



Comparison of phosphorus uptake efficiency and effective mechanisms in commercial varieties of sugarcane

Saeed Safirzadeh¹ | Akbar Karimi² | Afshin Ariz³

1. Corresponding Author, Hakim Farabi Agro-Industry CO., Khuzestan, Iran. E-mail: s_safirzade@yahoo.com

2. Sugarcane Development and By-Products Research and Training Institute, Khuzestan, Iran. E-mail: akbar.karimi84@yahoo.com

3. Mirza Kochuk Khan Agro-Industry CO., Khuzestan, Iran. E-mail: afshinariz@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: May. 18, 2023</p> <p>Revised: Sep. 1, 2023</p> <p>Accepted: Sep. 3, 2023</p> <p>Published online: Oct. 23, 2023</p> <p>Keywords: Efficient Phosphorus, Phosphorus Influx, Root Length, Sugarcane, Uptake Efficiency.</p>	<p>One of the strategies of using low-soluble P fractions in the soil is selection and cultivation of plants and varieties with high P uptake efficiency. According to the necessity of P uptake efficiency and effective mechanisms in commercial varieties of sugarcane knowledge, a pot experiment was carried out in greenhouse condition in Hakim Farabi Agro-Industry CO.. The treatments were P fertilizer (including: blank (P0), 125 (P50) and 250 (P100) kg ha⁻¹ as triple superphosphate) and varieties of sugarcane (including: CP57-614, CP69-1062 and CP48-103) in three sampling times (including: 45, 90 and 130 days after planting) with three replications in factorial based on completely randomized design. In this study, P uptake, root length, specific root length, root to shoot ratio and P influx were evaluated at each sampling time. In low available P condition, the CP48 and the CP57 varieties able to uptake more P and then considered as efficient P varieties. However, CP69 has less ability to uptake of P in this condition. In this condition, CP48 variety, P uptake was increased by 13% and 45% compared to CP57 and CP69 varieties respectively. However, CP57 showed enhancement of P uptake up to 29% compared to CP69 variety. Phosphorus influx decreased in CP57 and CP69 varieties by 53% and 67% respectively with aging of sugarcane that the greatest decrease of influx was observed in CP69 variety. In the CP48 variety, P influx increased up to 66%, which can be an effective factor in more P uptake. Therefore, these differences in the ability of P uptake in sugarcane varieties and mechanisms affecting P uptake can improve the management of P fertilizer consumption especially in ratoon.</p>
<p>Cite this article: Safirzadeh, S., Karimi, A., & Ariz, A. (2023). Comparison of phosphorus uptake efficiency and effective mechanisms in commercial varieties of sugarcane, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 54 (8), 1179-1196. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.359325.669502</p> <p>© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.</p> <p>DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.359325.669502</p>	

مقایسه کارایی جذب فسفر و مکانیسم‌های مؤثر در آن در واریته‌های تجاری نیشکر

سعید صفیرزاده^۱ | اکبر کریمی^۲ | افشین آریز^۳۱. نویسنده مسئول، شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی، خوزستان، ایران، رایانامه: s_safirzade@yahoo.com۲. موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر، خوزستان، ایران، رایانامه: akbar.karimi84@yahoo.com۳. شرکت کشت و صنعت میرزا کوچک خان، خوزستان، ایران، رایانامه: afshinariz@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از سازوکارهای استفاده از شکل‌های شیمیایی کم‌محلول فسفر در خاک، استفاده از گونه‌های گیاهی و ارقامی است که کارایی جذب فسفر بالایی دارند. به این منظور، در سال ۱۳۹۹ در شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان، کارایی جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر و سازوکارهای مؤثر بر آن در یک آزمایش گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. عوامل مورد بررسی شامل کود فسفر (صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل) و رقم نیشکر (CP57-614، CP69-1062 و CP48-103) بودند که در سه زمان نمونه‌برداری شامل ۴۵، ۹۰ و ۱۳۰ روز پس از کشت در یک آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این مطالعه در هر یک از زمان‌های نمونه‌برداری، پارامترهای جذب فسفر، طول ریشه گیاه، طول ویژه ریشه، نسبت ریشه به ساقه و جریان به درون فسفر مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط کم‌بودن فسفر قابل استفاده در خاک، رقم CP48 و پس از آن رقم CP57 قادر به جذب بیش‌تر فسفر از خاک بودند و بنابراین می‌توان آن‌ها را به عنوان ارقام فسفر کارا در نظر گرفت در حالی که در کمبود فسفر، رقم CP69 توانایی کم‌تری در جذب فسفر از خاک نشان داد. در شرایط کمبود فسفر (P0) مقدار جذب فسفر در رقم CP48 به مقدار ۱۳ و ۴۵ درصد به ترتیب در مقایسه با رقم‌های CP57 و CP69 افزایش داشت و در رقم CP57 نیز ۲۹ درصد افزایش نسبت به رقم CP69 نشان داد. با گذشت زمان، مقدار اینفلاکس فسفر در ارقامی CP57 و CP69 کاهش یافت به طوری که مقدار کاهش به ترتیب ۵۳ و ۶۷ درصد بود در حالی که در رقم CP48 به مقدار ۶۶ درصد افزایش نشان داد. بنابراین تفاوت‌ها در توانایی جذب فسفر در ارقام نیشکر می‌تواند در مدیریت مصرف کود فسفر به ویژه در سن راتون مورد توجه قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۸/۱	
واژه‌های کلیدی: اینفلاکس فسفر، طول ریشه، فسفر کارا، کارایی جذب، نیشکر.	

استناد: صفیرزاده، سعید؛ کریمی، اکبر؛ و آریز، افشین (۱۴۰۲). مقایسه کارایی جذب فسفر و سازوکارهای مؤثر در آن در ارقام تجاری نیشکر. ، *مجله تحقیقات آب و خاک*ایران، ۵۴ (۸)، ۱۱۷۹-۱۱۹۶. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.359325.669502>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.359325.669502>

مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی کلیدی در تولید محصول و ضروری در فعالیتهای حیاتی در چرخه زندگی گیاه نیشکر محسوب می‌شود. تأثیر فسفر در بهبود عملکرد نیشکر عمدتاً به افزایش پنجه‌زنی، افزایش وزن هر نی و همچنین تعداد نهایی ساقه مربوط می‌شود. این عنصر علاوه بر نقش‌های خود در پروتوپلاسم، ذخیره و انتقال انرژی، فتوسنتز و تنفس، در تحریک رشد و گسترش ریشه و همچنین پنجه‌زنی نیز نقش دارد. علاوه بر این، فسفر موجب رسیدگی و بهبود کیفیت شربت نیشکر می‌شود (Gopalasundaram *et al.*, 2012; Zambrosi *et al.*, 2021).

در خاک‌های آهکی اگر چه مقدار فسفر کل زیاد می‌باشد، اما فقط بخش کوچکی از فسفر به‌صورت یون‌های فسفر در محلول خاک وجود دارد. تحرک کم فسفر در خاک نیز به‌علت واکنش‌پذیری زیاد یون‌های فسفر با اجزای خاک است که سبب نگه‌داری قوی فسفر توسط این ترکیبات می‌شود (Hinsinger, 2001; Fernández *et al.*, 2007; Hariprasad and Niranjana, 2009; Singh *et al.*, 2013). بنابراین سازوکارهای مورد استفاده برای تحرک فسفر خاک به‌منظور تغذیه گیاهان می‌تواند عمدتاً روی ارتوفسفات‌های جذب شده و رسوب کرده و معدنی کردن شکل‌های آلی فسفر مانند اینوزیتول فسفات‌ها متمرکز شود (Menezes-Blackburn *et al.*, 2017). فسفر در خاک عمدتاً به‌صورت کمپلکس‌های فلزی وجود دارد و مقادیر زیادی از کودهای شیمیایی فسفات استفاده شده نیز به‌سرعت به‌صورت ترکیبات فسفات غیرمحلول تبدیل می‌شوند. در خاک‌های آهکی بیش‌تر فسفر نامحلول به‌صورت فسفات‌های آهن و آلومینیوم در خاک‌های اسیدی و فسفات‌های کلسیم وجود دارد. از مقدار کود اضافه شده به خاک، حدود ۷۵ درصد از فسفر محلول کود در اثر برهم‌کنش با Ca^{+2} آزاد در خاک‌های با pH بالا به‌شکل با حلالیت کم تبدیل می‌شود (Hariprasad and Niranjana, 2009).

در خاک‌هایی که مقدار فسفر قابل استفاده کم است، گیاهان مختلف و حتی ارقام یک گونه گیاهی دارای توانایی‌های متفاوتی در رشد و نمو می‌باشند یا به‌عبارتی دیگر کارایی استفاده از فسفر آن‌ها متفاوت می‌باشد. ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه همانند خصوصیات فیزیولوژیکی آن ممکن است جذب فسفر از خاک را تحت تأثیر قرار دهد. گیاهان می‌توانند فراهمی فسفر را از طریق تغییرات شیمیایی ریزوسفر تحت تأثیر قرار دهند. این تغییرات شیمیایی می‌تواند از طریق کاهش pH، افزایش تولید اسیدهای آلی کلات‌کننده، قابلیت بیش‌تر برای جذب کلسیم و آزاد کردن فسفر و غیره ایجاد شود. گیاهان خصوصیات فیزیکی (دما، قابلیت دسترسی آب و ساختمان خاک)، شیمیایی (pH، پتانسیل ریداکس، غلظت عناصر غذایی، ترشحات ریشه‌ای، کاهش سمیت آلومینیوم و آلویاتی) و بیولوژیکی (جمعیت میکروبی) ریزوسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اثرات آن‌ها شامل تغییر در حلالیت عناصر غذایی، انتقال و جذب عناصر غذایی و در نهایت رشد گیاه است (Fageria and Stone, 2006).

سازوکارهای جایگزین مصرف کود شیمیایی فسفر می‌تواند هزینه تولید را کاهش داده و از آلودگی‌های ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای فسفر جلوگیری کنند. یکی از این سازوکارها استفاده از گیاهان و یا ارقامی است که توانایی جذب فسفر را از خاک‌های با کمبود فسفر، دارا باشند و یا کارایی جذب فسفر زیادی داشته باشند و این موضوع مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است (Cong *et al.*, 2020). به‌طور کلی کارایی جذب، توانایی گیاه در جذب عناصر غذایی است و از دیدگاه تغذیه گیاه، رقم کارا در جذب فسفر، رقمی است که بتواند ترکیبات مختلف فسفر را در خاک محلول نموده و جذب نماید (Zhang *et al.*, 2012; Zambrosi *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2020). گیاهان برای افزایش سازگاری با شرایط کمبود فسفر، طیف گسترده‌ای از تغییرات، از جمله تغییرات مورفولوژیکی ریشه، القای ترشحات ریشه مانند اسیدهای آلی و فسفاتاز ایجاد می‌کنند (Li *et al.*, 2022). توزیع ریشه در خاک به جذب فسفر و سازگاری نیشکر در شرایط کمبود فسفر در نیشکر کمک می‌کند (Yi *et al.*, 2022; Liu, 2021; Zhou *et al.*, 2021). شکل ظاهری و هندسی ریشه در افزایش جذب فسفر اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا سیستم‌های ریشه‌ای که با نسبت‌های بالاتری از حجم خاک سطحی در تماس هستند به‌طور مؤثرتری حجم و سطح جذب را افزایش می‌دهند (Yi *et al.*, 2022; Liu, 2021).

در شرایطی که مقدار فسفر قابل استفاده در خاک کم است و بنابراین دسترسی گیاه به فسفر محدود می‌باشد، توانایی گیاه در تامین فسفر از ترکیبات کم‌محلول فسفر در خاک و بنابراین جذب فسفر از خاک مهم‌تر از استفاده فسفر جذب شده توسط گیاه است (Yi *et al.*, 2022). برخی از ارقام گیاهی قادرند که در شرایط کمبود فسفر قابل دسترس خاک، رشد مطلوبی داشته باشند که ناشی از کارایی بالای این گیاهان در جذب فسفر است. کارایی بالای جذب فسفر، توانایی گیاهان برای جذب فسفر بیش‌تر از خاک در شرایط محدودیت فسفر قابل دسترس خاک است (Wang *et al.*, 2019). این کارایی جذب زیاد تحت تأثیر دو عامل جریان به درون ریشه (اینفلاکس) زیاد (مانند گیاهان اسفناج و بادام زمینی) و یا نسبت زیاد ریشه به ساقه (مانند گندم) قرار می‌گیرد (Bhadoria *et al.*, 2004). (Bhadoria *et al.*, 2004). (Bhadoria *et al.*, 2004).



(2002) کارایی تغذیه‌ای فسفر را در چهار جزء معرفی کردند که شامل: ۱- سرعت رشد نسبی، ۲- غلظت بحرانی برای دست‌یابی به تولید حداکثر، ۳- نسبت ریشه به ساقه و ۴- اینفلاکس بودند. سه مورد اول عمدتاً توسط گیاه تعیین می‌شوند در حالی که اینفلاکس توسط فراهمی فسفر از خاک به ریشه تعیین می‌شود. اینفلاکس فسفر از یک طرف به توانایی گیاه در جذب و از طرف دیگر به محدودیت‌های حرکت فسفر در خاک مربوط است. سینتیک جذب فسفر، حرکت فسفر در خاک، تراوشات ریشه گیاه و اثر میکروارگانیزم‌ها در جذب فسفر از عوامل مؤثر در اینفلاکس فسفر محسوب می‌شوند (خراسانی، ۱۳۸۹). بنابراین هر عامل مؤثر در تغییر دادن حلالیت و تحرک فسفر در خاک می‌تواند اینفلاکس فسفر به درون گیاه را تغییر دهد. تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی ناشی از فعالیت ریشه گیاه در ریزوسفر، نقش بسیار مهمی را در افزایش فراهمی زیستی فسفر خاک ایفا می‌کنند (Hinsinger, 2001). Sundara (1994) در تحقیقی کارایی فسفر ۲۰ رقم مختلف نیشکر را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از شاخص‌های کارایی وزن خشک گیاه، کارایی عملکرد نی و کارایی عملکرد شکر استفاده شد. نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری در وزن خشک گیاه، عملکرد نی و شکر، غلظت فسفر و جذب فسفر بین ارقام مختلف وجود داشت و براساس شاخص‌های استفاده شده، ارقام به دو دسته فسفر کارا و فسفر ناکارا تقسیم شدند. خراسانی (۱۳۸۹) در سه سطح فسفر و در سه زمان برداشت، کارایی جذب فسفر ذرت، چغندرقد و بادام زمینی را در خاک دارای کمبود فسفر قابل استفاده گیاه مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که چغندرقد در مقایسه با دو گیاه دیگر دارای کارایی جذب فسفر بیشتری بود که بیشتر بودن اینفلاکس فسفر در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده مهم‌ترین عامل افزایش کارایی جذب فسفر برای چغندرقد بیان گردید. *Zambrosi et al.* (2015) با بررسی کارایی جذب فسفر ارقام مختلف نیشکر شامل IACSP95-5000، IACSP94-2101، IACSP94-2094، IAC91-1099، RB86-7515 و IAC87-3396 گزارش کردند کارایی ارقام IACSP94-2094 و IACSP95-5000 در جذب فسفر به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر رقم‌ها بود.

شناخت کارایی ارقام مختلف نیشکر در جذب فسفر یکی از عوامل مهم در مدیریت مصرف کود فسفر و هزینه‌های ناشی از مصرف کود می‌باشد. با توجه به این که در زمینه کارایی جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر در خوزستان مطالعه‌ای انجام نشده است و با توجه به ضرورت موضوع، تحقیق حاضر با اهداف ۱- بررسی و مقایسه کارایی جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر، ۲- مقایسه رفتار جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر در مقادیر مختلف فسفر قابل استفاده در خاک و ۳- بررسی سازوکارهای مؤثر در کارایی جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر، انجام شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده برای انجام این پژوهش گلخانه‌ای از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) یکی از مزارع نیشکر در محل شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان (طول جغرافیایی E ۳۶° ۴۸ و عرض جغرافیایی N ۵۹° ۳۰) تهیه شد. نمونه خاک، هواخشک شده و مقداری از آن به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1961)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1996)، مقدار کربن آلی با استفاده از روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996) و کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش (Loeppert and Suarez, 1996) اندازه‌گیری شدند. مقدار فسفر قابل استفاده در خاک به روش استخراج با بی‌کربنات سدیم (Olsen *et al.*, 1954) عصاره‌گیری و غلظت آن به روش رنگ‌سنجی (Murphy and Riley, 1962) اندازه‌گیری شد و مقدار پتاسیم قابل استخراج نیز توسط اساتد آمونیوم (Helmke and Sparks, 1996) تعیین شد.

نتایج آنالیز خاک نشان داد که خاک مورد استفاده دارای بافت لوم رسی سیلتی، قابلیت هدایت الکتریکی و pH به ترتیب برابر ۲/۵۸ دسی‌زیمنس بر متر و ۷/۴۷ بود. مقدار کربن آلی برابر ۰/۴۲ درصد و کربنات کلسیم معادل برابر ۳۰/۶ درصد بود. مقادیر فسفر و پتاسیم قابل استفاده در خاک به ترتیب ۴/۸ و ۲۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

این پژوهش در سال ۱۳۹۹ در شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان به‌صورت فاکتوریل با دو عامل کود فسفر (در سه سطح شامل مصرف صفر، ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل) و نوع رقم نیشکر (در سه سطح شامل سه ارقام تجاری CP57-614، CP69-1062 و CP48-103) در سه زمان مختلف نمونه‌برداری شامل ۴۵، ۹۰ و ۱۳۰ روز پس از کشت در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای و در مجموع با تعداد ۸۱ گلدان انجام شد.

خاک نمونه‌برداری شده جهت کشت گلدانی پس از هوا خشک شدن، از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد و سپس در گلدان‌ها (به

مقدار ۴۳ کیلوگرم) ریخته شد. از لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر به‌منظور گلدان کشت استفاده شد. به‌دلیل سهولت خارج کردن خاک و ریشه‌های گیاه در زمان برداشت، ابتدا یک کیسه پلاستیکی درون لوله پلی‌اتیلنی قرار داده شد. پس از پر کردن گلدان‌ها، در عمق ۵ سانتی‌متر در زیر محل قرار گرفتن قلمه‌ها (عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک)، کود سوپرفسفات تریپل به مقدار صفر (P0: شاهد)، ۱۲۵ (P50: ۵۰ درصد توصیه کودی) و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (P100: ۱۰۰ درصد توصیه کودی براساس توصیه کودی موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر و صنایع جانبی خوزستان) در گلدان‌های مورد نظر برای هر تیمار، قبل از کشت به خاک اضافه شد. به‌منظور کشت گیاه، قلمه‌های تک‌جوانه از سه رقم تجاری نیشکر (CP57-614، CP69-1062 و CP48-103) تهیه شد و در گلدان‌های مورد نظر قرار داده شدند به‌طوری‌که در هر گلدان دو قلمه تک‌جوانه‌دار در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح خاک کشت شد که در مرحله دو برگی و پس از اطمینان از سبز شدن جوانه‌ها، یکی از گیاهان حذف شد. کود اوره به‌منظور تأمین نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت (نیمی در مرحله ۴ برگی و باقیمانده کود در ۳۰ روز بعد از آن) به‌صورت محلول در آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. به‌منظور تأمین رطوبت مناسب خاک در دوره آزمایش، آبیاری در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و در رطوبت وزنی خاک $1 \pm 16\%$ درصد با تعیین رطوبت در گلدان‌های تخریبی، به‌روش وزنی انجام شد و در طول دوره آزمایش رطوبت خاک گلدان‌ها در این محدوده حفظ شد. نیشکر در گلخانه در شرایط دمایی ۳۴ درجه سلسیوس دمای روز و ۱۸/۴ درجه سلسیوس دمای شب رشد کرد.

به‌منظور بررسی جریان به درون (اینفلاکس) فسفر، برداشت گیاه در سه زمان ۴۵، ۹۰ و ۱۳۰ روز پس از کشت (به‌ترتیب T45، T90 و T130) انجام شد و در هر زمان نمونه‌برداری، گلدان‌ها به‌طور کامل تخلیه شدند.

در زمان برداشت، بخش هوایی گیاه نیشکر از سطح خاک بریده شد و پس از تمیز کردن گیاه از ذرات خاک با استفاده از قلم‌موی نرم، به‌منظور تعیین وزن خشک، نمونه‌ها در آون در درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس از وزن کردن نمونه‌ها، بخش هوایی گیاه خشک شده، آسیاب شد و سپس فسفر در نمونه‌های گیاه با استفاده از روش میلر (Miller, 1998) عصاره‌گیری شد و غلظت آن به‌روش مورفی و ریلی (Murphy and Riley, 1962) تعیین شد. مقدار جذب فسفر در نمونه‌های گیاهی از حاصل ضرب وزن خشک گیاه در غلظت فسفر بدست آمد. به‌منظور جمع‌آوری ریشه‌ها، خاک درون گلدان‌ها به‌طور کامل خارج شد و ریشه‌های گیاه به‌تدریج روی الک با استفاده از آب شسته شدند. طول ریشه در هر تیمار با استفاده از روش شمارش خطوط متقاطع (Tennant, 1975) اندازه‌گیری شد و وزن خشک ریشه مشابه با روش انجام شده در بخش هوایی گیاه، تعیین گردید. همچنین طول ویژه ریشه از تقسیم طول ریشه بر وزن خشک ریشه براساس واحد متر بر گرم محاسبه گردید. مقدار جریان به درون فسفر (I_n) (مول بر سانتی‌متر بر ثانیه) با استفاده از معادله ویلیامز (Föhse et al., 1991) در رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$I_n = \frac{U_2 - U_1}{RL_2 - RL_1} \times \frac{\ln\left(\frac{RL_2}{RL_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه U مقدار جذب فسفر (مول در گلدان)، RL طول ریشه (سانتی‌متر در گلدان)، t زمان نمونه‌برداری (ثانیه) و زیرنویس‌های ۱ و ۲ نشان دهنده زمان برداشت هستند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار Minitab 16 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) انجام گردید و نمودارها با استفاده از MS-Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس خصوصیات مورد بررسی متاثر از تیمارهای کود فسفر و رقم گیاه نیشکر در سه زمان مختلف نمونه‌برداری در جدول ۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی در تمام زمان‌های نمونه‌برداری، اثر عوامل کود فسفر، رقم گیاه و اثر متقابل آنها بر موارد مورد مطالعه از نظر آماری معنی‌دار بود.

جذب فسفر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کود فسفر و نوع رقم نیشکر و اثر متقابل آن‌ها در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری بر جذب فسفر در گیاه نیشکر معنی‌دار بود (جدول ۱). در اولین زمان برداشت گیاه در ۴۵ روز پس از کشت، در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده (شاهد) کم‌ترین مقدار جذب فسفر در رقم CP57 مشاهده شد در حالی که بیشترین مقدار جذب فسفر در رقم CP48 مشاهده شد که با دو

رقم دیگر دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) بود (جدول ۲). با اضافه کردن مقدار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر در خاک در تیمار P50، مشاهده گردید که مانند تیمار قبلی فسفر، رقم CP48 دارای بیشترین مقدار جذب فسفر در مقایسه با ارقام دیگر بود به طوری که مقدار جذب فسفر در این رقم به ترتیب ۷۶ و ۸۰ درصد بیشتر از ارقام به ترتیب CP57 و CP69 بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها در تیمار P100 نیز نشان داد که رقم CP48 دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) در جذب فسفر در مقایسه با ارقام مورد مطالعه دیگر بود. به طوری که مقدار جذب فسفر در رقم CP48 در مقایسه با ارقام CP57 و CP69 به ترتیب ۴۱ و ۵۷ درصد بیشتر بود. مقایسه ارقام تجاری تا زمان ۴۵ روز پس از کشت نیشکر نشان داد که رقم CP48 دارای بیشترین توانایی در جذب فسفر از خاک در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک و نیز در شرایط فراهم بودن فسفر در خاک می‌باشد. بنابراین تا اولین زمان نمونه‌برداری، رقم CP48 دارای بیشترین کارایی جذب فسفر از خاک در شرایط کمبود فسفر و همچنین دارای بیشترین کودپذیری در شرایط استفاده از کود شیمیایی فسفر بود. اگر چه اختلاف ارقام CP57 و CP69 از نظر آماری معنی‌دار نبود اما از لحاظ کمی، رقم CP57 مقدار جذب بیشتری را نشان داد. *Zhou et al.* (2021) با بررسی کارایی سه ژنوتیپ نیشکر (YN73-204، CP72-1210 و BC2-32) در جذب فسفر از منابع مختلف فسفر، گزارش کردند که ژنوتیپ BC2-32 بالاترین کارایی را در جذب فسفر در شرایط کاربرد منابع کم‌محلول فسفر و محدود بودن فسفر قابل دسترس خاک، داشت.

جدول ۱. تجزیه واریانس میانگین مربعات تیمارهای کود فسفر، رقم نیشکر و اثرات متقابل آنها بر جذب فسفر و مورفولوژی ریشه

منبع تغییرات	درجه آزادی	جذب فسفر	طول ریشه	نسبت ریشه به ساقه	طول ویژه ریشه
۴۵ روز پس از کشت					
فسفر	۲	۰/۹۳*	۱۴۶/۳۶**	۱۵/۸۵**	۲۵۵/۲۵**
رقم	۲	۲۴/۶۳**	۲۶۸/۳۴**	۲۳/۱۹**	۱۷۲/۵۲**
فسفر × رقم	۴	۱/۰۸**	۱۱۶/۱۹**	۱۱/۹۸**	۲۴۶/۷۹**
خطا	۱۸	-۰/۲۲	۱/۶۸	۱/۲۰	۱۵/۰۵
۹۰ روز پس از کشت					
فسفر	۲	۳۸/۴۱**	۸۸۱/۶۰**	۲/۸۷**	۴/۶۲**
رقم	۲	۷۶/۲۱**	۲۶۲۸/۴۰**	۴/۴۹**	۳/۷۴**
فسفر × رقم	۴	۶۵/۳۹**	۱۹۹۵/۶۰**	۶/۳۶**	۶۶/۱۱**
خطا	۱۸	۳/۳۴	۲/۶۰	-۰/۰۷	-۰/۴۲
۱۳۰ روز پس از کشت					
فسفر	۲	۳۲/۱۲**	۹۹۹/۸۴**	۶/۰۹**	۲/۶۰**
رقم	۲	۱۴۳/۴۳**	۱۳۲۸/۳۷**	۱/۶۶**	۵/۲۰**
فسفر × رقم	۴	۲۷/۶۸**	۶۳۶/۵۶**	۲/۷۶**	۱۸/۲۸**
خطا	۱۸	۵/۰۲	۷/۱۴	-۰/۰۶	-۰/۲۹

ns: غیر معنی‌دار، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

در ۹۰ روز پس از کشت، مقایسه میانگین مقدار جذب فسفر در ارقام مختلف نیشکر در شرایط کمبود فسفر در خاک (P0) نشان داد که رقم CP57 دارای مقدار جذب فسفر بیشتری در مقایسه با ارقام دیگر بود در حالی که این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. بنابراین با گذشت زمان، رقم CP57 در شرایط کمبود فسفر قادر بود فسفر بیشتری را از خاک جذب کند. با افزایش کود شیمیایی فسفر به خاک در تیمار P50، بیشترین مقدار جذب فسفر در رقم CP69 مشاهده گردید که دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) در مقایسه با دو رقم دیگر بود همچنین جذب فسفر در رقم CP48 دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به رقم CP57 بود. جذب فسفر در رقم CP57 در تیمار P50 کمتر از تیمار P0 بود که نشان دهنده توانایی بیشتر رقم CP57 در جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر در خاک بود. در تیمار افزایش ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر، مقایسه میانگین‌های جذب فسفر در ارقام مختلف نشان می‌دهد که رقم CP48 دارای بیشترین مقدار جذب فسفر بود در حالی که اختلاف معنی‌داری را با رقم CP69 نشان نداد. در این شرایط کمترین مقدار جذب فسفر در رقم CP57 مشاهده گردید به طوری که در مقایسه با ارقام CP69 و CP48 به ترتیب دارای ۴۰ و ۴۱ درصد جذب فسفر کمتری بود. بنابراین تا زمان ۹۰ روز پس از کشت ارقام مختلف نیشکر، رقم CP57 دارای بیشترین کارایی جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک بود در حالی که دو رقم CP69 و CP48 در زمان واکنش بیشتری را به استفاده از کود شیمیایی فسفر در خاک نشان دادند و بنابراین کودپذیری بیشتری داشتند (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین‌ها در سومین زمان برداشت در ۱۳۰ روز پس از کشت نشان داد که در تیمار کمبود فسفر قابل استفاده در خاک (P0)، بیشترین مقدار جذب فسفر در رقم CP48 مشاهده گردید که اختلاف معنی‌داری را با رقم CP57 نشان نداد. در حالی که کمترین مقدار جذب فسفر با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) در رقم CP69 مشاهده گردید به طوری که جذب فسفر در این رقم در مقایسه با ارقام CP57 و CP48 به ترتیب ۲۲ و ۳۱ درصد کمتر بود. بنابراین نتایج جذب فسفر در ارقام مختلف نیشکر تا ۱۳۰ روز پس از کشت نشان می‌دهد که ارقام CP57 و CP48 دارای کارایی جذب فسفر بیشتری در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک هستند و به عبارتی این ارقام تجاری نیشکر فسفرکارا می‌باشند. با افزودن کود شیمیایی فسفر به خاک در تیمار P50، جذب فسفر در ارقام مختلف نیشکر دارای اختلاف معنی‌داری نبود. همچنین مقادیر جذب فسفر در هر رقم نیشکر در تیمار P50 اختلاف معنی‌داری را با تیمار P0 نشان نداد اگر چه جذب فسفر در رقم CP69 در تیمار P50 افزایش یافته بود. نتایج جذب فسفر در گیاه نیشکر در ارقام مختلف با افزودن ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر (P100) نشان داد که بیشترین مقدار جذب فسفر در رقم CP48 اتفاق افتاد و کمترین جذب فسفر در رقم CP57 مشاهده شد. مقدار جذب فسفر در رقم CP69 کمتر از رقم CP48 و بیشتر از رقم CP57 بود و با آنها اختلاف معنی‌دار آماری را نشان نداد. در زمان ۱۳۰ روز پس از کشت، تغییرات جذب فسفر ارقام نیشکر در تیمارهای مختلف کوددهی فسفر نشان می‌دهد که در رقم CP57، بیشترین مقدار جذب فسفر در تیمار P0 و کمترین مقدار جذب فسفر در تیمار P100 مشاهده گردید به طوری که اختلاف این دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار ($P < 0.05$) بود (جدول ۲). مقدار جذب فسفر در تیمار P50 اختلاف معنی‌داری با تیمارهای P0 و P100 نداشت در حالی که از نظر کمی، مقدار جذب در P50 بیشتر از P100 بود. همین روند نیز در زمان ۹۰ روز پس از کشت در رقم CP57 مشاهده گردید. جذب فسفر در رقم CP69 در هر سه تیمار کود فسفر اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند در حالی که با اضافه کردن کود فسفر به خاک، مقدار جذب فسفر در رقم CP69 افزایش یافته بود و جذب بیشتر فسفر در تیمار P50 مشاهده گردید. در زمان ۹۰ روز پس از کشت نیز همین رفتار جذب فسفر در رقم CP69 مشاهده شد. مقدار جذب فسفر در رقم CP48 در تیمارهای مختلف فسفر در سومین زمان نمونه‌برداری اختلاف معنی‌داری نداشتند و بیشترین مقدار جذب فسفر در این رقم در تیمار P0 اتفاق افتاد.

بررسی ارقام مختلف نیشکر در تیمارهای کود فسفر تا زمان ۱۳۰ روز پس از کشت نشان داد که رقم CP48 دارای کارایی بالایی در جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده خاک بود که این را می‌توان به توسعه مناسب سازوکارهای دسترسی به فسفر کم‌محلول خاک در شرایط کمبود فسفر، نسبت داد. در حالی که این رقم دارای توانایی بیش‌تری در مقایسه با دو رقم دیگر در جذب فسفر در زمان استفاده از کود شیمیایی نیز می‌باشد. در نتیجه رقم CP48 دارای توانایی و کارایی مناسبی در جذب فسفر از خاک و کود است. در رقم CP69 مشاهده شد که مقدار جذب فسفر با اضافه کردن کود فسفر به خاک افزایش یافت و در شرایط کم بودن فسفر قابل استفاده خاک (P0) دارای کم‌ترین مقدار جذب فسفر نسبت به سایر ارقام بود. بنابراین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رقم CP69 دارای کارایی جذب فسفر کمی می‌باشد و بهبود جذب فسفر و تغذیه فسفر گیاه در این رقم وابسته به استفاده از کود شیمیایی است. جذب فسفر در رقم CP57 در تیمار کمبود فسفر قابل استفاده خاک نشان دهنده کارایی مناسب رقم CP57 در جذب فسفر از منابع نسبتاً نامحلول فسفر خاک با توسعه سازوکارهای دسترسی به این منابع از فسفر است. نتایج پژوهش Safirzadeh et al., (2019) نشان داد که در شرایط کم بودن فسفر قابل استفاده در خاک، رقم CP57 قادر بود در ۹۵ روز پس از کشت، مقدار ۷۰/۴ درصد از فسفر جذب شده را از منابع فسفر غیرالسن (ترکیبات کم‌محلول و نامحلول فسفر) از خاک جذب نماید. مقایسه جذب فسفر در تیمارهای P0 و P100 نشان داد که رقم CP57 تا زمان ۱۳۰ روز پس از کشت مقدار فسفر بیش‌تری را از خاک در شرایط عدم کاربرد کود فسفر (P0) جذب کرد که این نتیجه نشان‌دهنده سازگاری رقم CP57 با شرایط کمبود فسفر و جذب بیش‌تر فسفر در شرایط کمبود فسفر خاک است. همچنین کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل در هر سه رقم مورد بررسی تا زمان ۱۳۰ روز پس از کشت، نتایج جذب فسفر مناسبی را نشان داد که می‌تواند در مدیریت کوددهی فسفر در نیشکر مورد توجه قرار گیرد. (Shujie and Yunfa (2011) در بررسی دو رقم از گیاه سویا به این نتیجه رسیدند که رقمی از سویا که دارای کارایی فسفر زیاد است در شرایط کمبود فسفر قابل جذب خاک، طول و تعداد ریشه را به عنوان سازوکارهای سازگار با شرایط کمبود فسفر افزایش داده و نیاز فسفر خود را تأمین نمود. (Zambrosi et al., (2015) در بررسی کارایی جذب فسفر توسط ارقام مختلف نیشکر نشان دادند که در ارقامی با کارایی فسفر زیاد در شرایط کمبود فسفر، وزن خشک ریشه و ساقه و طول ریشه افزایش یافت. (Gahoonia et al., (2000) با بررسی دو رقم جو زمستانه در جذب فسفر گزارش کردند که یکی از ارقام قادر به ایجاد ریشه بلندتر و ترشح اسیدهای آلی سیتریک و استیک بیشتر بود که این امر موجب گردید تا توانایی این رقم از جو در جذب فسفر از منابع با حلالیت کم فسفر در خاک، افزایش یابد.

جدول ۲. آزمون میانگین اثرات متقابل رقم‌های نیشکر و زمان نمونه‌برداری بر جذب فسفر (میلی‌گرم در گیاه) در سه مقدار مختلف کود فسفر

CP48	CP69	CP57	
۴۵ روز پس از کشت			
۷/۱۹ ^{ab}	۴/۸۳ ^c	۳/۶۳ ^c	P0
۸/۰۱ ^a	۴/۴۴ ^c	۴/۵۵ ^c	P50
۶/۴۵ ^b	۴/۱۲ ^c	۴/۵۷ ^c	P100
۹۰ روز پس از کشت			
۱۶/۹۱ ^{cde}	۱۸/۷۴ ^{bcd}	۲۱/۹۹ ^{bc}	P0
۲۲/۶۹ ^b	۲۸/۶۵ ^a	۱۶/۷۱ ^{de}	P50
۲۲/۲۵ ^b	۲۱/۷۴ ^{bcd}	۱۳/۰۴ ^e	P100
۱۳۰ روز پس از کشت			
۴۰/۰۷ ^a	۳۷/۷۰ ^d	۳۵/۶۳ ^{ab}	P0
۳۹/۷۹ ^a	۳۲/۸۹ ^{bcd}	۳۴/۶۳ ^{abc}	P50
۳۵/۸۲ ^{ab}	۳۲/۰۲ ^{bcd}	۲۸/۳۱ ^{cd}	P100

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر مقدار فسفر به صورت جداگانه، براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) دارند. P0، P50 و P100 به ترتیب نشان‌دهنده عدم مصرف کود شیمیایی فسفر، مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل

طول ریشه

بررسی نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که تاثیر کاربرد کود فسفر، رقم نیشکر و اثر متقابل آن‌ها تاثیر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر طول ریشه گیاه داشتند. در بررسی مقایسه میانگین‌ها در اولین زمان نمونه‌برداری در شرایط کمبود فسفر در خاک (P0)، بیش‌ترین طول ریشه با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) نسبت به دو رقم دیگر در رقم CP48 مشاهده شد در حالی که ارقام CP57 و CP69 از نظر طول ریشه اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۳) به طوری که طول ریشه در رقم CP48 در مقایسه با ارقام CP57 و CP69 به ترتیب ۴۲ و ۵۴ درصد بیشتر بود. با افزایش ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل (P50)، رقم CP48 دارای بیش‌ترین مقدار طول ریشه بود که با افزایش ۲۴ و ۴۶ درصدی طول ریشه، اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) را با به ترتیب ارقام CP57 و CP69 نشان داد (جدول ۳). همچنین در رقم CP57 اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) از نظر طول ریشه با رقم CP69 مشاهده گردید. نتایج مقایسه میانگین‌ها در تیمار کوددهی P100 نشان داد که با مصرف کود فسفر در خاک در اولین زمان نمونه‌برداری، اختلاف معنی‌داری در طول ریشه گیاه نیشکر در ارقام مختلف مشاهده نشد. افزایش قابلیت دسترسی گیاه به فسفر با افزایش مصرف کود فسفر می‌تواند دلیل این عدم اختلاف در طول ریشه ارقام مورد بررسی باشد. افزایش طول ریشه در رقم CP48 می‌تواند به عنوان یکی از سازوکارهای جذب بیش‌تر فسفر از خاک در شرایط کم بودن فسفر قابل استفاده خاک (P0) تا ۴۵ روز پس از کشت نیشکر باشد. در رقم CP57 طول ریشه با افزایش کود شیمیایی فسفر به خاک افزایش داشت و این اختلاف با تیمار P0 معنی‌دار ($P < 0.05$) بود و بیش‌ترین طول ریشه در تیمار P50 مشاهده گردید. رقم CP69 نیز طول ریشه با افزایش مقدار مصرف کود شیمیایی فسفر افزایش یافت.

مقایسه میانگین طول ریشه ارقام مورد بررسی در ۹۰ روز پس از کشت نشان داد که ارقام CP48 و CP57 اختلاف معنی‌داری با رقم CP69 داشتند. به طوری که طول ریشه در این دو رقم در مقایسه با رقم CP69 به ترتیب ۶۸ و ۷۱ درصد بیش‌تر بود. افزایش طول ریشه، به‌ویژه در رقم CP57 می‌تواند به عنوان یکی از سازوکارهای جذب بیش‌تر فسفر از خاک در شرایط کم بودن فسفر قابل استفاده خاک (P0) باشد. این در حالی است که طول بیشتر ریشه در رقم CP48 در دومین زمان نمونه‌برداری عامل مؤثر در جذب فسفر در مقایسه با رقم CP69 نبود. Richardson *et al.*, (2009) بیان کردند که در مورد تغذیه عناصری مانند فسفر، رشد ریشه و نفوذ آن به درون نواحی جدیدی از خاک در جذب فسفر گیاه مهم است. افزایش جذب فسفر به عنوان سازوکار اصلی برای سازگاری با شرایط کم بودن فسفر قابل دسترسی در خاک، در نظر گرفته می‌شود و یکی از پاسخ‌های رقم‌های گیاهی برای جذب بیش‌تر فسفر در شرایط کم بودن فسفر قابل دسترسی خاک، تغییرات مورفولوژیکی ریشه می‌باشد (Wissuwa *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021). Zhou *et al.*, (2021) با بررسی و مقایسه پارامترهای مورفولوژیکی ریشه در سه ژنوتیپ نیشکر (YN73-204، CP72-1210 و BC2-32) و سازوکارهای افزایش جذب فسفر، گزارش کردند افزایش طول کل ریشه و توسعه آن در ژنوتیپ BC2-32 سازوکار مؤثر در افزایش جذب فسفر در شرایط محدود بودن فسفر قابل دسترسی خاک بود. در دومین زمان برداشت در تیمار P50، رقم CP48 با بیش‌ترین مقدار طول ریشه دارای اختلاف

معنی‌داری ($P < 0.05$) در مقایسه با دو رقم دیگر بود به طوری که طول ریشه در مقایسه با ارقام CP57 و CP69 به ترتیب ۲/۱ و ۱/۲ برابر بیشتر بود. کم‌ترین طول ریشه (۵۵/۸۵ متر در گیاه) در رقم CP57 مشاهده شد که در مقایسه با اولین زمان نمونه‌برداری، با نرخ کم‌تری افزایش یافته بود. طول ریشه در رقم CP69 به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کمتر از طول ریشه در رقم CP48 و بیشتر از طول ریشه رقم CP57 بود. بنابراین در ارقام CP69 و CP48 افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) طول ریشه در تیمار P50 در مقایسه با تیمار P0 می‌تواند یکی از عوامل جذب بیشتر فسفر از خاک باشد در حالی که در رقم CP57 کمتر بودن معنی‌دار ($P < 0.05$) طول ریشه در تیمار P50 نسبت به P0 منجر به جذب کمتر فسفر از خاک تا زمان ۹۰ روز پس از کشت شده است. مقایسه میانگین طول ریشه ارقام مختلف نیشکر در تیمار P100 نشان داد که مشابه با تیمار P50، ارقام CP48 و CP69 دارای طول ریشه بیشتر معنی‌داری ($P < 0.05$) در مقایسه با رقم CP57 بودند.

در بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها در ۱۳۰ روز پس از کشت در تیمار P0، بیش‌ترین طول ریشه با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) در رقم CP69 مشاهده گردید که پس از آن ارقام CP48 و CP57 قرار داشتند، به طوری که طول ریشه در رقم CP69 در مقایسه با ارقام CP48 و CP57 به ترتیب ۹ و ۲۰ درصد بیش‌تر بود. کند شدن روند افزایش طول ریشه از ۹۰ تا ۱۳۰ روز پس از کشت در رقم‌های CP57 و CP48 می‌تواند به دلیل تأمین نیاز گیاه به فسفر در مراحل قبل در دو رقم مذکور باشد که منجر به کاهش نرخ افزایش طول ریشه به‌عنوان سازوکار بهبود جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر تا زمان ۱۳۰ روز پس از کشت شد. در حالی که در رقم CP69 طول ریشه به دلیل عدم تأمین فسفر مورد نیاز گیاه، بیش‌تر افزایش یافت. بنابراین در رقم CP57، طول ریشه به عنوان سازوکار موثر در بیشتر بودن جذب فسفر از خاک در مقایسه با رقم CP69 نبود. در تیمار P50، بیش‌ترین طول ریشه (۱۴۷/۵ متر در گیاه) مربوط به رقم CP48 بود که دارای اختلاف معنی‌داری نسبت به دو رقم دیگر بود به طوری که طول ریشه در این رقم در مقایسه با ارقام CP57 و CP69 به ترتیب به مقدار ۱۵ و ۲۴ درصد بیشتر بود. بنابراین در سطح کاربرد کود P50 با فراهمی نسبی فسفر قابل استفاده در خاک، رقم CP48 از طریق افزایش طول ریشه قادر به جذب بیش‌تر فسفر از خاک بود. در رقم CP57 طول ریشه تقریباً مشابه با شرایط عدم کاربرد کود فسفر (P0) بود که یکی از دلایل جذب فسفر مشابه در دو سطح کاربرد کود P0 و P50 در این رقم می‌باشد. در رقم CP69 در تیمار P50 طول ریشه به عنوان عامل موثر بر جذب فسفر این رقم از خاک نیست. در ۱۳۰ روز پس از کشت، ارقام CP69 و CP48 از نظر طول ریشه اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با رقم CP57 در شرایط استفاده ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر داشتند. بنابراین توسعه کم‌تر ریشه در رقم CP57 با فراهم بودن فسفر خاک، می‌تواند از دلایل جذب کم‌تر فسفر در این رقم نسبت به دو رقم مورد بررسی در سطح کاربرد کود P100 باشد. Marenì *et al.*, (2013) گزارش کردند مصرف ۲۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار سبب افزایش تعداد و تراکم ریشه نیشکر شد. Safirzadeh *et al.*, (2019) در مطالعه جذب فسفر در رقم CP57-614 نشان دادند که با افزایش فراهمی فسفر در خاک، طول ریشه نیشکر در رقم مورد بررسی افزایش یافت.

جدول ۳. آزمون میانگین اثرات متقابل رقم‌های نیشکر و زمان نمونه‌برداری بر طول ریشه نیشکر (متر در گیاه) در سه مقدار مختلف کود فسفر

CP48	CP69	CP57	
۴۵ روز پس از کشت			
۴۹/۱۱ ^b	۳۱/۸۴ ^g	۳۴/۵۴ ^{fg}	P0
۵۵/۶۰ ^a	۳۸/۱۰ ^{ef}	۴۴/۸۵ ^c	P50
۳۸/۵۵ ^{de}	۴۱/۸۵ ^{cd}	۴۰/۲۵ ^{de}	P100
۹۰ روز پس از کشت			
۱۰۶/۶۸ ^b	۶۳/۵۲ ^c	۱۰۸/۸۸ ^b	P0
۱۱۸/۸۸ ^a	۹۸/۷۸ ^c	۵۵/۸۵ ^f	P50
۸۹/۱۳ ^d	۸۷/۱۲ ^d	۴۸/۸۳ ^g	P100
۱۳۰ روز پس از کشت			
۱۳۳/۸ ^c	۱۴۵/۸ ^b	۱۲۱/۴ ^{de}	P0
۱۴۷/۵ ^b	۱۱۹/۰ ^e	۱۲۸/۳ ^{cd}	P50
۱۶۱/۸ ^a	۱۶۵/۷ ^a	۱۲۴/۹ ^{de}	P100

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر مقدار فسفر به‌صورت جداگانه، براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) دارند. P0، P50 و P100 به ترتیب نشان‌دهنده عدم مصرف کود شیمیایی فسفر، مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل

نسبت ریشه به ساقه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کود فسفر، نوع رقم نیشکر و اثر متقابل آنها بر نسبت ریشه به ساقه گیاه معنی‌دار ($P < 0.01$) بود (جدول ۱). در اولین زمان نمونه‌برداری در شرایط کمبود فسفر در خاک (P0)، نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار نسبت ریشه به ساقه در ارقام مختلف تجاری نیشکر بود (جدول ۴). با این حال از نظر کمی، رقم CP57 دارای نسبت ریشه به ساقه بزرگتری بود. بنابراین هماهنگی بین توسعه ریشه و بخش هوایی گیاه عامل موثر جذب بیشتر فسفر در رقم CP48 در این تیمار نبود. در سطح کاربرد کود فسفر P50 در ۴۵ روز پس از کشت، مقایسه میانگین اثرات متقابل داده‌ها نشان داد که نسبت ریشه به ساقه در رقم CP57 به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از دو رقم دیگر بود به‌طوری‌که این مقدار در مقایسه با ارقام CP48 و CP69 به‌ترتیب ۲۶ و ۳۷ درصد بیش‌تر بود (جدول ۴). این در حالی است که ارقام CP48 و CP69 اختلاف معنی‌داری را با یکدیگر نشان ندادند. در رقم CP57 اگر چه افزایش نسبت ریشه به ساقه در تیمار P50 می‌تواند در مقایسه با تیمار P0 در افزایش جذب فسفر موثر باشد اما در مقایسه با رقم CP48 که با نسبت کمتر ریشه به ساقه دارای جذب بیشتری از فسفر خاک بود، صادق نیست. در سطح کاربرد کود P100 که محدودیت دسترسی فسفر خاک، به‌دلیل استفاده از کود شیمیایی فسفر کم‌تر بود، مشاهده شد که رقم CP69 دارای بیش‌ترین نسبت ریشه به ساقه بود به‌طوری‌که اختلاف آن با رقم CP48 معنی‌دار ($P < 0.05$) بود. کم‌ترین مقدار نسبت ریشه به ساقه در رقم CP48 مشاهده گردید که در مقایسه با ارقام CP57 و CP69 دارای به‌ترتیب ۲۹ و ۴۰ درصد نسبت ریشه به ساقه کم‌تری بود. بنابراین جذب فسفر در رقم CP48 در شرایط فراهمی فسفر در خاک (P100) متأثر از گسترش ریشه و نسبت آن با بخش هوایی نیست و سازوکارهایی دیگری در جذب فسفر دخالت دارند.

در دومین زمان نمونه‌برداری (۹۰ روز پس از کشت)، ارقام CP57 و CP48 در تیمار P0 دارای نسبت ریشه به ساقه بزرگ‌تر معنی‌داری ($P < 0.05$) در مقایسه با رقم CP69 بودند به‌طوری‌که این پارامتر در رقم CP69 به‌ترتیب به مقدار ۳۹ و ۳۷ درصد در مقایسه با ارقام CP57 و CP48 کم‌تر بود. بیشتر بودن نسبت ریشه به ساقه در رقم CP57 می‌تواند توضیح دهنده جذب بیشتر فسفر در این رقم باشد در حالی که در خصوص رقم CP48 توضیح دهنده مقدار جذب فسفر نبود. بنابراین در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک، رقم CP57 از طریق گسترش ریشه و هماهنگی بین ریشه و بخش هوایی قادر به تأمین نیاز فسفر می‌باشد. با افزایش کود شیمیایی فسفر به خاک در تیمار P50، بیشترین نسبت ریشه به ساقه در رقم CP48 مشاهده گردید که دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به دو رقم دیگر بود. این عامل در رقم CP48 می‌تواند بخشی از بهبود جذب فسفر از خاک را در مقایسه با ارقام دیگر توضیح دهد. با افزودن ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل در تیمار P100، بیشترین نسبت ریشه به ساقه در رقم CP69 مشاهده گردید که پس از آن به ترتیب ارقام CP48 و CP57 قرار داشتند (جدول ۴). در رقم CP69 مشاهده می‌گردد که علاوه بر عدم اختلاف معنی‌دار در طول ریشه با رقم CP48 (جدول ۳)، نسبت ریشه به ساقه در این دو رقم دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) است. بنابراین با توجه به مقادیر جذب فسفر در این دو رقم، شاخص نسبت ریشه به ساقه عامل مناسبی در توضیح جذب فسفر در این دو رقم نیست و ارتباط تغییرات طول ریشه با جذب فسفر از خاک مناسب‌تر است.

در ۱۳۰ روز پس از کشت در تیمار P0، نسبت ریشه به ساقه در ارقام CP57 و CP48 دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) در مقایسه با رقم CP69 بود و نسبت ریشه به ساقه در این رقم در مقایسه با ارقام CP57 و CP48 به‌ترتیب ۵۱ و ۵۷ درصد بیش‌تر بود. با توجه به ارتباط بین نیاز بخش هوایی گیاه و توانایی ریشه در جذب فسفر از خاک، در شرایط کمبود فسفر خاک (عدم کاربرد کود فسفر (P0))، رشد بخش هوایی در رقم CP57 و تا حدودی رقم CP48 کم‌تر بود و از طرفی این دو رقم ریشه خود را گسترش داده تا از این طریق بتوانند مقدار فسفر مورد نیاز بخش هوایی گیاه را از خاک تأمین کنند و پس از آن رشد بخش هوایی نیشکر در این دو رقم بهبود یافت. در صورتی که در رقم CP69 هماهنگی میان توسعه ریشه و ساقه کم‌تر بود و در واقع نقش توسعه ریشه در این شرایط کم‌تر از دو رقم دیگر بود. در تیمار P50، نسبت ریشه به ساقه در رقم CP57 به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) از دو رقم دیگر بیشتر بود در حالی که در جذب فسفر (جدول ۲) این اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. همچنین در مقایسه نسبت ریشه به ساقه در دو رقم CP48 و CP69 با مقادیر جذب فسفر، ارتباط قابل تفسیری بین نتایج مشاهده نمی‌شود (جدول ۴). با افزایش کود فسفر در تیمار P100، بیشترین مقدار نسبت ریشه به ساقه در رقم CP69 مشاهده شد که اختلاف آن با رقم CP48 معنی‌دار نبود در حالی که اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) را با رقم CP57 نشان داد.

به‌طور کلی نتایج نشان داد که در رقم CP57 در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده خاک، گیاه قادر به توسعه ریشه و توسعه کم‌تر

بخش هوایی بود تا از این طریق بتواند فسفر مورد نیاز بخش هوایی خود را تأمین نماید. با تأمین فسفر خاک در سطوح کاربرد کود فسفر (P50 و P100)، تأثیر این سازوکار کاهش یافت. در رقم CP48، نرخ کم توسعه بخش هوایی به‌منظور تأمین فسفر از طریق توسعه ریشه در شرایط کمبود فسفر به‌عنوان سازوکار مورد استفاده گیاه نبود و این رقم با توسعه بیش‌تر ریشه قادر به تأمین فسفر مورد نیاز بخش هوایی بود. رقم CP69 از نظر نسبت ریشه به ساقه در شرایط کم‌بودن فسفر قابل استفاده خاک (سطح بدون کاربرد کود (P0)) در حد واسط دو رقم دیگر قرار دارد و به‌عنوان سازوکار مؤثر در تأمین فسفر مورد نیاز در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش سن گیاه، نسبت ریشه به ساقه در تمام رقم‌ها کاهش یافت. (Narang *et al.*, 2000) کاهش نسبت ریشه به ساقه را با اضافه کردن کود فسفر گزارش کردند. (Bhadoria *et al.*, 2004) نسبت ریشه به ساقه را برای بیان تأثیر کود فسفر بهتر از طول ریشه دانستند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در غلظت کم فسفر قابل استفاده خاک، نسبت ریشه به ساقه به‌عنوان یک سازوکار در این شرایط افزایش می‌یابد. بنابراین خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ریشه گیاهان می‌تواند جذب فسفر را تحت تأثیر قرار دهد (Föhse *et al.*, 1991).

جدول ۴. آزمون میانگین اثرات متقابل رقم‌های نیشکر و زمان نمونه‌برداری بر نسبت ریشه به ساقه (متر در گرم) در سه مقدار مختلف کود فسفر

CP48	CP69	CP57	
۴۵ روز پس از کشت			
۱۰/۸۸ ^{cd}	۱۱/۲۷ ^{cd}	۱۱/۴۱ ^{cd}	P0
۱۱/۹۸ ^{cd}	۱۳/۰۳ ^{bc}	۱۶/۴۷ ^a	P50
۹/۳۴ ^d	۱۵/۶۶ ^{ab}	۱۳/۱۴ ^{bc}	P100
۹۰ روز پس از کشت			
۸/۴۹ ^a	۵/۳۴ ^e	۸/۸۱ ^a	P0
۸/۱۳ ^a	۶/۲۴ ^{cd}	۶/۰۸ ^{cde}	P50
۶/۴۵ ^c	۷/۳۰ ^b	۵/۵۷ ^{de}	P100
۱۳۰ روز پس از کشت			
۴/۱۱ ^d	۶/۴۶ ^a	۴/۲۸ ^d	P0
۴/۳۱ ^d	۴/۰۰ ^d	۵/۲۶ ^c	P50
۶/۱۶ ^{ab}	۶/۵۸ ^a	۵/۶۱ ^{bc}	P100

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر مقدار فسفر به‌صورت جداگانه، براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) دارند. P0، P50 و P100 به ترتیب نشان‌دهنده عدم مصرف کود شیمیایی فسفر، مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل

طول ویژه ریشه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که کود فسفر، نوع رقم نیشکر و اثر متقابل آن‌ها بر طول ویژه ریشه اثر معنی‌دار ($P < 0.01$) داشتند (جدول ۱). بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها در شرایط کمبود فسفر خاک (P0) در اولین زمان نمونه‌برداری نشان داد که اگرچه طول ویژه ریشه در رقم CP48 بیش‌تر از دو رقم CP48 و CP57 بود، اما اختلاف بین ارقام مختلف از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵). عدم اختلاف معنی‌دار طول ویژه ریشه بین ارقام مورد بررسی نیز در تیمار P50 مشاهده گردید. نتایج سطح کاربرد کود P100 نشان داد که طول ویژه ریشه در رقم CP69 به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از رقم CP48 بود در حالی‌که با رقم CP57 اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین طول ویژه ریشه در رقم CP57 با ۶۵ درصد افزایش دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با رقم CP48 بود.

نتایج بررسی در ۹۰ روز پس از کشت در تیمار P0 نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار طول ویژه ریشه در رقم CP57 مشاهده می‌شود و رقم CP48 پس از آن در مرتبه بعدی قرار دارد در حالی‌که این پارامتر در رقم CP69 از دو رقم دیگر به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کم‌تر بود. بنابراین در رقم CP57 افزایش طول ویژه ریشه که نشان‌دهنده گسترش ریشه با سطح تماس بیشتر با خاک است می‌تواند در جذب بیشتر فسفر در مقایسه با ارقام دیگر مؤثر باشد در حالی‌که در خصوص رقم CP48 این اثر دیده نشد. در تیمار کود فسفر P50، بیش‌ترین طول ویژه ریشه (۲۴/۴۸ متر در گرم) در رقم CP48 مشاهده شد که پس از آن رقم CP69 با طول ویژه ریشه ۱۹/۲۲ متر در گرم قرار داشت. کم‌ترین طول ویژه ریشه در رقم CP57 مشاهده گردید که این مقدار در مقایسه با ارقام CP48 و CP69 به‌ترتیب ۳۱ و ۱۲ درصد کم‌تر بود. بنابراین رقم‌های CP48 و CP69 با افزایش مقدار فسفر قابل استفاده خاک، قادر به توسعه بیش‌تر ریشه و بنابراین استفاده بهتر از این منبع فسفر بودند. مقایسه میانگین داده‌ها در ۹۰ روز پس از کشت در تیمار P100، نشان‌دهنده بیش‌تر بودن معنی‌دار

($P < 0.05$) طول ویژه ریشه در رقم CP69 بود. به طوری که این شاخص در رقم CP69 در مقایسه با ارقام CP57 و CP48 به ترتیب دارای ۳۸ و ۵۹ درصد طول ویژه ریشه بیش تری بود. این در حالی است که اختلاف ارقام CP69 و CP57 معنی دار نبود. در ۱۳۰ روز پس از کشت، طول ویژه ریشه در رقم‌های CP57 و CP48 به مقدار بیش تری کاهش یافت در حالی که در رقم CP69 این مقدار با دومین زمان برداشت اختلاف معنی داری نداشت. به دلیل این که طول ویژه ریشه به عنوان شاخصی از گسترش و پراکندگی ریشه و در نتیجه سطح تماس بیشتر ریشه گیاه با خاک است، در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک، رقم‌های CP57 و CP48 از طریق افزایش این شاخص به عنوان یکی از سازوکارهای تأمین فسفر در شرایط کمبود، قادر به جذب فسفر مورد نیاز از خاک بودند در حالی که در رقم CP69 کاهش طول ویژه ریشه با زمان تقریباً ثابت ماند تا نیاز گیاه را تأمین نماید. در سطح کاربرد کود P50، مقدار طول ویژه ریشه در هر دو رقم CP69 و CP48 به طور معنی داری ($P < 0.05$) کمتر از رقم CP57 بود که این احتمالاً به دلیل تأمین فسفر مورد نیاز این رقم بود. در افزایش ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل، بین ارقام مورد بررسی از نظر طول ویژه ریشه اختلاف معنی داری مشاهده نشد. بر اساس این نتایج می توان گفت افزایش مقدار فسفر قابل استفاده در خاک از طریق کوددهی سبب شد که رقم CP48 به منظور تأمین فسفر، نیازی به افزایش پراکندگی ریشه در خاک و در نتیجه تماس بیش تر با ذرات خاک نداشته باشد و افزایش طول ویژه ریشه در رقم CP48 سازوکار مورد استفاده در جذب فسفر در سطح کاربرد کود P100 نبود. در خصوص رقم CP69 به ویژه در ابتدای دوره رشد این موضوع برعکس بود و در این رقم به منظور جذب فسفر از خاک، مقدار طول ویژه ریشه بیش تر بود. سازوکار مورد استفاده در رقم CP57 نیز مشابه رقم CP48 می باشد. (Richardson *et al.*, (2009) طول ویژه ریشه زیاد را یکی از خصوصیات ریشه‌ای گیاه که توانایی آن را برای جذب فسفر افزایش می دهد، معرفی کردند. نتایج مطالعه (Zambrosi *et al.*, (2015) نیز نشان دهنده طول ویژه ریشه گیاه نیشکر در شرایط کمبود فسفر در مقایسه با استفاده از کود فسفر بود.

جدول ۵. آزمون میانگین اثرات متقابل رقم‌های نیشکر و زمان نمونه برداری بر طول ویژه ریشه (متر در گرم) در سه مقدار مختلف کود فسفر

CP48	CP69	CP57	
۴۵ روز پس از کشت			
۳۹/۳۱ ^{b-e}	۳۶/۸۰ ^{de}	۳۷/۳۳ ^{cde}	P0
۴۷/۷۱ ^{bcd}	۴۶/۶۸ ^{bcd}	۴۸/۳۱ ^{abc}	P50
۳۰/۱۹ ^e	۵۹/۲۷ ^a	۴۹/۷۰ ^{ab}	P100
۹۰ روز پس از کشت			
۲۰/۳۱ ^{bc}	۱۶/۱۱ ^{de}	۲۲/۰۰ ^b	P0
۲۴/۴۸ ^a	۱۹/۲۲ ^c	۱۶/۹۲ ^d	P50
۱۵/۰۷ ^e	۲۳/۹۲ ^a	۱۷/۳۳ ^d	P100
۱۳۰ روز پس از کشت			
۱۱/۷۱ ^{def}	۱۵/۵۴ ^{ab}	۱۰/۷۹ ^f	P0
۱۱/۳۶ ^{ef}	۱۳/۰۶ ^{cd}	۱۶/۵۹ ^a	P50
۱۴/۲۰ ^{bc}	۱۲/۸۵ ^{cde}	۱۳/۵۷ ^c	P100

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر مقدار فسفر به صورت جداگانه، بر اساس آزمون توکی اختلاف معنی داری ($P < 0.05$) دارند. P0، P50 و P100 به ترتیب نشان دهنده عدم مصرف کود شیمیایی فسفر، مصرف ۱۲۵ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل

جریان به درون (اینفلاکس) فسفر

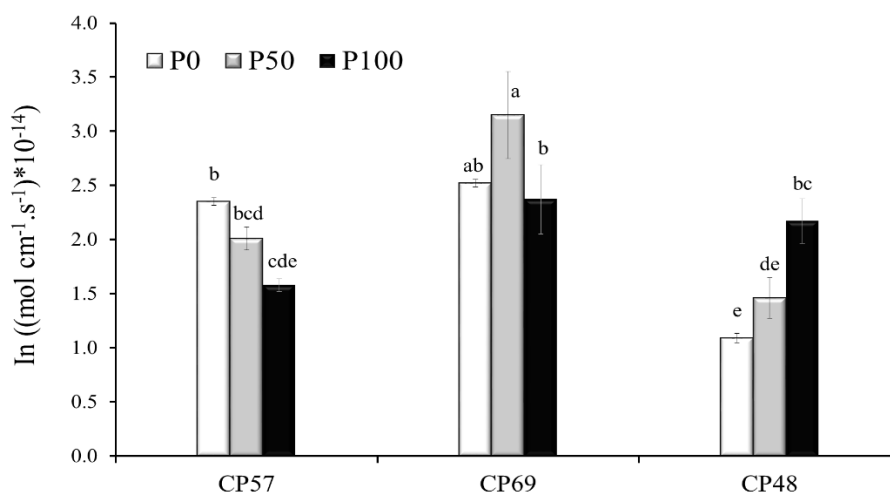
مطابق با نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۶)، در هر دو دوره زمانی اول و دوم، اثر اصلی کود فسفر بر اینفلاکس فسفر معنی دار نبود در حالی که اثرات ارقام نیشکر و اثر متقابل فسفر و رقم معنی داری ($P < 0.01$) بود.

جدول ۶. تجزیه واریانس میانگین مربعات تیمارهای کود فسفر، رقم نیشکر و اثرات متقابل آنها بر اینفلاکس فسفر

منبع تغییرات	درجه آزادی	۹۰-۱۳۰ روز پس از کشت	۴۵-۹۰ روز پس از کشت
فسفر	۲	۰/۱ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}
رقم	۲	۱/۷۸ ^{**}	۲/۸۱ ^{**}
فسفر × رقم	۴	۰/۵۵ ^{**}	۰/۸۸ ^{**}
خطا	۱۸	۰/۰۵	۰/۰۶

ns: غیر معنی دار، *: معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد، **: معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

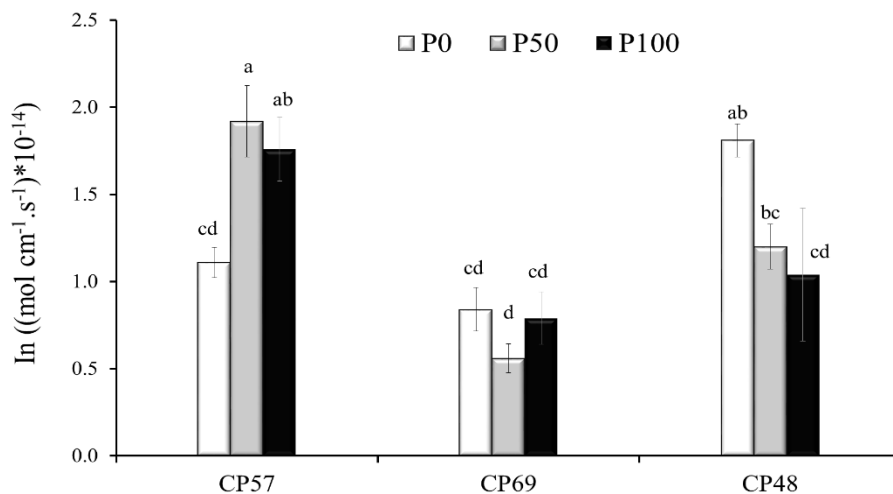
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در شرایط بدون کاربرد کود فسفر (P0) نشان داد در اولین دوره اندازه‌گیری (T45-T90)، اینفلاکس فسفر در رقم CP69 دارای بیش‌ترین مقدار بود، اگرچه اختلاف معنی‌داری با رقم CP57 نشان نداد (شکل ۱). در این دوره، کم‌ترین مقدار اینفلاکس فسفر در رقم CP48 مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با دو رقم دیگر داشت. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط کم بودن فسفر قابل استفاده در خاک در ابتدای دوره رشد نیشکر، اینفلاکس فسفر سازوکار مؤثر در جذب فسفر در رقم‌های CP57 و CP69 می‌باشد، در حالی که نقش اینفلاکس فسفر در رقم CP48 کم‌تر است و سازوکار مؤثر در این رقم، افزایش طول ریشه و دسترسی به منابع بیشتر فسفر در خاک است. در سطح کاربرد کود فسفر P50 نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار اینفلاکس فسفر مربوط به رقم CP69 بود به طوری که دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با دو رقم دیگر بود. بنابراین در شرایط تأمین بخشی از فسفر قابل استفاده در خاک از طریق کوددهی در سطح کاربرد کود P50، اینفلاکس فسفر دارای نقش مؤثری در ابتدای دوره رشد در تأمین فسفر مورد نیاز رقم CP69 بود. از نظر مقدار اینفلاکس، رقم‌های CP57 و CP48 به ترتیب در رده بعدی اهمیت قرار داشتند. لذا در تأمین فسفر گیاه در اوایل دوره زندگی گیاه، نقش اینفلاکس فسفر در رقم CP57 متوسط و در رقم CP48 ناچیز بود و جذب فسفر در رقم CP48 در این مرحله بیش‌تر متأثر از طول ریشه گیاه بود. در تیمار فسفر P100، بیش‌ترین مقدار اینفلاکس در رقم CP69 مشاهده شد به طوری که اختلاف معنی‌داری با رقم CP48 نشان نداد در حالی که دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با رقم CP57 بود. نتایج نشان داد که در رقم CP57، بیش‌ترین مقدار اینفلاکس فسفر در شرایط کمبود فسفر در خاک وجود داشت و با افزایش کود فسفر به خاک و تأمین فسفر قابل استفاده، اینفلاکس کاهش یافت. در حالی که در رقم CP48 روند تغییرات برعکس بود به طوری که بیش‌ترین مقدار اینفلاکس فسفر در تیمار P100 و کمترین مقدار در تیمار P0 مشاهده گردید.



شکل ۱. مقایسه اینفلاکس فسفر در ارقام مختلف در تیمارهای کوددهی فسفر در دوره زمانی ۹۰-۴۵ روز پس از کشت میانگین‌های دارای حروف متفاوت، براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) دارند.

با افزایش سن گیاه در دومین دوره اندازه‌گیری (T90-T130)، مقادیر اینفلاکس فسفر به ریشه نیشکر در تیمار P0 در ارقام CP57 و CP69 به شدت کاهش یافت به طوری که بیش‌ترین کاهش در رقم CP69 مشاهده شد (شکل ۲). مقدار اینفلاکس فسفر در این دوره اندازه‌گیری در رقم CP48 اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) با دو رقم دیگر داشت و علاوه بر عدم مشاهده کاهش در مقدار آن، در مقایسه با دوره نخست اندازه‌گیری نیز افزایش نشان داده بود. با ادامه رشد گیاه در شرایط کمبود فسفر در خاک، نقش اینفلاکس در جذب فسفر در ارقام CP57 و CP69 کاهش یافت، در حالی که در رقم CP48 اینفلاکس فسفر به درون ریشه در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده خاک، دارای نقش مؤثری در جذب و تأمین فسفر این رقم بود. بررسی مقادیر جذب فسفر نیشکر (جدول ۲) در تیمار کودی P0، نشان می‌دهد که اینفلاکس تأثیر بیش‌تری در تغییرات جذب فسفر در ارقام مختلف نیشکر داشته است. به طوری که جذب فسفر در رقم CP48 تا زمان ۹۰ روز پس از کشت به دلیل کم‌تر بودن اینفلاکس فسفر در این رقم، کم‌تر از دو رقم دیگر بود، در صورتی که با افزایش مقدار اینفلاکس در دوره دوم اندازه‌گیری، مقدار جذب فسفر این رقم به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از ارقام CP57 و CP69 شد. در خصوص ارقام CP57 و CP69، تأثیر اینفلاکس با افزایش سن گیاه کاهش یافت و بویژه در رقم CP69 مقدار جذب، بیش‌تر وابسته به تغییرات

مورفولوژیکی ریشه گیاه بود. بنابراین می‌توان گفت سازوکار جذب در ارقام نیشکر در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده در خاک با تغییر سن گیاه، تغییر می‌کند. در تیمار P50، مقدار اینفلاکس فسفر در رقم CP69 با ۸۲ درصد کاهش در مقایسه با دوره اول، دارای کاهش معنی‌داری ($P < 0.05$) بود و کم‌ترین مقدار اینفلاکس را در بین ارقام مورد بررسی نشان داد. این در حالی است که ارقام CP57 و CP48 در شرایط استفاده از ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل کاهش معنی‌داری را در مقایسه با دوره اول اندازه‌گیری نشان ندادند و رقم CP57 دارای بیش‌ترین مقدار اینفلاکس در دوره دوم اندازه‌گیری بود. بنابراین در تیمار فسفر P50، اینفلاکس فسفر سازوکار مؤثر جذب فسفر در اوایل دوره رشد نیشکر در رقم CP69 بود، در حالی که با ادامه رشد گیاه، تأثیر اینفلاکس فسفر در تأمین فسفر گیاه کاهش معنی‌داری ($P < 0.05$) داشت. برخلاف رقم CP69، مقدار اینفلاکس فسفر در سطح کاربرد کود P50 در ارقام CP57 و CP48 تغییر معنی‌داری را با دوره اول اندازه‌گیری نشان نداد و بنابراین یکی از سازوکارهای تأمین فسفر گیاه در این دوره بود.



شکل ۲. مقایسه اینفلاکس فسفر در ارقام مختلف در تیمارهای کوددهی فسفر در دوره زمانی ۱۳۰-۹۰ روز پس از کشت میانگین‌های دارای حروف متفاوت، براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) دارند.

در دومین دوره اندازه‌گیری در شرایط استفاده از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل، بیش‌ترین کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) در مقایسه با دوره نخست در اینفلاکس فسفر با ۶۷ و ۵۲ درصد افت به‌ترتیب در ارقام CP69 و CP48 مشاهده گردید. بنابراین در این دو رقم با افزایش سطح فسفر قابل استفاده خاک، با افزایش دوره رشد گیاه سازوکار اینفلاکس نقش کم‌تری در تأمین فسفر گیاه ایفا می‌کند، در حالی که در رقم CP57 مقدار اینفلاکس، افزایش نشان داد. بنابراین با تغییر مقدار فسفر قابل استفاده خاک و افزایش سن گیاه، ارقام مورد بررسی نیشکر سازوکارهای متفاوتی را در جذب فسفر نشان می‌دهند. به طور کلی در دومین دوره اندازه‌گیری، اینفلاکس فسفر در رقم CP57 با افزایش کود فسفر، افزایش می‌یابد در حالی که در رقم CP48 مقدار اینفلاکس از P0 تا P100 به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کاهش می‌یابد و در رقم CP69 مقدار آن با کوددهی فسفر اختلاف معنی‌داری ندارد. (Bhadoria et al., 2001) در مقایسه کارایی جذب فسفر بادام زمینی و ذرت بیان کردند که بادام زمینی در مراحل اولیه رشد کارایی فسفر زیادی داشت که به علت اینفلاکس زیاد این گیاه بود، در حالی که با ادامه رشد، اینفلاکس کاهش یافت و سبب کاهش کارایی فسفر گردید. از طرف دیگر، ذرت در ابتدای فصل رشد دارای اینفلاکس فسفر کم و رشد ضعیفی بود در صورتی که در میانه رشد اینفلاکس فسفر افزایش یافته و جذب فسفر به مقداری برای رشد حداکثر رسید. (Safirzadeh et al., 2019) نتیجه گرفتند که در رقم CP57-614 نیشکر، مقدار اینفلاکس فسفر در شرایط کمبود فسفر قابل استفاده خاک با افزایش سن گیاه به مقدار ۸۵ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش مقدار فسفر قابل استفاده در خاک، مقدار اینفلاکس فسفر افزایش نشان داد و با افزایش سن گیاه نیز مقدار کاهش اینفلاکس در مقایسه با شرایط کمبود فسفر کم‌تر بود.

نتیجه‌گیری

بررسی کارایی جذب فسفر در سه رقم تجاری نیشکر تا ۱۳۰ روز پس از کشت نشان داد که در شرایط کم بودن فسفر قابل دسترس در خاک، ارقام CP48 و CP57 توانایی بالایی در جذب فسفر از خاک داشتند در حالی که رقم CP69 توانایی کم‌تری در جذب فسفر داشت.

بنابراین ارقام CP48 و CP57 دارای کارایی جذب مناسبی هستند و یا ارقامی فسفرکارا می‌باشند در حالی که رقم CP69 فسفر ناکارا است. در این مطالعه پارامترهای مورفولوژیکی ریشه و اینفلاکس فسفر به درون ریشه گیاه به عنوان شاخص‌هایی در ارزیابی کارایی جذب فسفر ارقام تجاری نیشکر مورد استفاده قرار گرفتند. سازوکار مؤثر در رقم CP48 در ابتدای رشد، طول ریشه بود و با ادامه رشد، اینفلاکس فسفر نقش مهم‌تری را نشان داد در حالی که در رقم CP57 طول ریشه و اینفلاکس فسفر هر دو مؤثر بودند. طول ریشه کم‌تر در رقم CP69 دلیل جذب کم‌تر فسفر در این رقم بود. با افزایش کاربرد کود شیمیایی فسفر به خاک، مقدار جذب فسفر در رقم CP69 افزایش یافت که متأثر از طول ریشه، طول ویژه ریشه و اینفلاکس بیش‌تر در اوایل رشد می‌باشد. بنابراین رقم CP69 نیشکر در شرایط کمبود فسفر یک رقم فسفر ناکارا و در شرایط کوددهی، رقمی کودپذیر است. در حالی که اینفلاکس سازوکار مؤثر در جذب فسفر در رقم CP57 در شرایط کوددهی بود. بنابراین متفاوت بودن رفتار ارقام مختلف نیشکر در جذب فسفر و سازوکارهای مؤثر بر آن می‌تواند به‌عنوان راهنمایی در بهبود مدیریت مصرف کود فسفر و مصرف هدفمند کود بویژه در مزارع سن راتون نیشکر در استان خوزستان مورد استفاده قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

خراسانی، رضا (۱۳۸۹). کارایی جذب فسفر در ذرت، چغندرقد و بادام زمینی. *تشریح آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۴(۱)، صفحه ۱۸۸-۱۸۰.

REFERENCES

- Bhadoria, P. B. S., Singh, S., & Claassen, N. (2001). Phosphorus efficiency of wheat, maize and groundnut grown in low phosphorus-supplying soil. *Plant nutrition—Food security and sustainability of agro-ecosystems*, 92, 530-531.
- Bhadoria, R. S., Steingrobe, B., Claassen, N., & Liebersbach, H. (2002). Phosphorus efficiency of wheat and sugar beet seedlings grown in soils with mainly calcium, or iron and aluminium phosphate. *Plant and Soil*, 246, 41-52.
- Bhadoria, P. S., El Dessougi, H., Liebersbach, H., & Claassen, N. (2004). Phosphorus uptake kinetics, size of root system and growth of maize and groundnut in solution culture. *Plant and Soil*, 262, 327-336.
- Bouyoucos, G. J. (1961). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.
- Fageria, N. K., & Stone, L. F. (2006). Physical, chemical and biological changes in the rhizosphere and nutrient availability. *Journal of Plant Nutrition*, 29, 1327-1356.
- Fernández, L. A., Zalba, P., Gómez, M. A., & Sagardoy, M. A. (2007). Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 43, 805-809.
- Föhse, D., Claassen, N., & Jungk, A. (1991). Phosphorus efficiency of plants, II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil*, 132, 261-272.
- Gahoonia, T. S., Asmar, F., Giese, H., Gissel-Nielsen, G., & Nielsen, N. E. (2000). Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments. *European Journal of Agronomy*, 12, 281-289.
- Gopaldasundaram, P., Bhaskaran, A., & Rakkiyappan, P. (2012). Integrated Nutrient Management in Sugarcane. *Sugar Tech*, 14(1), 3-20.
- Hariprasad, P., & Niranjana, S. R. (2009). Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato. *Plant and Soil*, 316, 13-24.
- Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D. L.. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA. 551-574.
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237, 173-195.
- Khorassani, R. (2010). Phosphorus uptake efficiency in corn, sugar beet and groundnut. *Journal of water and soil*, 24(1), 180-188. (In Persian)
- Loeppert, H. L., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D. L.. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA. 437-474.



- Mareni, R., Nyathi, C., Madanzi, T., Masaka, J., Manjeru, C., & Manjeru, P. (2013). The effect of phosphorus fertilizer application rates on root biomass characteristics of irrigated sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Midlands State University Journal of Science, Agriculture and Technology*, 4(1), 108-124.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T. S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D. S., Wearing, C., Zhang, H., & Haygarth, P. M. (2017). Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant and Soil*, 427, 5-16.
- Miller, R. O. (1998). Determination of dry matter content of plant tissue: gravimetric moisture. *Handbook of Methods for Plant Analysis*. CRC Press.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemical Acta*, 27, 31-36.
- Narang, R. A., Bruene, A., & Altmann, T. (2000). Analysis of phosphate acquisition efficiency in different arabidopsis accessions. *Plant Physiology*, 124, 1786-1799.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D. L.. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA. 961-1010.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, E. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *United States Department of Agriculture Circular*, 939, 1-18.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D. L.. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 305-339.
- Safirzadeh, S., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2019). Effect of phosphate solubilising bacteria (*Enterobacter cloacae*) on phosphorus uptake efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Soil Research*, 5, 333-341.
- Shujie, M., & Yunfa, Q. (2011). Effects of phosphorus concentration on adaptive mechanisms of high- and low-P efficiency soybean genotypes when grown in solution. *Plant Soil Environment*, 57(2), 61-66.
- Singh, O., Gupta, M., Mittal, V., Kiran, S., Nayyar, H., Gulati, A., & Tewari, R. (2013). Novel phosphate solubilizing bacteria 'Pantoea cypripedii PS1' along with *Enterobacter aerogenes* PS16 and *Rhizobium ciceri* enhance the growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant Growth Regulation*, 73, 79-89.
- Sundara, B. (1994). Phosphorus efficiency of sugarcane varieties in a tropical alfisol. *Fertilizer Research*, 39, 83-88.
- Tennant, D. (1975). A test of a modified line intercepts method of estimating root length. *Journal of Ecology*, 63, 995-1001.
- Zambrosi, F. C. B., Ribeiro, R. V., Ribeiro Marchiori, P. E., Cantarella, H., & Landell, M. G. A. (2015). Sugarcane performance under phosphorus deficiency: physiological responses and genotypic variation. *Plant and Soil*, 386, 273-283.
- Zhang, F. S., Cui, Z. L., Chen, X. P., Ju, X. T., Shen, J. B., Chen, Q., & Fan, M. S. (2012). Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China. In *Advances in agronomy*. edited by Sparks, D. L. San Diego, CA: Academic Press. 1-40.
- Yi, K., Li, X., Chen, D., Yang, S., Liu, Y., Tang, X., Ling, G., & Zhao, Z. (2022). Shallower root spatial distribution induced by phosphorus deficiency contributes to topsoil foraging and low phosphorus adaptation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 3417.
- Liu, D. (2021). Root developmental responses to phosphorus nutrition. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(6), 1065-1090.
- Cong, W. F., Suriyagoda, L. D., & Lambers, H. (2020). Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes. *Trends in Plant Science*, 25(10), 967-975.
- Zhou, W., Chen, D., Zeng, Q., Tahir, M. A., Wu, Q., Huang, Y., Jiang, Y., Li, Q., Ao, J., & Huang, Z. (2021). Differential physiological behavior of sugarcane genotypes in response to sparingly soluble phosphorus-sources. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(2), 187-197.
- Wissuwa, M., Gonzalez, D., & Watts-Williams, S. J. (2020). The contribution of plant traits and soil microbes to phosphorus uptake from low-phosphorus soil in upland rice varieties. *Plant and Soil*, 448, 523-537.
- Wang, X., Wang, Z., Zheng, Z., Dong, J., Song, L., Sui, L., Nussaume, L., Desnos, T., & Liu, D. (2019). Genetic dissection of Fe-dependent signaling in root developmental responses to phosphate deficiency.

Plant physiology, 179(1), 300-316.

Zambrosi, F. C. B. (2021). Phosphorus fertilizer reapplication on sugarcane ratoon: opportunities and challenges for improvements in nutrient efficiency. *Sugar Tech*, 23(3), 704-708.

Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 612, 522-537.



Comparison of phosphorus uptake efficiency and effective mechanisms in commercial varieties of sugarcane

EXTENDED ABSTRACT

Background:

A great proportion of phosphorus (P) is in sparingly soluble and insoluble forms and small portion of P is accessible for crops in the form of available P ion in the soil solution. Low mobility of P in the soil is resulted from high reactivity of P with soil components, which causes strong retention of P. One of the strategies of using low-soluble and insoluble P components in the soil is selection and cultivation of plants and varieties with high P uptake efficiency. Knowledge about P uptake efficiency plays an important role in the management of P fertilizer consumption.

Goals:

According to the necessity of P uptake efficiency knowledge, a pot experiment was carried out in greenhouse condition in Hakim Farabi Agro-Industry CO. that follows objectives including (1) to compare the P uptake efficiency in commercial sugarcane varieties, (2) to investigate the P uptake behavior in commercial sugarcane varieties under different levels of P fertilizer application, and (3) to evaluate the effective mechanisms on P uptake efficiency in commercial sugarcane varieties.

Materials and Methods:

The treatments were P fertilizer (including: blank (P0), 125 (P50) and 250 (P100) kg ha⁻¹ as triple superphosphate) and varieties of sugarcane (including: CP57-614, CP69-1062 and CP48-103) in three sampling times (including: 45, 90 and 130 days after planting) with three replications in factorial based on completely randomized design. Two single-bud sets of sugarcane (from each variety) were planted and then thinned to one plant per pot after 14 days. During growing period, soil moisture content was maintained at around 70% of field capacity (FC). At each sampling time, whole aboveground parts of sugarcane were harvested and the pots were completely emptied in order root sampling. In this study, P uptake, root length, specific root length, root to shoot ratio and P influx were evaluated at each sampling time.

Results and Discussion:

In low available P condition, the CP48 and the CP57 varieties able to uptake more P and then considered as efficient P varieties. In CP48 variety, P uptake was increased by 13% and 45% compared to CP57 and CP69 varieties respectively, and CP57 showed enhancement of P uptake up to 29% compared to CP69 variety. Phosphorus influx decreased in CP57 and CP69 varieties by 53% and 67% respectively with aging of sugarcane that the greatest decrease of P influx was observed in CP69 variety. In the CP48 variety, P influx increased up to 66%, which can be an effective factor in more P uptake. While the CP69 variety showed a lower efficiency to uptake P. By the second sampling time, the root length and specific root length were greater in CP48 and CP57 varieties compared to CP69, and were considered as reasons for the higher P uptake in the first two varieties. In limited available P condition, exception the CP48 variety, P influx was diminished over time and it was greatest in the CP69 variety. Results showed that P uptake in CP69 was depended to the root length and the influx had lower importance. Therefore, influx was the main mechanism of P uptake in the CP48 variety. In the CP57 variety, both root length and influx were effective in P uptake. Phosphorus uptake in the CP69 variety enhanced when P fertilizer increased. In this condition, influx was effective mechanism on p uptake in the CP57. This indicated that the CP69 variety was suitable for fertilization. Therefore, these differences in the ability of P uptake in sugarcane varieties and mechanisms affecting P uptake can improve the management of P fertilizer consumption.

As a result, the CP48 variety has high efficiency in P uptake, the CP57 variety has a moderate efficient in P uptake and the CP69 variety does not have any efficient in P uptake.

Keywords: Efficient Phosphorus, Phosphorus Influx, Root Length ,Sugarcane ,Uptake Efficiency.