جمهوری اسلامی ایران

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

مدیریت مصرف فسفر به شیوه کودآبیاری در خاک‌های آهکی

نگارندگان

پیمان کشاورز، عضو هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی

فرهاد مشیری، عضو هیات علمی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

نشریه فنی: 633

1402

مشخصات اثر

عنوان: مدیریت مصرف فسفر به شیوه کود آبیاری در خاک‌های آهکی

نگارندگان: پیمان کشاورز و فرهاد مشیری

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

کارشناس انتشارات: سمانه پورمنصور

ویراستار ادبی: زهرا محمدی

طراح جلد: راضیه محمدی

سال انتشار: 1402

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این اثر با شماره 64578 در تاریخ 1402/9/25 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین‌دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

کد پستی: 3177993545 **صندوق پستی:** 311-31785

نمابر : 02636210121 **تلفن:** 36201900- 026

وب‌سایت: http://www.swri.ir **پست الکترونیکی:** info@swri.ir

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

1-مقدمه 1
1-1- مقدار برداشت فسفر توسط گیاه و کارایی مصرف 2
2- عوامل موثر درتثبیت فسفر خاک 3
2-1- pH خاک و کربنات کلسیم (آهک) 3
2-2- نوع و مقدار رس 4
2-3- زمان واکنش 4
2-4- دما 5
2-5- مواد آلی 5
2-6- وضعیت فسفر خاک.....6
3- حرکت فسفر در خاک و فراهمی آن برای ریشه.....7
3-1- پخشیدگی 7
3-2- جریان توده‌ای.....7
3-3- رهگیری ریشه.....8
4- روش‌های مصرف کودهای فسفری 8
4-1- پخش سطحی 9
4-2- نواری.....10
4-3- کودآبیاری 12
4-4- محلول‌پاشی 17
5- نتیجه‌گیری 18
6- منابع مورد استفاده.....21

1- مقدمه

فسفر به عنوان یک عنصر غذایی کلیدی نقش مهمی در فرآیندهای بیوشیمیایی، سازوکارهای انتقال انرژی و ساختمان ترکیبات انرژی‌زای گیاهان برعهده دارد. این در حالی است که در خاک‌های آهکی بخش قابل ملاحظه‌ای از فسفر هنگام مصرف به شکل ترکیب‌های نامحلول در خاک تثبیت (نگهداری) می‌شود. به طورکلی دسترسی گیاه به فسفر به چند دلیل کاهش می‌یابد: 1- رسوب فسفر در محلول خاک،2- تثبیت یا جذب سطحی فسفر محلول توسط ذرات خاک و 3- کاهش رشد ریشه که باعث می‌شود سطح تماس ریشه‌ها با فسفر موجود در خاک کاهش‌یافته و مقدار کمتری جذب شود. به همین دلیل مقدار فسفری که به شیوه متداول پخش سطحی پیش از کشت به خاک اضافه می‌شود بسیار بیشتر از نیاز واقعی گیاه است تا فسفر کافی را در طول دوره رشد تامین نماید. این شرایط موجب می‌شود تا کارایی مصرف فسفر به شدت کاهش یابد. تامین فسفر مورد نیاز گیاه در مقدار کافی به خودی خود یک چالش بزرگ است چراکه حفظ فسفر قابل جذب خاک، به کنترل میزان تثبیت فسفری که به صورت کود به خاک اضافه شده بستگی دارد. در حالی‌که مقدار فسفر قابل جذب در 72 درصد از خاک‌های کشاورزی کشور کمتر از حد بحرانی گزارش شده است (شهبازی و بشارتی، 1392)، مصرف نکردن فسفر پیش از کاشت در محصولات زراعی مهم مانند گندم، جو و کلزا توسط بخش بزرگی از کشاورزان کشور مشکل مضاعفی را بوجود آورده است. از این‌رو یافتن راه‌های کارآمدتر، قابل اطمینان‌تر و پایدارتر برای بهبود کارایی جذب فسفر اهمیت حیاتی دارد. در حال حاضر در دنیا یک فلسفه جدید با شعار"تغذیه محصول، نه خاک" در رابطه با مصرف فسفر در محصولات زراعی پیشنهاد و دنبال می‌شود و در این رابطه پیشرفت‌های قابل توجهی هم حاصل شده است. یکی از این اصول، مصرف سرک فسفر به شیوه کودآبیاری است. یافته‌های جدید نشان می‌دهد تقسیط فسفر به شیوه کودآبیاری در طول فصل رشد یک راهبرد مهم کوددهی در خاک‌های آهکی محسوب شده و برتری بالقوه‌ای به دنبال دارد. از جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: 1) افزایش جذب فسفر: امکان دسترسی پایدار فسفر در طول مراحل رشد به ویژه در دوره‌های بحرانی که تقاضای گیاه برای جذب این عنصر زیاد است را فراهم کرده و رشد

و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد؛ 2) کمینه کردن هدر رفت: فسفر در شرایط خاص خاکی، مانند pH زیاد یا وجود کلسیم و یا آهن، مستعد تثبیت است. این در حالی است که مصرف تقسیط شده فسفر به کاهش تثبیت آن کمک کرده و کارایی جذب را افزایش می‌دهد و 3) تنظیم مقدار مصرف: در این روش گیاهان مقدار مورد نیاز فسفر را بر اساس پاسخ گیاه دریافت کرده و از مصرف بیش از اندازه کود جلوگیری به عمل می‌آید. توجه به این نکته مهم است که استفاده از این شیوه ممکن است بسته به نوع محصول، شرایط خاک و شیوه‌های کشاورزی متفاوت باشد. از این‌رو نشریه حاضر به بررسی موضوع مصرف فسفر به صورت سرک در طول دوره رشد گیاه می‌پردازد.

1-1- مقدار برداشت فسفر توسط گیاه و کارایی مصرف

مقدار برداشت فسفر از خاک توسط گیاهان بسیار کمتر از نیتروژن و پتاسیم است (نزدیک به 10درصد). برای نمونه گندم به ازای تولید هر تن دانه حدود 5 کیلوگرم در هکتار فسفر از خاک برداشت می‌کند. از سوی دیگر میانگین عملکرد گندم آبی در کشور حدود 4/2 تن در هکتار است. از این رو به طور میانگین مقدار برداشت فسفر از خاک برای میانگین عملکرد گندم کشور حدود 21 کیلوگرم فسفر خالص در هکتار است. با وجود این مقدار برداشت فسفر توسط گیاه نمی‌تواند به تنهایی تعیین‌کننده مقدار کود مورد نیاز آن باشد. برای نمونه پیاز برای حداکثر رشد خود حدود سه برابر گندم به فسفر نیاز دارد. این موضوع ناشی از نیاز بیشتر پیاز به فسفر نسبت به گندم نیست بلکه به شاخص نسبت ریشه به اندام هوایی و مقدار جذب فسفر در واحد ریشه (influx) بستگی دارد. در گیاهانی مانند پیاز، گوجه فرنگی و لوبیا کارایی کم فسفر ناشی از مقدار کم جذب فسفر در واحد ریشه و نسبت کم ریشه به اندام هوایی است. در مقابل کارایی فسفر در گیاهانی مانند کلزا و اسفناج به دلیل مقدار جذب بالای فسفر در واحد ریشه و در گونه‌هایی مانند گندم و چاودار به دلیل نسبت بیشتر ریشه به اندام هوایی، بیشتر است (Fohse et al., 1988). از سویی بررسی‌های انجام شده در کشور نشان می‌دهد که کارایی فسفر بسیار کم است. برای نمونه گزارش شده است که میانگین کارایی بازیابی ظاهری فسفر در مزارع گندم و گوجه فرنگی استان خراسان رضوی به ترتیب 4/6 و 5/9 درصد است (کشاورز، 1394). این در حالی است که در آسیا

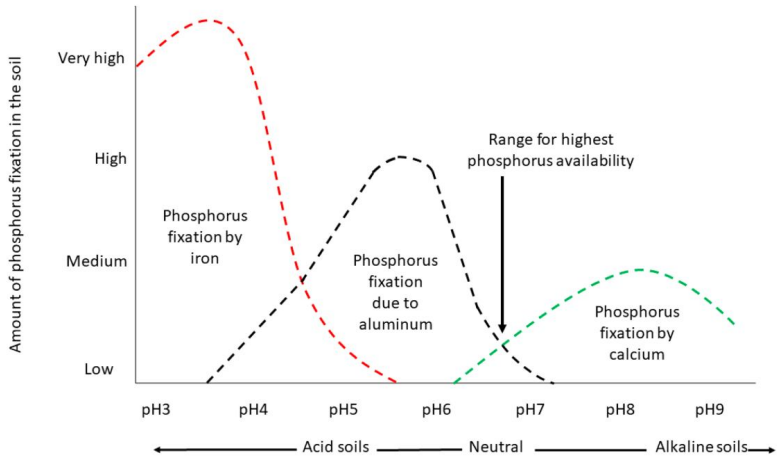
کارایی بازیابی ظاهری فسفر در سه محصول مهم گندم، ذرت و برنج با میانگینی در حدود 22 تا 27 درصد گزارش شده است (دوبرمن، 2007).

2- عوامل موثر درتثبیت فسفر خاک

فسفر در خاک به دو شکل معدنی و آلی وجود دارد اما شکل غالب آن در خاک‌ها معدنی بوده و به صورت ارتو فسفات‌ها ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}) نامحلول یافت می‌شود. به‌شکل معمول فسفر پس از مصرف به سرعت و در عرض چند ساعت به ترکیبات با قابلیت استفاده کمتر تبدیل می‌شود (Jalali and Ranjbar, 2010; Ahmad et al., 2018). بررسی نشان می‌دهد که 70 تا 90 درصد از فسفر بکار رفته در خاک به شکل غیرقابل دسترس تبدیل می‌شود (Sharpley et al., 2015; Menezes-Blackburn et al., 2018). تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی بواسطه مجموعه‌ای از واکنش‌های متفاوت اتفاق می‌افتد. به دلیل اهمیت تثبیت فسفر در خاک‌ها و اثر آن بر کارایی کودهای فسفاتی این عوامل به کوتاه شرح می‌شوند.

2-1- pH خاک و کربنات کلسیم (آهک)

pH مهمترین ویژگی خاک است که بر جذب، رسوب، حلالیت و در دسترس بودن عناصر غذایی تأثیر می‌گذارد. (Basta et al., 2005) افزایش pH خاک به تشکیل ترکیبات فسفری با حلالیت کمتر منجر می‌شود. خاک‌های آهکی دارای مقادیر pH خاک زیادی بوده و از این‌رو قابلیت دسترسی فسفر در چنین خاک‌هایی کم است. در بیشتر خاک‌ها قابلیت جذب فسفر در محدوده pH بین 6 تا 7 حداکثر است (شکل 1). بالا بودن pH خاک در حضور یون‌های کلسیم و منیزیم موجب تشکیل املاح نامحلول فسفر می‌شود. در خاک‌های آهکی رسوب فسفر بیشتر توسط ترکیبات کلسیمی خاک صورت می‌گیرد. این‌گونه خاک‌ها دارای منابع فراوان کلسیم قابل تبادل و کربنات کلسیم هستند. حلالیت ارتوفسفات‌های کلسیم به ترتیب مونو- دی- و تری کلسیم فسفات کاهش می‌یابد. ترکیبات فسفر محلول، قابل ترکیب با یون‌های کلسیم و همچنین کربنات‌های کلسیم هستند.



شکل 1- قابلیت استفاده فسفر تحت تاثیر pH خاک

2-2- نوع و مقدار رس

فسفر در خاک‌هایی که رس کائولینیتی (1:1) زیادی دارند (مانند خاک‌های مناطق گرم و پرباران) در مقایسه با خاک‌های دارای رس مونت موریلونیت (2:1) به میزان بیشتری تثبیت می‌شود. از سویی با بیشتر شدن مقدار رس نیز گنجایش تثبیت فسفر در خاک افزایش می‌یابد. از این‌رو فسفر در خاک‌هایی با بافت سنگین نسبت به خاک‌هایی با بافت سبک به میزان بیشتری تثبیت و از دسترس گیاه خارج می‌شود.

2-3- زمان واکنش

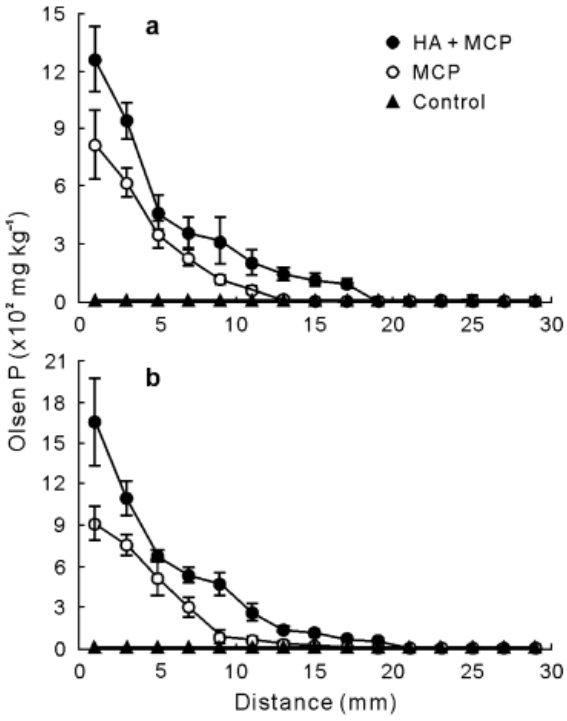
هرچه زمان تماس خاک با فسفر افزوده شده به صورت کود بیشتر باشد مقدار تثبیت نیز بیشتر است. از این‌رو بلافاصله پس از زمان مصرف فسفر در خاک، گیاه بیشترین توانایی را برای بهره‌وری از فسفر دارد. در خاک‌هایی که گنجایش تثبیت‌کنندگی فسفر آن زیاد است (خاک سنگین، وجود آهک و pH بالا) این زمان کوتاه خواهد بود. از این‌رو این دوره زمانی تعیین می‌کند که آیا کود فسفری باید یکبار در مدت رشد گیاه بکار رود یا در مقادیر کمتر اما به دفعات بیشتر استفاده شود. البته در این رابطه شیوه مصرف کود نیز بسیار مهم است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

2-4- دما

به‌شکل معمول در دمای کم خاک، رشد ریشه، حرکت فسفر در خاک و جذب این عنصر توسط گیاه کاهش می‌یابد. براین اساس اگرچه حرکت فسفر به سمت ریشه گیاه در دمای کم خاک محدود می‌شود (Barber, 1988) اما آزمایش‌ها در ذرت نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط ریشه (18 به 25 درجه سانتی‌گراد) سرعت رشد ریشه 4/97 برابر افزایش یافته است (Mackay and Barber, 1984). از این‌رو به نظر می‌رسد دلیل اصلی کاهش جذب فسفر در دمای پایین خاک (کمتر از 25 درجه سانتی‌گراد)، کم شدن سرعت رشد ریشه است. در دمای زیاد، افزایش رشد ریشه موجب می‌شود تا دسترسی ریشه به حجم بیشتری از خاک برای جذب فسفر فراهم شود (Fohse, et al., 1988). این در حالی است که در دمای کم خاک پارامترهایی که در حرکت فسفر در خاک و جذب فسفر در سطح ریشه دخالت دارند نقش کمتری در کاهش جذب فسفر توسط گیاه دارند. در گذشته تاکید می‌شد که برای اطمینان از جذب کافی فسفر توسط گیاه در دمای کم، کود فسفاته بیشتری مصرف شود (Singh and Jones, 1977). با وجود این پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که مصرف فراوان کود فسفاتی برای جبران رشد ضعیف گیاه در دمای کم خاک، اگرچه محتوای فسفر و حلالیت آن را در خاک افزایش می‌دهد، اما تاثیری در جذب آن توسط گیاه ندارد (Ylivainio and Peltovuori, 2012).

2-5- مواد آلی

بررسی‌ها نشان می‌دهد مواد آلی موجب می‌شوند فسفر با آسانی بیشتری جذب گیاه شده و تثبیت آن در خاک کاهش یابد. ترکیبات حاصل از تجزیه بقایای آلی با تشکیل کمپلکس‌های فسفو هیومیک، جایگزینی آنیونی فسفات با یون هیومات و همچنین تولید دی‌اکسیدکربن در حل‌پذیری فسفر خاک موثر هستند. برای نمونه استفاده از اسید هیومیک همراه با کود مونو کلسیم فسفات موجب شده است تا فاصله حرکتی فسفر در قابلیت استفاده یکسان نسبت به زمانی که اسید هیومیک استفاده نشده افزایش یابد (شکل 2). مقدار ماده آلی در بیشتر خاک‌های ایران کم تا خیلی کم است (Moshiri et al., 2017) که می‌تواند از جمله دلایل تثبیت زیاد فسفر در خاک‌های کشور محسوب شود.



شکل 2- اثر استفاده از اسید هیومیک (HA) همراه با کود منو کلسیم فسفات (MCP) بر فاصله حرکتی فسفر از منبع کودی و فسفر قابل جذب خاک پس از 7 (a) و 28 (b) روز زمان خواباندن (Zhen-Yu et al., 2013).

2-6- وضعیت فسفر خاک

در تثبیت فسفر خاک درجه اشباع خاک از فسفر یا مقدار فسفری که که در سال‌های گذشته به وسیله خاک تثبیت شده است اهمیت زیادی دارد. مفهوم عملی این موضوع آن خواهد بود که در خاک‌هایی که به مدت چند سال کود فسفری زیادی مصرف شده است فسفر در خاک تجمع یافته و نیاز به مصرف کود فسفری کاهش می‌یابد (Wang et al., 2015).

3- حرکت فسفر در خاک و فراهمی آن برای ریشه

ریشه گیاهان در محدوده‌ای از خاک که آب و عناصر غذایی کافی وجود داشته باشد، گسترش می‌یابند. با وجود این، ریشه در کل حجم خاک گستردگی زیادی نداشته و تنها شاید در حدود یک تا سه درصد خاک رویی را در طول یک دوره کشت اشغال کند. از این‌رو قابلیت دسترسی عناصر غذایی توسط گیاه به حرکت عناصر غذایی به سمت ریشه بستگی دارد. براین اساس سه شیوه پخشیدگی، جریان توده‌ای و رهگیری ریشه در جذب فسفرکمک می‌کنند. جدول (1) سهم هر یک از این شیوه‌ها را در تامین فسفر مورد نیاز ذرت در مقایسه با دیگر عناصر غذایی نشان می‌دهد (Barber, 1995).

3-1- پخشیدگی

فسفر در خاک به نسبت غیر پویا است و بیشتر از راه پخشیدگی حرکت می‌کند، از این‌رو حرکت آن در خاک کند بوده و در مدت زمان طولانی مسافت بسیار کمی را طی می‌کند. پخشیدگی در محیط خاک بواسطه شیب غلظتی بین عنصر غذایی در محلول خاک و سطح ریشه اتفاق می‌افتد. از آنجا که پخشیدگی عنصر غذایی در خاک از راه آب خاک انجام می‌شود، میزان پخشیدگی بسته به میزان آب خاک متفاوت خواهد بود. از این‌رو هر اندازه آب بیشتر حرکت عنصر غذایی برای رسیدن به ریشه با این شیوه بیشتر است. با وجود این جذب فسفر توسط گیاه از راه رشد و توسعه ریشه و نیز زمان و شیوه کاربرد کود قابل تنظیم است. ریشه گیاهانی که توانایی جذب بیشتری دارند (گنجایش کاهش غلظت عناصر غذایی در محلول خاک تا سطح پایین) می‌توانند شیب غلظت قوی‌تری ایجاد کرده و حرکت فسفر به سمت ریشه را افزایش دهند. تفاوت در توانایی نسبی گونه‌های مختلف گیاهی برای جذب فسفر به ویژه در شرایط عرضه محدود فسفر تاثیر بیشتری دارند.

3-2- جریان توده‌ای

حرکت توده‌ای عنصر غذایی همراه با آب خاک به سوی ریشه بواسطه شیب پتانسیل آبی انجام می‌شود. مقدار عنصری که با این روش به سوی ریشه گیاه حرکت می‌کند تحت تاثیر غلظت عنصر غذایی محلول خاک و میزان تعرق گیاه است. جریان توده‌ای سازوکار

مهمی برای تامین فسفرگیاه به حساب نمی‌آید. با وجود این بیشتر عناصر غذایی با جریان توده‌ای توسط ریشه‌ها جذب می‌شوند. برخی از عناصر غذایی مانند کلسیم و منیزیم حتی ممکن است بیش از نیاز گیاه به این شیوه جذب شوند (جدول 1).

3-3- رهگیری ریشه

مقدار کمی از فسفر نیز در اثر رشد ریشه و تماس آن با منابع فسفر قابل استفاده جدید خاک جذب می‌شود. رهگیری ریشه در واقع به کاهش فاصله منبع فسفر خاک با ریشه منجر شده و به سازوکار پخشیدگی کمک می‌کند.

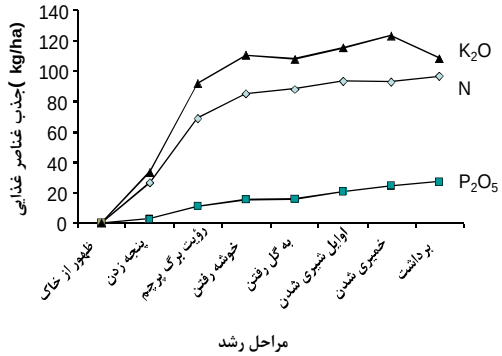
جدول 1- اهمیت هر یک از شیوه‌های انتقال عناصر غذایی در خاک و فراهمی آن برای ذرت (کیلوگرم درهکتار)

عنصر غذایی	مقدار مورد نیاز برای تولید 9/5 تن در هکتار دانه خشک	مقدار تقریبی فراهم شده بوسیله		
		جریان توده ای	پخشیدگی	رهگیری ریشه
نیتروژن	190	150	38	2
فسفر	40	2	37	1
پتاسیم	195	35	156	4
کلسیم	40	150	0	60
منیزیم	45	100	0	15
گوگرد	22	65	0	1

4- روش‌های مصرف کودهای فسفری

یکی از دلایل اصلی کم بودن کارایی فسفر در خاک‌های آهکی شیوه مصرف کودهای فسفری است (Iqbal et al., 2013). راهبرد صحیح، انتخاب شیوه مصرف کودهای فسفری مطابق با شرایط خاک و در زمان بیشینه نیاز گیاه است. گیاهان در مراحل مختلف رشد نیاز متفاوتی به فسفر دارند (شکل 3). در غلات، تامین فسفر کافی در مراحل آغازین رشد به ایجاد پنجه های کافی و رشد ریشه آن‌ها کمک می‌نماید. افزون‌بر این، تامین فسفر در مراحل اولیه رشد در گندم و جو زمستانه تحمل گیاه را در مقابله با سرما افزایش می‌دهد.

این در حالی است که در مرحله شروع گلدهی (رشد زایشی) نیز نیاز گیاه به فسفر افزایش می‌یابد. از این‌رو انتخاب روش مناسب مصرف کود مطابق با نیاز گیاه ضروری است.



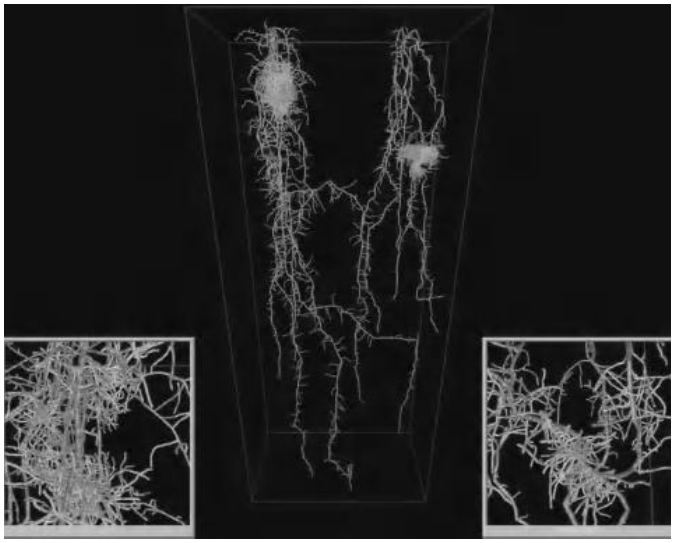
شکل 3- روند جذب عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در مراحل مختلف رشد و نمو گندم

4-1- پخش سطحی

در این روش کود به طور یکنواخت پیش از کاشت روی سطح خاک توزیع شده و با شخم و یا دیسک به زیر خاک برده می‌شود. در این شرایط هرچه بافت خاک سنگین‌تر باشد تثبیت فسفر مصرف شده نیز بیشتر خواهد بود. این موضوع از سرعت واکنش شیمیایی و سطحی از خاک که در معرض واکنش قرار می‌گیرد ناشی می‌شود. هنگامی که فسفر از راه پخش کردن به خاک داده شود با سطح بیشتری از خاک در تماس بوده و در نتیجه امکان تثبیت آن بیشتر است. از سویی هرچه کود فسفری از گرانوله‌های ریزتری تشکیل شده باشد تثبیت فسفر نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه در اغلب مزارع کشاورزی کودهای فسفری پیش از کشت و به صورت پخش سطحی بکار برده می‌شوند بخش زیادی از کود بکار رفته تثبیت و از دسترس گیاه خارج می‌شود. یک مطالعه در خاک‌های زیر کشت گندم در استان خراسان رضوی نشان داد که کارایی بازیابی فسفر به روش پخش سطحی در حدود 5 درصد است (کشاورز، 1394). به همین دلیل شیوه مصرف کودهای فسفری (سوپر فسفات تریپل، فسفات آمونیوم و سوپر فسفات ساده) به صورت پخش سطحی پیش از کشت گیاه (آنچه که در کشور رایج است) روش مناسبی برای تامین فسفر مورد نیاز گیاه نبوده و در مقادیر کم کود فسفری بازده اقتصادی چندانی به همراه ندارد.

2-4- نواری

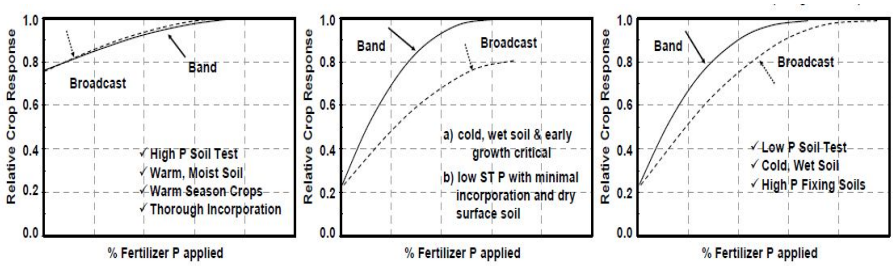
در مصرف نواری، فسفر همزمان با کشت در نزدیکی منطقه ریشه و در بخش کوچکی از خاک به صورت نواری (دو طرفه یا یک طرفه) قرار می‌گیرد. این وضعیت موجب می‌شود تا دسترسی ریشه به فسفر به دلیل تماس کمتر آن با خاک آسان‌تر شده و از تاثیر واکنش‌های ناخواسته خاک کاسته شود (شکل 4). به همین دلیل مصرف نواری کود فسفری در مقایسه با پخش سطحی در بیشتر موارد برتری دارد (شکل 5). از برتری‌های این روش مصرف کمتر کود فسفری تا 50 درصد در مقایسه با روش پخش سطحی است. در این روش مصرف کودهای دارای فسفر (5 سانتی‌متر زیر بذر و 5 سانتی‌متر کنار بذر) همزمان با کاشت بذر و با استفاده از دستگاه بذرکار-کودکار انجام می‌شود. با این شیوه امکان مصرف کود سوپرفسفات تریپل حداکثر تا 100 کیلوگرم در هکتار وجود دارد. در روشی دیگر کودهای فسفری همراه با بذر (کاربرد در لوله سقوط بذر) مصرف می‌شوند. در این روش بذر و کود در کنار یکدیگر و در یک ردیف به نسبت باریک قرار می‌گیرند. بیشترین میزان مصرف ایمن فسفر با این روش (برای جلوگیری از آسیب کود به بذر و گیاهچه) بسته به سطح مقطع قرارگیری بذر، شرایط رطوبتی و بافت خاک متفاوت است. در کانادا بیشینه 20 کیلوگرم در هکتار فسفر خالص به شیوه جایگذاری همزمان با بذر در کلزا توصیه شده است. با این روش می‌توان مصرف کود فسفری را در کشت گندم را تا میزان 40 کیلوگرم در هکتار کاهش داد. مصرف سوپرفسفات تریپل با این روش به راحتی امکان‌پذیر است. با این حال استفاده از این روش برای دی‌آمونیوم فسفات به دلیل تماس مستقیم بذر با کود می‌بایست با ملاحظاتی از جمله مصرف کمتر و آبیاری به موقع برای جلوگیری از تجمع شوری و آمونیوم (آمونیاک) در محیط اطراف بذر و گیاهچه گندم همراه باشد. در شرایط دیم با سطح مقطع کوچک ردیف‌های کشت (مانند بازکننده دیسک در خاک) بیشینه میزان ایمن مصرف فسفر خالص حدود 22 کیلوگرم در هکتار (تقریبا 50 کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل) است. این در حالی است که در شرایط رطوبتی مناسب خاک می‌توان بیشینه تا 28 کیلوگرم در هکتار فسفر خالص (معادل 60 کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل) را افزایش داد.



شکل 4- سیستم ریشه گندم (شبیه‌سازی شده با ROOTMAP) در پاسخ به مصرف نواری فسفر در خاک.

در تصویر سمت چپ فسفر در عمق 6 سانتی‌متری و در تصویر سمت راست در عمق 12 سانتی‌متری از سطح خاک قرار داده شده است. عمق ریشه گندم 110 سانتی متر است. ملاحظه می شود ریشه گندم در قسمتی که غلظت فسفرآن بالاست گسترش زیادی یافته است. این دو شکل نمای نزدیک از ریشه های رشد کرده در اطراف نوارهایی که فسفر مصرف شده است را نشان می دهد ریشه گیاه در سمت راست به دلیل تأخیر در دسترسی به نوار عمیق تر فسفر نسبت به سیستم ریشه سمت چپ کوچکتر است (Diggle and Dunbabin, 2013).

چنانچه سطح مقطع قرارگیری بستر بذر بزرگتر باشد امکان افزایش مقدار مصرف فسفر با این روش بیشتر است. از سویی چنانچه برای تامین فسفر موردنیاز گیاه در روش جایگذاری همزمان کود و بذر از کودهای دارای فسفر و نیتروژن مانند فسفات آمونیوم استفاده شود، مقدار ایمن مصرف فسفر به میزان نیتروژن موجود در کود نیز بستگی خواهد داشت. آسیب کود به بذر بیشتر ناشی از اثر اسمزی و شوری ناشی از محتوی نیتروژن کود است. بکارگیری این روش‌ها در کشور بهبود اثر بخشی کودهای دارای فسفر، افزایش رشد گیاه را به دنبال خواهد داشت. با وجود این کارایی بازیابی فسفر در روش نواری بیش از 20 درصد نخواهد بود.

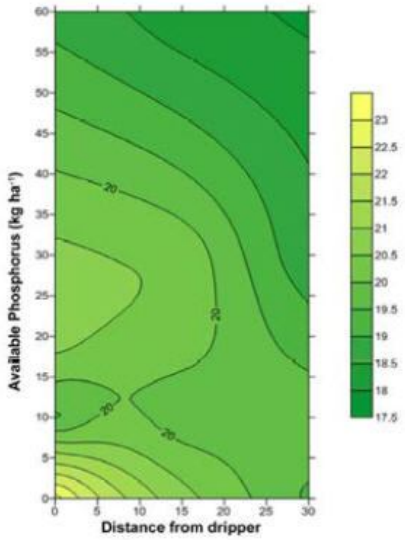


شکل 5- اثر وضعیت خاک و شرایط محیطی بر پاسخ گیاه به محل قرارگیری فسفر در دو روش مصرف نواری و پخش سطحی (Fixen and Leikam, 1988).

4-3- کودآبیاری

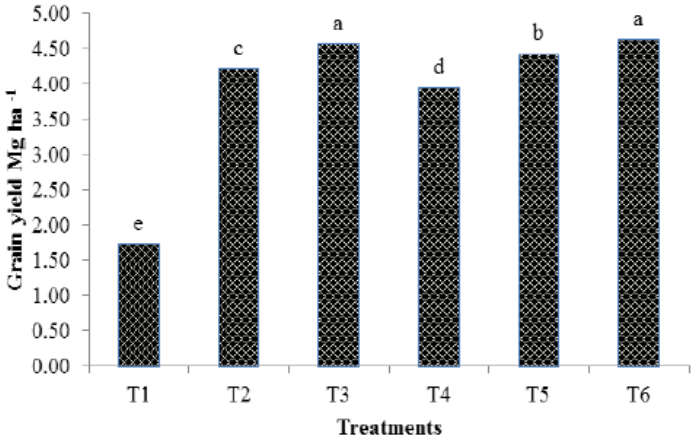
مطالعات بسیاری اثر الگوی آبیاری را بر رفتار فسفر خاک و شکل‌های آن ثابت کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد محتوای نسبتاً زیاد آب و آبیاری متناوب منجر به تحرک بیشتر فسفر خاک و دسترسی بهتر آن توسط گیاه می‌شود (Mbagwu and Osuigwe, 1985; Bacon and Davey, 1982). سیبل و همکاران (2003) و بنگال و دادلی (2003) اشاره کردند که تعداد دفعات زیاد آبیاری (دور کوتاه) جذب فسفر در گیاه را افزایش داده و بر توزیع و تحرک آن در نیمرخ خاک اثر مثبتی دارد. براین اساس مصرف کودهای فسفری به شیوه کودآبیاری روش مناسبی برای بهبود عملکرد گیاه و کارایی مصرف فسفر عنوان شده است (Iqbal et al., 2013). باوجودی‌که در گذشته مصرف سرک فسفر در بسیاری از منابع غیر موثر گزارش شده بود، اما یافته‌های بعدی نشان داد این روش مصرف به‌ویژه در آبیاری قطره‌ای بسیار موثر است (Papadopoulos, 1994; Ristimaki and Papadopoulod, 2000). از آنجاکه جذب فسفر بعد از آبیاری و سه تا چهار هفته پس از جوانه‌زنی اتفاق می‌افتد (Alam et al., 1999) احتمال تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی در صورت مصرف پیش از کشت وجود دارد. افزون براین در مراحل ابتدایی رشد گیاه تقاضا برای جذب فسفر بیشتر بوده و به دلیل حجم کم ریشه و سطحی بودن آن، ممکن است با کمبود فسفر مواجه شود. در مقابل کودآبیاری فسفر با کنترل زمان و مکان مصرف کود موجب کاهش تثبیت فسفر در خاک و بهبود جذب می شود. در کودآبیاری برخلاف شیوه مصرف پیش از کشت، آب و فسفر به طورهمزمان در اختیار گیاه قرار گرفته و تحرک فسفر در نزدیکی ریشه افزایش

می‌یابد. این موضوع به ویژه در مراحل ابتدایی رشد گیاه مهم است چون ریشه برای رشد و توسعه خود به فسفر نیاز دارد. با وجود این فسفر در خاک‌های آهکی از محل کاربرد تحرک بسیار کمی داشته و به سرعت با خاک واکنش نشان می‌دهد. از این‌رو، این احتمال وجود دارد که جذب و دسترسی فسفر توسط گیاه کاهش یابد. انتقال فسفر هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی به نسبت میزان رشد ریشه در خاک بسیار کند است. همانطور که در شکل 6 دیده می‌شود غلظت فسفر در لایه رویی 15 سانتی‌متری خاک نسبت به 30-15 و 45-30 سانتی‌متری در تمام فواصل نسبت به قطره‌چکان‌ها بیشتر است. محدوده حرکتی فسفر از قطره چکان‌ها به تثبیت فسفر در سطوح خاک بستگی زیادی دارد. با این حال، فاصله حرکت فسفر در خاک متناسب با میزان مصرف است، زیرا مصرف بیشتر موجب می‌شود تا مکان‌های جذب فسفر در خاک در نزدیکی نقطه مصرف اشباع شده و حرکت توده‌ای بعدی سبب تحرک بیشتر فسفر شود (Rauschkolb et al., 1976).



شکل 6- تحرک فسفر در خاک پس از مصرف کود فسفاته (ترکیب 50% مونو آمونیوم فسفات و 50 % دی آمونیوم فسفات) به شیوه آبیاری قطره‌ای در طول دوره رشد ذرت در یک خاک لومی رسی شنی. اعداد روی خطوط منحنی نشان‌دهنده غلظت فسفر قابل استفاده خاک بر حسب کیلوگرم در هکتار است. کودآبیاری فسفر سه نوبت در مرحله رشد رویشی (25%)، رشد زایشی (50%) و بلوغ (25%) انجام شده است.

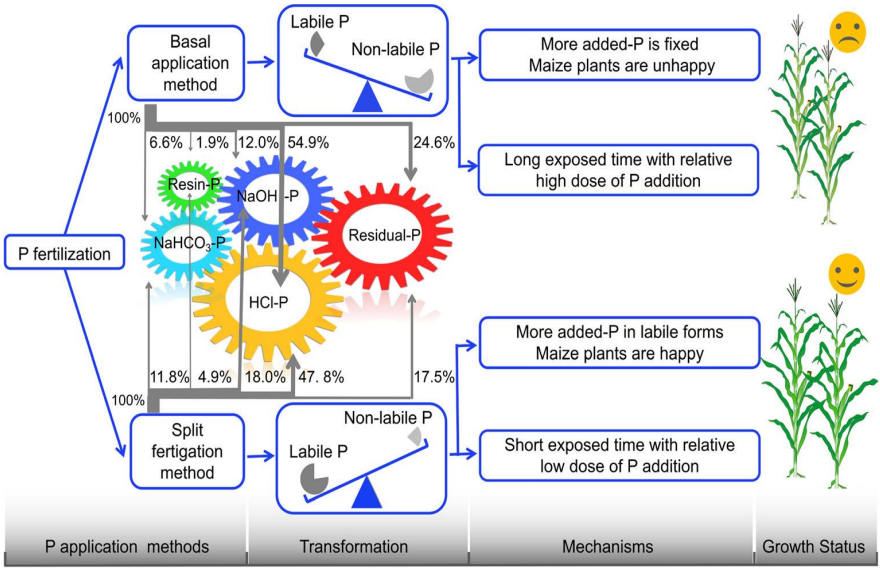
Rubiez و همکاران (1991) گزارش کردند که به دلیل ماهیت اسیدی کود اوره فسفات، مصرف آن از راه آبیاری قطره‌ای (کودآبیاری) موجب کاهش 0/5 واحدی pH خاک در اطراف قطره‌چکان‌ها می‌شود. آنان همچنین یادآور شدند با مصرف این کود، فسفر تحرک قابل توجهی در خاک تا فاصله 20 سانتی‌متری از قطره چکان‌ها داشته است. از سویی Eissa و همکاران (2013) نشان دادند که با آبیاری قطره‌ای تحرک اوره فسفات بیش از کود مونو پتاسیم فسفات در خاک‌های آهکی است. سطوح غلظت زیاد و تحرک فسفر در خاک هنگام استفاده از اوره فسفات در سامانه آبیاری قطره‌ای عامل مهمی در تامین نیاز فسفر گیاه محسوب می‌شود. کاربرد تقسیط شده فسفر در روش آبیاری قطره‌ای اثر باقی مانده طولانی‌تری نسبت به کاربرد نواری تحت آبیاری جویچه‌ای دارد (Rubeiz et al., 1991). پژوهش‌های انجام شده همچنین نشان می‌دهد عملکرد ذرت با مصرف 44 کیلوگرم در هکتار فسفر خالص (کود مونو آمونیوم فسفات) به صورت کود آبیاری (قطره‌ای) در چهار تقسیط (مرحله 8 برگی، 12 برگی، ظهور گل نر و شیری شدن دانه) نسبت به روش مرسوم پیش از کشت برتری محسوسی داشته و کارایی بازیابی فسفر را 64 درصد افزایش داده است (Li et al., 2019). نتایج مشابهی نیز با مصرف 48 کیلوگرم در هکتار فسفر خالص (اسید فسفریک) همراه با آبیاری (قطره‌ای) در مقایسه با مصرف پیش از کشت (سوپرفسفات تریپل) در کدو گزارش شده است (Munir et al., 2004). این در حالی است که در آبیاری بارانی و ردیفی (جوی و پشته) نیز کودآبیاری فسفر امکان پذیر است. در پژوهشی کودآبیاری 90 کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل با آبیاری ردیفی (محلول کود سوپر فسفات تریپل با نسبت کود به آب 1:5 در بشکه‌های پلاستیکی کوچک مجهز به شیر آب تهیه شد و در ورودی آب آبیاری به کرت‌های فرعی دریافت‌کننده فسفر قرار داده شد) در یک مرحله همراه با نخستین آبیاری سی روز پس از کشت موجب افزایش عملکرد دانه گندم در مقایسه با روش پخش سطحی شد (شکل 7)، (Majeed et al., 2014).



شکل 7- اثر مصرف کود سوپرفسفات تریپل (90 کیلوگرم در هکتار) از راه پخش سطحی و کود آبیاری بر تولید محصول گندم . تیمارها به ترتیب شاهد (T1)، پخش سطحی کل کود پیش از کشت (T2)، پخش سطحی 50 درصد کود +کود آبیاری 50 درصد کود در اولین آبیاری (T3)، کود آبیاری 50 درصد کود در دومین آبیاری (T4)، کود آبیاری 75 درصد کود در اولین آبیاری (T5) و کود آبیاری کل کود در اولین آبیاری (T6) (Majeed et al., 2014).

اقبال و همکاران (2003) گزارش کردند که عملکرد دانه گندم با مصرف کود سوپر فسفات ساده از راه کودآبیاری به مقدارکمتر (33 کیلوگرم در هکتار) تقریباً مشابه مصرف با مقدار بالاتر (44 کیلوگرم در هکتار) به شیوه پخش سطحی است. آنان این موضوع را در شیوه کودآبیاری به اثرات مستقیم یا غیرمستقیم الگوی اسیدی شدن خاک توسط سوپرفسفات ساده (مشابه اوره فسفات) نسبت دادند که موجب افزایش جذب فسفر و بهبود کارایی فسفر با مقدار کمتر شده است. از سویی مصرف فسفر به صورت تقسیط شده و به شیوه کودآبیاری در یک خاک آهکی موجب شد تا میانگین فسفر پویا[1] خاک (رزین و NaHCO3-P) و فسفر نسبتا لابیل (NaOH-P) به ترتیب 19/7 و 12/6 درصد افزایش و فسفر غیرپویا[2] 19/3 درصد نسبت به مصرف پایه فسفر پیش از کشت کاهش یابد (Kang et al., 2021).

[1]- labile
[2]- Non-labile

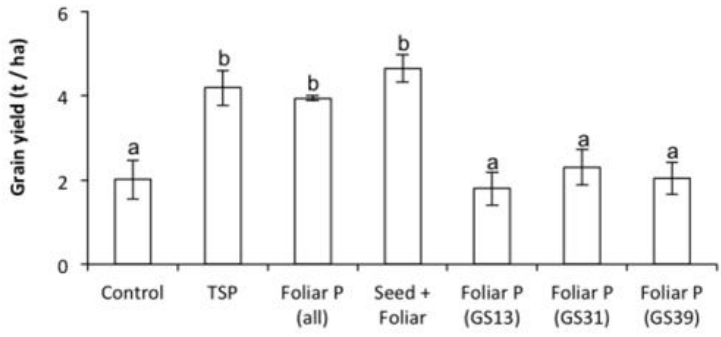


شکل 8- نمودار مفهومی در توضیح اثر تقسیط فسفر به روش کودآبیاری در مقابل مصرف پایه پیش از کشت بر فسفر قابل استفاده، تبدیل فسفر و جذب فسفر توسط ذرت. پنج بخش معدنی فسفر با اندازه‌های مختلف چرخ دنده‌ها و با رنگ های مختلف مشخص شده‌اند. خطوط خاکستری با ضخامت‌های مختلف نشان دهنده نسبت فسفر (%) تبدیل شده به مخازن فسفر معدنی خاک پس از مصرف است (Kang et al., 2021).

در صورت استفاده از سیستم آبیاری ردیفی (جوی و پشته) می‌توان از نیروی ثقل و بشکه‌های 200 تا 220 لیتری برای تزریق کود استفاده کرد. در آبیاری بارانی و ردیفی (جوی و پشته) تزریق کود می‌بایست در یک سوم میانی زمان آبیاری انجام شود تا یکنواختی بهتری حاصل شود. نکته مهم آن است که در خاک‌های آهکی استفاده از منابع کودی فسفری با حلالیت زیاد و ماهیت اسیدی مانند اوره فسفات، اسید فسفریک، سوپرفسفات ساده و یا سوپر فسفات تریپل اثر بخشی این روش را بیشتر خواهد کرد. از این‌رو در شرایطی که امکان مصرف فسفر به هر دلیلی در شروع کشت وجود نداشته باشد مصرف چند نوبت سرک فسفر به صورت کودآبیاری به ویژه در مراحل بحرانی رشد (رشد رویشی و پیش از گلدهی) در تامین نیاز فسفری گیاه بسیار موثر است.

4-4- محلول‌پاشی

مصرف فسفر به شیوه محلول‌پاشی در مقایسه با مصرف خاکی انعطاف‌پذیری بیشتری دارد به‌طوری‌که می‌توان از آن در زمان بیشینه نیاز گیاه و در طول دوره رشد استفاده نمود (Sutton et al., 1983; Allison et al., 2002). در محلول‌پاشی جذب فسفر توسط گیاه بسته به وضعیت آب، شرایط جوی و شدت نور بالقوه سریع است. اما استفاده از این روش در اوایل دوره رشد به دلیل پوشش اندک برگ‌ها کارایی چندانی ندارد. نتایج یک بررسی نشان می‌دهد چنانچه سه نوبت محلول‌پاشی فسفر (فسفات آمونیوم) در مراحل رشدی سه برگی، ساقه‌دهی و برگ پرچم گندم به تنهایی و یا همراه با بذرمال (فسفر) انجام شود اثر بخشی معادل مصرف کود سوپرفسفات تریپل پیش از کشت خواهد داشت (شکل 9)، (Sylvester-Bradley et al., 2017). شرط موفقیت در تامین فسفر مورد نیاز گیاه به شیوه محلول‌پاشی تعداد مناسب تکرار در مراحل مختلف رشدی و تامین فسفر مورد نیاز اوایل دوره رشدی گیاه با بذرمال یا به شیوه کودآبیاری است. دمای مناسب و رطوبت کافی برای اثر بخشی محلول‌پاشی کودهای فسفری ضروری است چرا که مهم‌ترین روش جذب فسفر با این روش، جذب کوتیکولی است. در مجموع محلول‌پاشی یک روش تکمیلی در تامین نیاز فسفری گندم بوده و مهمترین روش کاربرد کود در خاک و جذب توسط ریشه در ابتدای دوره رشد است.



شکل 9- اثرمحلول‌پاشی فسفر (فسفات آمونیوم) با و بدون بذرمال در مقایسه با مصرف خاکی سوپر فسفات تریپل بر عملکرد دانه گندم (Sylvester-Bradley et al., 2017)

5- نتیجه‌گیری

مصرف فسفر به شیوه پخش سطحی پیش از کاشت به دلیل کارایی کم اثربخش نبوده اما دامنه وسیعی از فن‌آوری‌های جدید از جمله ماشین آلات جدید جایگذاری، استفاده از ترکیبات شیمیایی برای مهار تثبیت فسفر در خاک، کودآبیاری و جذب برگی فسفر برای بهبود جذب و کاهش تقاضای فسفر وجود دارد. به طور کلی اصول مدیریتی مصرف سرک فسفر به شیوه کودآبیاری و محلول‌پاشی به شرح زیر است:

1. کودآبیاری فسفر به دلیل همزمانی آن با حداکثر نیاز گیاه کارایی بیشتری نسبت به روش پخش سطحی و نواری دارد. این شیوه مصرف فسفر موجب می‌شود میانگین غلظت فسفر در محلول خاک اطراف ریشه افزایش یافته و از تبدیل و تغییر آن به شکل‌های غیر قابل استفاده جلوگیری شود. برای دستیابی به یکنواختی در کاربرد کود با این روش بهتر است در مزارعی از این روش استفاده کرد که مجهز به سیستم آبیاری تحت فشار به ویژه آبیاری تیپ باشد. با وجود این کودآبیاری فسفر در آبیاری بارانی و ردیفی نیز امکان‌پذیر است. در این صورت چنانچه پیش از کشت هیچ نوع کود فسفری استفاده نشده باشد، مصرف 30 تا 40 کیلوگرم انواع کودهای فسفر بالا محلول توصیه می‌شود. چنانچه در شروع کشت از کود فسفری استفاده شده باشد مقدار مصرف کودآبیاری فسفر را می‌توان به 10تا 15 کیلوگرم در هکتار کاهش داد. شیوه مصرف کود در آبیاری قطره‌ای باید به گونه‌ای باشد که در 80 درصد زمان میانی آبیاری تزریق انجام شود. این در حالی است که 10 درصد زمان ابتدایی و انتهایی آبیاری باید به آب بدون کود اختصاص یابد. در صورت استفاده از سیستم آبیاری ردیفی (جوی و پشته) می توان از نیروی ثقل و بشکه‌های 200 تا 220 لیتری برای تزریق کود استفاده کرد. این در حالی است که در آبیاری بارانی و ردیفی (جوی و پشته) تزریق کود می‌بایست در یک سوم میانی زمان آبیاری انجام شود تا یکنواختی بهتری حاصل شود. در صورت استفاده از کودهای محلول در سیستم‌های آبیاری تحت فشار با توجه به کیفیت آب آبیاری می‌بایست ضمن کنترل مقدار مصرف کود از منابع کودی فسفر با ماهیت اسیدی (اسید فسفریک، اوره فسفات) استفاده کرد تا از رسوب و گرفتگی نازل ها جلوگیری شود.

2. در خاک‌های آهکی استفاده از منابع کودی فسفری با حلالیت زیاد و ماهیت اسیدی مانند اوره فسفات اسید فسفریک و همچنین سوپرفسفات تریپل یا ساده، مونو فسفات آمونیوم و کودهای مرکب محلول از جمله 10:52:10، 11:52:0، 18:46:0 و یا 10:34:0 برای کودآبیاری مناسب می‌باشند.

3. حرکت فسفر در خاک به دلیل پخشیدگی بسیار کند بوده و تنها در نزدیکی ریشه امکان جذب فسفر وجود دارد. با وجود این مصرف اسید هیومیک همراه با کودهای فسفری فاصله حرکتی فسفر را افزایش داده و موجب می‌شود تا در فواصل دورتر از ریشه نیز قابلیت جذب فسفر وجود داشته باشد. این موضوع در مصرف فسفر به شیوه نواری و کودآبیاری اهمیت زیادی دارد.

4. در صورتی‌که هیچگونه کود فسفری پیش از کشت مصرف نشده باشد به عنوان یک توصیه کلی برای گیاهان زراعی مصرف کودهای فسفری ویژه کودآبیاری در سه مرحله آغاز دوره رشد-پس از جوانه‌زنی (15 کیلوگرم در هکتار)، اواسط دوره رشد رویشی (10 کیلوگرم درهکتار) و اواخر دوره رشد رویشی (15 کیلوگرم درهکتار) در شرایط کمبود متوسط فسفر خاک (5 تا 10 میلی گرم در کیلوگرم) تجویز می‌شود. در زراعت گندم برای اطمینان از تامین فسفر برای رشد رویشی و زایشی از کود آبیاری کودهای فسفری در مرحله تکمیل پنجه‌زنی و شروع ساقه‌دهی در انتهای فصل زمستان و اوایل بهار (اسفند و فروردین) می‌توان استفاده نمود.

5. محلول‌پاشی کودهای فسفری یکی دیگر از روش‌های تکمیلی برای تامین فسفر موردنیاز گیاه است. این روش بیشتر در مرحله شروع رشد زایشی توصیه می‌شود. در پاییز به دلیل اینکه گیاهچه‌ها رشد چندانی ندارند و ازسوی دیگر دما و یا رطوبت برای جذب فسفر توسط اندام هوایی گیاه فراهم نیست نمی‌توان از این روش استفاده کرد. در این روش از انواع کودهای با بنیان فسفات می‌توان بهره جست. مقدار توصیه شده برای کاربرد کود به این روش 4-2 کیلوگرم درهکتار از منبع منو پتاسیم فسفات (KH_2PO_4) و اوره فسفات ($CO(NH_2)_2{\cdot}H_3PO_4$) می‌باشد. با وجود این استفاده از ترکیبات همراه مانند اسیدآمینه و یا اسید فولویک برای جذب بهتر فسفر به روش محلول‌پاشی بسیار ضروری است. در زراعت گندم، بهترین زمان محلول‌پاشی فسفر پس از رفع سرمای زمستانه در مرحله تکمیل پنجه‌زنی و اوایل ساقه روی (تشکیل دومین گره ساقه) است.

برای اطمینان از اثر محلول‌پاشی فسفر، کاربرد آن پیش از آشکارشدن خوشه و گلدهی نیز توصیه می‌شود. یادآوری این نکته ضروری است که محلول‌پاشی فسفر بیشتر اثر کمکی در رفع کمبود این عنصر در گیاه دارد. شرط موفقیت روش محلول‌پاشی چنانچه به تنهایی به منظور تامین فسفر موردنیاز گیاه استفاده شود تعداد مناسب تکرار در مراحل مختلف رشدی و تامین فسفر مورد نیاز اوایل دوره رشدی با بذرمال یا به شیوه کودآبیاری است.

6- منابع مورد استفاده

1- شهبازی، ک. و بشارتی، ح. 1392. بررسی اجمالی وضعیت حاصلخیزی خاک‌های کشاورزی ایران. مدیریت اراضی، 1: 1-15.

2- کشاورز، پ. 1394. برآورد کارایی فسفر در تولیددو محصول عمده زراعی گندم وگوجه فرنگی در استان خراسان رضوی. مجری گزارش نهایی 47457. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

3- کشاورز، پ. 1399. گزارش فنی اجرای پایلوت تغذیه پنبه در 7 شهرستان استان خراسان رضوی. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی. (گزارش منتشر نشده).

4- مشیری، ف.، ضیائیان، ع. ح.، فروهر، م.، کلهر، م.، سبطی، م. و ملاحسینی، ح. 1398. اثر کاربرد توام کود گاوی و سوپرفسفات تریپل بر بهره‌دهی سیستم زراعی و بیلان فسفر خاک طی دو سال کشت تناوبی گندم-ذرت علوفه‌ای. شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، 7-5 شهریور 1398، زنجان، ایران.

5- Ahmad, M., Ahmad, M., El-Naggar, A.H., Usman, A.R., Abduljabbar, A.,Vithanage, M., Elfaki J., Al-Faraj, A. and Al-Wabel, M.I. 2018 Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. Pedosphere, 28:873–883.

6- Alam, S.M., Iqbal, Z. and Latif, A. 1999. Fertigation technology for improved phosphorus use efficiency in wheat. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research, 42: 380–383.

7- Allison, M.F., Fowler, J.H. and Allen, E.J. 2002. Effects of soil- and foliar-applied phosphorus fertilizers on the potato (*Solanum tuberosum*) crop. Journal of Agricultural Science, 137: 379–395.

8- Ben-Gal, A. and Dudley, L.M. 2003. Phosphorus availability under continuous point source irrigation. Soil Science Society of America Journal. 67(5):1449-1456.

9- Barber, S.A., Mackay, A.D., Kuchenbuch, R.O. and Barraclough, P.B. 1988. Effects of soil temperature and water on maize root growth. Plant and Soil, 111: 267-269.

10- Barber, S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Wiley & Sons Inc.: New York.

11- Canola Encyclopedia, Fertilizer Management. 2020. Available at https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/fertilizer-management. Canada.
12- Diggle. A.J. and Dunbabin, V.M. 2013. Using simulation modeling of root growth and function as an aid in breeding for increased water and nutrient use efficiency. Improving Water and Nutrient Use Efficiency in Food Production Systems, pp.177-186.
13- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and management. p.1-28. In Fertilizer Best Management Practices. Proceedings of IFA International Workshop, 7-9 March. 2007. Brussels, Belgium.
14- Eissa, M.A., Nafady, M., Ragheb, H. and Attia, K. 2013. Effect of soil moisture and forms of phosphorus fertilizers on corn production under sandy calcareous soil. World Applied Sciences Journal (WASJ) 26(4):540–547.
15- Fixen, P.E. and Leikam, D.F. 1988. An overview of phosphorus placement. Proc. Great Plains Soil Fertility Workshop 2:37-51. Dept. of Agronomy, Kansas State University.
16- Föhse, D., Claassen, N. and Jungk, A. 1988. Phosphorus efficiency of plants. Plant and soil, 110: 101-109.
17- Iqbal, Z., Yaqub, M., Akram, M. and Ahmad, R. 2013. Phosphorus fertigation: A technique for enhancing P fertilizer efficiency and yield of wheat and maize. Soil Environment, 32: 146-151.
18- Jalali, M. and Ranjbar, F. 2010 Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. Geoderma, 155:101–106.
19- Kang, L., Zhang, G. and Chu, G. 2021.Split delivering phosphorus via fertigation to a calcareous soil increased P availability and maize yield (*Zea mays* L.) by reducing P fixation. J Soils Sediments 21, 2287–2300.
20- Li, Q., Xu, C., Yin, C., Kong, L., Qin, Y., Hou, Y., Wang, H. and Zhao, L. 2019. Evaluation of fertigation technique for phosphorus application of maize in the semi-arid region of Northeast China. Plant, Soil and Environment, 65: 401-407.
21- Mackay, A.D. and Barber, S.A. 1988. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. Soil Science Society of America Journal, 48: 818-823.
22- Majeed, A., Javid, S., Ahmad, Z.A., Muhmood, A. and Niaz, A. 2014. Fertigation helps in increasing phosphorus use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) compared to conventional method. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 51: 587-593.

23- 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. and Haygarth, P.M. 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. Plant and Soil, 427:5–16

24- Moshiri, F., Samavat, S. and Balali, M.R. 2017. Soil organic carbon: A key factor of sustainable agriculture in Iran. Global symposium on soil organic carbon, 21-23 March, 2017, FAO, Rome, Italy.

25- Munir, J.M, Hammouri, A. and Ferdows, A.E. 2004. Phosphorus fertigation and pre plant conventional soil application of drip irrigated summer squash. Journal of Agronomy, 3: 162–169.

26- Papadopoulos, I. 1994. Use of labeled fertilizers in fertigation research. p. 399-410. In: Proc. of an international symposium on nuclear and related techniques in soil-plant studies. October 17-21, 1994, Vienna, Austria.

27- Penn, C.J. and Camberato, J.J. 2019.A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. Agriculture, 9:120-138.

28- Rauschkolb, R.S., Rolsten, D.E., Miller, R.J., Carlton, A.B. and Burau, R.G. 1976. Phosphorus fertilization with drip irrigation. Soil Science Society of America Journal, 40: 68-72.

29- Ristimaki, L. and Papadopoulos, I. 2000. A comparison of the efficiency of conventional soil phosphorus application and phosphorus fertigation. In IMPHOS International Fertigation Workshop, Amman (Jordan), 25-27 Apr 1999. ICARDA.

30- Rubiez, I.G., Stroehlein, J.L. and Oebeker, N.F .1991. Effect of irrigation method on urea phosphate reactions in calcareous soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 22:431–435.

31- Sharpley, A.N., Bergstrom, L., Aronsson, H., Bechmann, M., Bolster, C.H., Borling K. and Tonderski, K.S. 2015 Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: research needs and direction. Ambio 44:163–179

32- Silber, A., Xu, G., Levkovitch, I., Soriano, S., Bilu, A. and Wallach, R. 2003. High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. Plant and soil. 253(2):467-477.

33- Singh, B.B. and Jones, J.P. 1977. Phosphorus sorption isotherm for evaluating phosphorus requirements of lettuce at five temperature regimes. Plant and Soil, 46: 31-44.

34- Sutton, P.J., Peterseon, G,A. and Sander, D.H. 1983. Dry matter production in tops and roots of winter wheat as affected by phosphorus

availability during various growth Stages. Agronomy Journal, 75: 657–663.

35- Sylvester-Bradley, R., Withers, P.J., Rollett, A., Talboys, P., Walker, R., Edwards, T., Payvandi, S., Heppel, J.P., Roose, T. and Jones, D. 2017. Improving the sustainability of phosphorus use in arable farming– 'Targeted P'. Report of Sustainable Arable LINK Project LK09136. Kenilworth, UK. Agriculture and Horticulture Development Board.

36- Wang, R., Guo, S., Li, N., Li, R., Zhang, Y., Jiang, J., Wang, Z., Liu, Q., Wu, D., Sun, Q., Du, L. and Zhao, M. 2015. Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization. PLOS One, 10:135-160.

37- Ylivainio, K. and Peltovuori, T. 2012. Phosphorus acquisition by barley (*Hordeum vulgare* L.) at suboptimal soil temperature. Agricultural and food science.

38- Zhen-Yu, D., Qing-Hua, W., Fang-Chun, L., Hai-Lin, M.A., Bing-Yao, M.A. and Malhi, S.S. 2013. Movement of phosphorus in a calcareous soil as affected by humic acid. Pedosphere, 23: 229-235.