیعت مشاهده نمود که احتمالاً قابل مقایسه با رفتار سنتیکی در شرایط آزمایشگاه و سیستم بسته باشد. باز هم باید یادآوری نمود که تغییرات مکانی می‌تواند تأثیر بسزایی در تحلیل اطلاعات و مصورسازی نتایج داشته باشد که تأثیر آن در ارائه نتایج این پژوهش نیز دور از انتظار نیست (زمان‌های پایانی کوددهی دور اول و دوم کشت ذرت، شکل ۱۰).



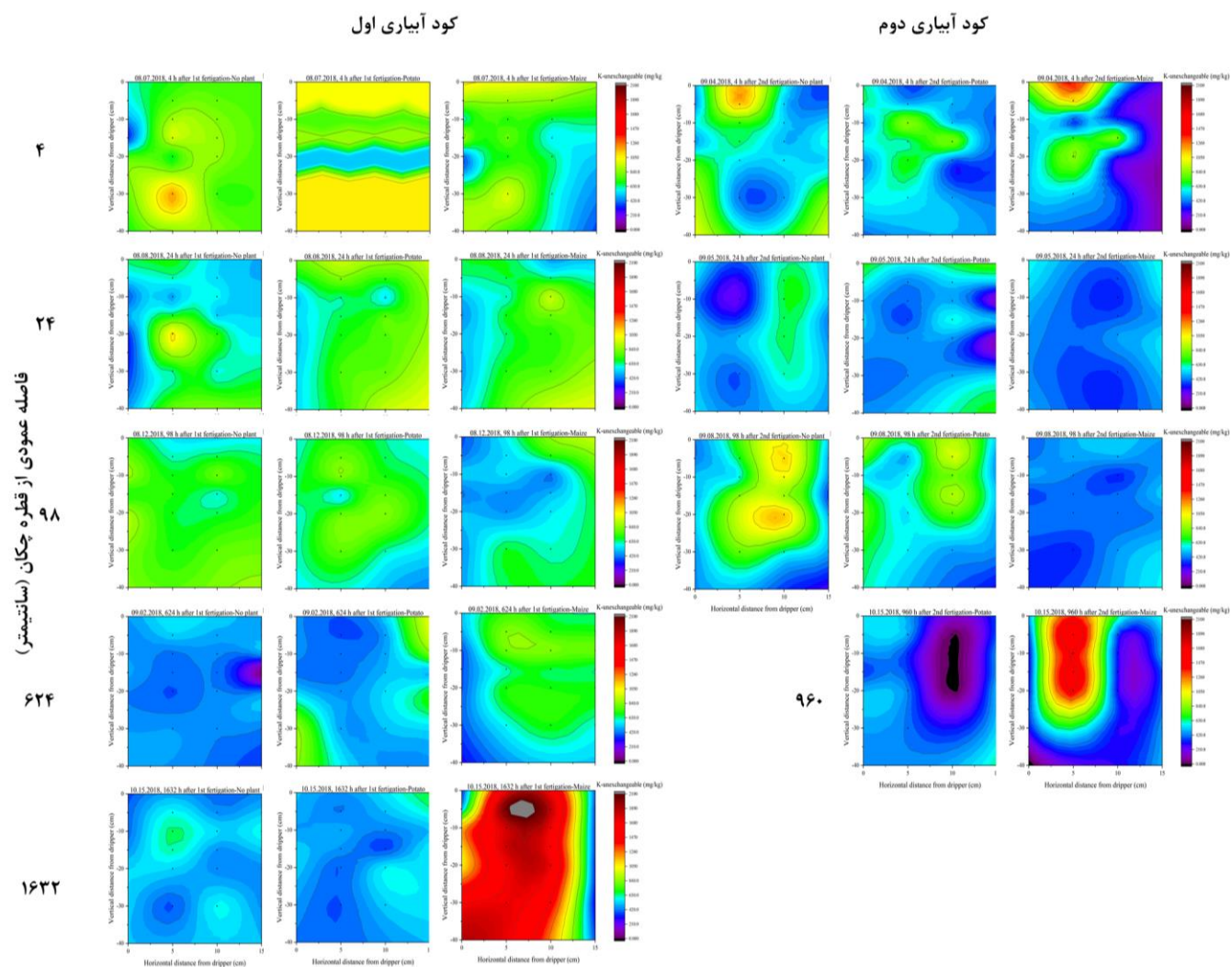
شکل ۸- غلظت پتاسیم محلول در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 8. Soluble potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertilization) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertilization)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.



شکل ۹- غلظت پتاسیم تبادلی در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸، ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 9. Exchangeable potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertigation) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertigation)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.



شکل ۱۰- غلظت پتاسیم غیر تبادلی/کل در زمان‌های مختلف بعد از کوددهی (۴، ۲۴، ۹۸ و ۶۲۴ و ۱۶۳۲ ساعت (کودآبیاری اول) و ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت (کودآبیاری دوم)) برای ناحیه بدون گیاه، سیب‌زمینی و ذرت. نقاط سیاه مشخص شده در شکل‌ها نشان‌دهنده نقاط نمونه‌برداری است.

Figure 10. Non-exchangeable potassium concentration at different times after fertilization (4, 24, 98, 624, and 1632 hours (after first fertigation) and 4, 24, 98, and 960 hours (after second fertigation)) for the uncultivated area, potato, and maize. The black points marked in the figures indicate the sampling points.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور ارزیابی پویایی فسفر و پتاسیم در کشت سیب‌زمینی و ذرت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه موسسه خاک و آب انجام شد. در این تحقیق سعی شد که کلیه عملیات و مدیریت معمول که توسط کشاورز اعمال می‌گردد، بدون تغییر برای زمین و کشت‌های مورد مطالعه لحاظ گردد تا بتوان بهترین نتیجه کاربردی را حصول نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که دینامیک انتقال و توزیع فسفر و پتاسیم در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای به نوع گیاه وابسته است. حرکت عمودی فسفر حداکثر تا ۱۵ سانتی‌متر و حرکت افقی/جانبی آن در سیستم جوی و پشته حداکثر تا ۳۵ سانتی‌متر از قطره‌چکان محدود شد. پتاسیم توانست تا عمق ۲۰ سانتی‌متر و شعاع افقی بیش از ۳۵ سانتی‌متر از نقطه تزریق حرکت کند. توزیع هر دو عنصر به‌طور معناداری از الگوی جبهه رطوبتی خاک پیروی کرد. افزایش دفعات کوددهی با غلظت‌های کمتر، به‌طور کلی منجر به فراهمی بهتر عناصر غذایی

برای گیاهان شد. این رویکرد به‌ویژه برای گیاهان زراعی با سیستم ریشه‌ای سطحی (۰-۴۰ سانتی‌متر) مانند ذرت و سیب‌زمینی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند ضمن افزایش کارایی مصرف کود، از تجمع املاح و ایجاد آلودگی نیز بکاهد. به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی مانند HYDRUS برای آنالیز سناریوهای مختلف مدیریتی (مانند تغییر غلظت یا زمان‌بندی کوددهی) می‌تواند درک بهتری از روند توزیع و فراهمی عناصر ارائه دهد. این امر می‌تواند از دوباره‌کاری‌های پرهزینه و زمان‌بر آزمایشات مزرعه‌ای بکاهد و به‌عنوان یک مزیت کلیدی برای استفاده از رویکرد مدل‌سازی در مطالعات مدیریت خاک و آب تلقی گردد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از گزارش فنی به شماره فروست ۶۷۰۵۵ است. نویسندگان از کلیه دست‌اندرکاران و همکاران موسسه تحقیقات خاک و آب کمال تشکر را دارند.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.
- Ajdary, K., Singh, D.K., Singh, A.K. and Khanna, M., 2007. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural water management*, 89(1-2), pp.15-28.
- Barber, S.A., 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley & Sons.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal* 54, 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Chtouki, M., Naciri, R., Oukarroum, A., 2024. A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: Fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. *Heliyon* 10, e25543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25543>
- Coelho, E.F., Or, D., 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil* 206, 123-136. <https://doi.org/10.1023/A:1004325219804>
- Corwin, D.L., 2021. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science* 72, 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., 2012. Distribution and loss of water and nitrate under alternate and conventional furrow fertigation. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10, 849-863. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012103-585-11>
- Gärdenäs, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Šimůnek, J., 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management* 74, 219-242. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.011>
- Gheysari, M., Pimajmedin, F., Movahedrad, H., Majidi, M.M., Zareian, M.J., 2021. Crop yield and irrigation water productivity of silage maize under two water stress strategies in semi-arid environment: Two different pot and field experiments. *Agricultural Water Management* 255, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106999>
- Grecco, K.L., de Miranda, J.H., Silveira, L.K., van Genuchten, M.T., 2019. HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane. *Agricultural Water Management* 221, 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.010>
- Guido, V., Finzi, A., Ferrari, O., Riva, E., Quílez, D., Herrero, E., Provolo, G., 2020. Fertigation of Maize with Digestate Using Drip Irrigation and Pivot Systems. *Agronomy* 10, 1453. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101453>
- Hafeez, A., Ali, S., Ma, X., Tung, S.A., Shah, A.N., Ahmad, S., Chattha, M.S., Souliyanonh, B., Zhang, Z., Yang, G., 2019. Photosynthetic characteristics of boll subtending leaves are substantially influenced by applied K to N ratio under the new planting model for cotton in the Yangtze River Valley. *Field Crops Research* 237, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.015>
- Hanson, B.R., Šimůnek, J., Hopmans, J.W., 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* 86, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013>
- Havlin, J.L., 2014. Soil fertility and nutrient management. Upper Saddle River, NJ, USA, 460-469.
- Jalali, M., Rowell, D., 2009. Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum. *Environmental Geology* 57, 41-48. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1280-6>
- Khavazi, K., Balali, M., Bazargan, K., Tehrani, M., Rezaei, H., Asadi Rahmani, H., Gheibi, M., Davoodi, M., Saadat, S., Moshiri, F., 2014. Comprehensive soil fertility and plant nutrition program 2014-2025. Soil and Water Research Institute Press, Karaj, Iran.
- Kuldeep, Singh, A.K., Sajwan, A., Kamboj, A.D., Joshi, G., Gautam, R., Kumar, M., Mani, G., Lal, S., Kaur, J., 2024. Advances in precision nutrient management of fruit crops. *Journal of Plant Nutrition* 47, 3251-3271.
- Li, W., Gu, X., Du, Y., Zheng, X., Lu, S., Cheng, Z., Cai, W., Chang, T., 2023. Optimizing nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization regimes to improve maize productivity under double ridge-furrow planting with full film mulching. *Agricultural Water Management* 287, 108439. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2377411>

20. Manning, D.A., Baptista, J., Limon, M.S. and Brandt, K., 2017. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the total environment*, 574, pp.476-481.
21. Mohamadzade, F., Gheysari, M., Eshghizadeh, H., Tabatabaei, M.S., Hoogenboom, G., 2022. The effect of water and nitrogen on drip tape irrigated silage maize grown under arid conditions: Experimental and simulations. *Agricultural Water Management* 271, 107821. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107821>
22. Nie, W.-B., Nie, K.-K., Li, Y.-B., Ma, X.-Y., 2021. HYDRUS-2D Simulations of nitrate nitrogen and potassium transport characteristics under fertilizer solution infiltration of furrow irrigation. *Water Supply* 21, 2665-2680. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.266>
23. Page, A., 1965. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
24. Phogat, V., Pitt, T., Petrie, P., Šimůnek, J., Cutting, M., 2023. Optimization of irrigation of wine grapes with brackish water for managing soil salinization. *Land* 12, 1947. <https://doi.org/10.3390/land12101947>
25. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J., Šimůnek, J., 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology* 513, 504-516. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.008>
26. Raj, I., Šimůnek, J., Ben-Gal, A., Lazarovitch, N., 2016. Water flow and multicomponent solute transport in drip-irrigated lysimeters. *Water Resources Research* 52, 6557-6574. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.016>
27. Rezaei, M., 2016. Characterization and modeling of water flow in sandy soils for irrigation optimization. Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium.
28. Rezaei, M., Movahedi Naeini, S.A.R., 2009a. Effects of ammonium and natural zeolite on potassium adsorption and desorption kinetics in a loess soil. *International Journal of Soil Science*. *International Journal of Soil Science* 4, 27-45. DOI: 10.3923/ijss.2009.27.45
29. Rezaei, M., Movahedi Naeini, S.A.R., 2009b. Kinetics of potassium desorption from a loess soil, soil mixed with zeolite, and the Clinoptilolite Zeolite as influenced by calcium and ammonium. *Journal of Applied Science* 9, 3335-3342. DOI: 10.3923/jas.2009.3335.3342
30. Rezaei, M., Seuntjens, P., Joris, I., Wesley Boënné, W., Van Hoey, S., Campling, P., Cornelis, W., 2016. Sensitivity of water stress in a two-layered sandy grassland soil to variations in groundwater depth and soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 487-503. <https://doi.org/10.5194/hess-20-487-2016>, 2016.
31. Selim, T., Bouksila, F., Hamed, Y., Berndtsson, R., Bahri, A., Persson, M., 2018. Field experiment and numerical simulation of point source irrigation with multiple tracers. *PloS one* 13, e0190500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190500>
32. Shahbazi, K., Mostafa Marzi, Mohammadi, M.H., Asadi, H., Fathi Gerdliani, A., Hasheminasab, K.S., Toluee, R., Behesti, M., Avizhgan, A., Cheraghi, M., 2024. Methods of Soil Analysis; Sampling, Chemical and Physical Methods. *Soil and Water Research Institute* 1, 1074.
33. Sheldrick, W.F., Syers, J.K. and Lingard, J., 2002. A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 62(1), pp.61-72.
34. Šimůnek, J., Brunetti, G., Jacques, D., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2024. Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016. *Vadose Zone Journal* 23, e20310. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20310>
35. Singh, D., Rajput, T., Sikarwar, H., Sahoo, R., Ahmad, T., 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management* 83, 130-134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.002>
36. Surendran, U., Madhava Chandran, K., 2022. Development and evaluation of drip irrigation and fertigation scheduling to improve water productivity and sustainable crop production using HYDRUS. *Agricultural Water Management* 269, 107668. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107668>
37. Tehrani, M., Moshiri, F., Gheibi, M., Rezaei, H., Keshavarz, P., Davoodi, M., Ziaei, A., Noorgholipour, F., Majidi, A., Hosseini, S., 2015. Comprehensive Soil Fertility and Plant Nutrition Program 2014-025. *Agricultural Research, Education and Extension Organization*. *Soil and Water Research Institute* 2.

38. Visconti, F., de Paz, J.M., 2012. Prediction of the soil saturated paste extract salinity from extractable ions, cation exchange capacity, and anion exclusion. *Soil Research* 50, 536-550. <https://www.thefreelibrary.com/Prediction+of+the+soil+saturated+paste+extract+salinity+from...-a0312725419>
39. Walkley, A., 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, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
40. Zhang, J.-j., Li, J.-s., Zhao, B.-q., Li, Y.-t., 2015. Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies. *Journal of Integrative Agriculture* 14, 2434-2445. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61231-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61231-X)
41. Zhang, S., Wang, L., Chen, S., Fan, B., Huang, S., Chen, Q., 2022. Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: Insights from a long term study with equal phosphorus input. *Journal of Environmental Management* 306, 114451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114451>
42. Zhang, Y., Wu, P., Zhao, X., Li, P., 2012. Evaluation and modelling of furrow infiltration for uncropped ridge–furrow tillage in Loess Plateau soils. *Soil Research* 50, 360-370. <https://www.thefreelibrary.com/Evaluation+and+modelling+of+furrow+infiltration+for+uncropped...-a0303450484>