

Research Article

Agricultural Engineering., 47(3) (2024) 299-322

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2024.45841.1711

ISSN (E): 2588-5944

## Effect of combined application of struvite recovered from sewage sludge and triple superphosphate on phosphorus bioavailability in soil and its uptake by wheat

T. Nazari<sup>1</sup>, M. Barani Motlagh<sup>2</sup>, S.O. Rastegar<sup>3</sup> and M.H. Sedri<sup>4</sup>

1. PhD Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
3. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
4. Associate Professor, Soil and Water Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Received: 15 January 2024

accepted: 19 June 2024

\*Corresponding Author: mbarani2002@yahoo.com

### Abstract

**Introduction:** The recovery of phosphorus as struvite from treatment plants has attracted researchers' attention due to its potential as a phosphorus fertilizer. Struvite is a white crystalline substance consisting of magnesium, ammonium and phosphorus in equal molar concentrations ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ). The low water solubility of struvite is thought to limit its agronomic utility as a phosphorus (P) fertilizer compared with highly soluble P fertilizers (triple superphosphate). limited studies have been done regarding to the effect of struvite on the availability of phosphorus in calcareous soils. Therefore, this study examines the effect of struvite replacement with triple superphosphate fertilizer on phosphorus availability in wheat plants in calcareous soils deficient in phosphorus.

**Methods and Materials:** Soil with phosphorus deficiency was collected from 0-30 cm depth under arable lands of Hajjiabad-e Seyyedeh located in Ghorveh Township, Kurdistan Province, Iran. The soil was air-dried and ground to pass through a 2-mm sieve, followed by laboratory analysis to determine its physico-chemical properties. Struvite used in this research was obtained by optimizing the three main factors of sulfuric acid concentration, solid-to-liquid ratio, and time for the leaching process, and the three key factors of Mg/P ratio, N/P ratio and pH for the precipitation process by Response Surface Methodology. The factorial experiment was carried out in the form of a completely randomized design in 3 replications. The factors include the application of different proportions of struvite replaced with triple superphosphate in 6 levels (S0:P0, S0:P100, S25:P75, S50:P50, S75:P25 and S100:P0) and 3 levels of phosphorus (50, 100 and 150 kg/ha) and a total of 54 pots. The application rate for struvite was calculated based on total phosphorus ( $P_2O_5$ ) of triple superphosphate. Then 10 wheat seeds were planted in each pot at 2-cm depth which after plant emerging and greening declined to 4 plants in each pot. The pots were randomly moved twice a week during the growth period to eliminate environmental effects. Irrigation and weeding operations were done by hand. Plants (shoots and roots) were harvested 60 days after planting (beginning of flowering), washed with distilled water and dry with tissue



paper. The samples were air-dried and then oven dried at 70°C to a constant weight in a forced air-driven oven. Phosphorus concentrations in plant extracts by the molybdenum vanadate method and Nitrogen concentration in plant was measured by the Kjeldahl method. After harvesting the plants, the soil was immediately air-dried and passed through a 2mm sieve. Then, the amount of phosphorus was determined by Olsen method. The statistical results of the data were analyzed using SAS software and LSD test (at 5% level) was used for comparing the mean values.

**Results and Discussion:** Based on the obtained results, all of the investigated treatments and their interactions were significant at the probability level of one percent ( $P < 0.01$ ). The comparison of the average effects of different struvite treatments showed that by replacing struvite instead of triple super phosphate fertilizer in all three levels of fertilizer, the highest shoot fresh weight (with an average of 7.79 gr/pot), shoot dry weight (with an average of 1.13 gr/pot). Shoot Nitrogen concentration (with an average of 4.82%) and its uptake (with an average of 5.44 gr/pot) were obtained from the application of S75:P25 150 kg/h superphosphate fertilizer. Also, the results showed that the highest amount of phosphorus concentration and uptake, respectively, with an average of 0.174% and 0.197 gr/pot, was obtained from the application of the S75:P25 treatment with 150 kg TSP/ha, which is compared to the application of the S75:P25 treatment of 50 and 100 kg TSP/ha had an increase equivalent to 26.43, 59.89, 11.49 and 43.14% respectively. The results also showed that the highest amount of soil phosphorus after harvesting the plant with an average of 18.95 mg/kg was obtained from the S100:P0 treatment with 150 kg TSP/ha, which compared to the S100:P0 treatment with 100 and 50 kg TSP/ha with an average of 13.29 and 12.56 mg/kg had an increase equivalent to 29.86 and 33.72%, respectively.

**Conclusions:** In spite of its low solubility, struvite is as effective as highly soluble phosphorus fertilizers for plants. There is still a lack of clarity regarding the mechanisms of struvite dissolution as well as the reasons behind this apparent dichotomy. Therefore, more accurate measurements of pH and EC in substrates, analysis of soil properties and fractionation of phosphorus in soil will enhance our understanding of the use of struvite. Therefore, it is recommended to optimize the timing and application rate of struvite in relation to the demand for different agricultural and garden crops.

**Key words:** *Magnesium ammonium phosphate, Olsen P, Triple superphosphate, Wheat*

## اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده از لجن فاضلاب و سوپرفسفات تریپل بر زیست فراهمی فسفر در خاک و جذب آن در گیاه گندم

طالب نظری<sup>۱</sup>، مجتبی بارانی مطلق<sup>۲</sup>، سید امید رستگار<sup>۳</sup> و محمد حسین سدروی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ایران
- ۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۳- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران
- ۴- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

### کلمات کلیدی:

سوپرفسفات تریپل،  
فسفات آمونیوم منیزیم،  
فسفر اولسن،  
گندم

### چکیده

بازیابی فسفر به عنوان استروویت (فسفات آمونیوم منیزیم) از تصفیه خانه‌های فاضلاب به دلیل پتانسیل استفاده مجدد به عنوان کود فسفره توجه پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی اثر استروویت جایگزین شده با کود سوپرفسفات تریپل بر زیست فراهمی فسفر در گیاه گندم بود. بدین منظور آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به صورت گلدانی به اجرا درآمد. فاکتورها شامل کاربرد نسبت‌های مختلف کود استروویت جایگزین شده با سوپرفسفات تریپل در شش سطح (S0:P100، S0:P0، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و سه سطح فسفر (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار) و در مجموع ۵۴ گلدان بود. میزان کاربرد استروویت بر اساس مقدار فسفر کل ( $P_2O_5$ ) سوپرفسفات تریپل محاسبه شد. بر پایه نتایج بدست آمده تمامی تیمارهای مورد بررسی و اثر متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مختلف استروویت نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپرفسفات تریپل در هر سه سطوح کودی، بیشترین وزن تازه اندام هوایی (با میانگین ۷/۷۹ گرم در گلدان)، وزن خشک اندام هوایی (با میانگین ۱/۱۳ گرم در گلدان) غلظت نیتروژن اندام هوایی (با میانگین ۴/۸۲ درصد) و جذب آن (با میانگین ۵/۴۴ گرم در گلدان) از کاربرد تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد بیشترین مقدار غلظت و جذب فسفر به ترتیب با میانگین ۰/۱۷۴ درصد و ۰/۱۹۷ گرم در گلدان از کاربرد تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به کاربرد تیمار

\* عهده دار مکاتبات

Email: mbarani2002@yahoo.com

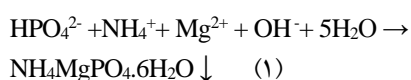
S75:P25 و ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب افزایشی معادل با ۳۶/۴۳، ۵۹/۸۹، ۱۱/۴۹ و ۴۳/۱۴ درصد داشت. با وجود حلالیت کم استروویت (کمتر از ۵٪) اثر زراعی برابر و برتر با کودهای تجاری فسفره دارد. بنابراین بازیابی فسفر از لجن فاضلاب به صورت استروویت به عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر در تأمین فسفر خاک و گیاهان توصیه می شود.

#### مقدمه

گندم یکی از محصولات اصلی برای امنیت غذایی در جهان است که تقریباً ۲۰ درصد کالری و پروتئین رژیم غذایی انسان را تأمین می کند (۳۶). از طرفی افزایش جهانی جمعیت نیاز به تولید بیش تر مواد غذایی با کیفیت دارد. در همین راستا توجه به بخش کشاورزی بسیار حائز اهمیت است (۲۳). سازمان ملل متحد (UN) پیش بینی می کند تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به ۹/۸ میلیارد نفر می رسد. این رقم بدون شک باعث افزایش فشار بر بخش کشاورزی و در نتیجه تقاضای بیش تر برای کود خواهد شد (۲۳). تولید کود امری بسیار ضروری برای تضمین محصولات کشاورزی است. در این میان، فسفر (P) به همراه نیتروژن (N) و پتاسیم (K) از عناصر ضروری برای رشد گیاهان می باشد (۲۴). فسفر جزء ساختاری فسفولیبیدها، اسیدهای نوکلئیک، نوکلئوتیدها، کوآنزیمها و فسفو پروتئینها است و در سنتز پروتئین، تسهیل تقسیم سلولی و توسعه بافت های جدید شرکت می کند. همچنین در ذخیره و انتقال انرژی کمک می کند (۲).

در حال حاضر فسفر استخراج شده از سنگ فسفات ها منبع اصلی برای تولید کودهای تجاری هستند. با این حال، سنگ فسفات ها یک منبع تجدید ناپذیر و به دلیل محدود بودن منابع و ذخایر آنها در حال کاهش و امنیت غذایی جهانی را دراز مدت تهدید می کنند. از طرف دیگر کودهای معدنی معمولی محلول در آب و در معرض تلفات رواناب هستند، که به طور قابل توجهی بر اکوسیستم محلی و کیفیت آب تأثیر می گذارند (۴۲). بازیابی فسفر از خاکستر لجن فاضلاب با کریستالیزاسیون استروویت، یکی از کاربردی ترین تکنیکها برای جبران افزایش تقاضا و کاهش سرعت تخلیه سنگ های فسفات است (۳۵). استروویت یک ترکیب کریستالی با غلظت

های مولی برابر از منیزیم، آمونیوم و فسفات همراه با شش مولکول آب است. معادله آن در رابطه (۱) نشان داده شده است.



وزن مولکولی استروویت ۲۴۵/۴۳ گرم در مول است، و حلالیت آن به ترتیب از کم محلول تا محلول در شرایط قلیایی و اسیدی متفاوت است. استروویت به دلیل وزن مخصوص کم (۱/۷ گرم سانتی متر مربع) و ساختار ارتورومبیک ممکن است به عنوان یک ماده معدنی نرم توصیف شود (۲۱). استروویت دارای ذرات ستاره مانند، یا بلورهای درشت به رنگ سفید، مایل به زرد یا مایل به قهوه ای می باشد (۳۲). اندازه بلورهای استروویت بسته به شرایط تولید می تواند از ۱۵ میکرومتر تا ۳/۵ میلی متر طول داشته باشد (۵۲). ترکیب شیمیایی استروویت به ترتیب بحدود ۱۳، ۶ و ۱۰ درصد فسفر، نیتروژن و منیزیم دارد (۴۰). استروویت، به عنوان کود آهسته رهش با حلالیت کم، می تواند منبع طولانی مدت فسفر را برای رشد محصولات نسبت به فرم های محلول فسفر فراهم کند، بنابراین با تقاضای گیاه برای فسفر در اواخر فصل رشد بیش تر مطابقت دارد و کارایی استفاده کود را افزایش می دهد (۴۸). انحلال کندتر استروویت همچنین می تواند مقدار فسفر را که جذب ذرات خاک می شود یا توسط فرسایش و روانابها از دسترس گیاه خارج می شود را کاهش دهد (۳۸). بنابراین، این مزایا می توانند به طور بالقوه سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفات و حفظ یا افزایش عملکرد گیاهان با حداقل اثرات زیست محیطی شود. همه این موارد ذکر شده از نظر اقتصادی برای صنعت کشاورزی مفید خواهد بود. در

مطالعات محدودی در رابطه با تاثیر استروویت بر فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی انجام شده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی تاثیر استروویت جایگزین شده با کود سوپر فسفات تریپل بر فراهمی فسفر در خاک و جذب آن در اندام هوایی و ریشه گیاه گندم می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### نمونه برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن

به منظور بررسی اثر رسوب استروویت بر فراهمی عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه گیاه گندم، تعدادی نمونه خاک از مناطق مختلف استان کردستان انتخاب و پس از تعیین مقدار فسفر قابل دسترس با روش اولسن (۳۰)، یک خاک آهکی که با مقدار فسفر قابل دسترس کم (۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) انتخاب گردید. خاک منتخب مورد استفاده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری منطقه حاجی‌آباد سیده قروه با مختصات جغرافیایی (۳۵° ۰۷' ۳۶" N) (۴۷° ۵۶' ۱۳" E) نمونه برداری شد و پس از هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای مطالعات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (۷)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در نسبت ۲:۱ خاک به آب، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۴۵)، نیتروژن کل به روش کج‌مدال (۳) و پتاسیم قابل دسترس خاک با استفاده از استات آمونیوم (۳۱) تعیین گردید.

#### آماده سازی گلدان‌ها و اعمال کودهای مورد

##### نیاز

نمونه خاک، هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و در هر گلدان پنج کیلوگرم خاک خشک ریخته شد.

کود سوپرفسفات تریپل از مرکز آموزش، تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان و استروویت مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از روش پاسخگویی سطح<sup>۳</sup> و

مقایسه با کودهای شیمیایی سنتی، استروویت می‌تواند به مقدار برابر و بیش‌تر باعث تولید محصولات زراعی شده و اثرات منفی کم‌تری در رواناب‌های ورودی به آب‌های پایین دست دارد (۶ و ۲۲). همچنین استروویت بهترین گزینه برای محصولاتی است که به کودهای با حلالیت کم نیاز دارند. وجود منیزیم، استروویت را به کودی کارآمد برای گیاهان علفی تبدیل می‌کند زیرا منیزیم عنصر اساسی کلروفیل است (۲۷). از استروویت می‌توان به‌عنوان کود کندرها با سرعت مصرف بالا برای محصولات زراعی، باغی و گیاهان زینتی بدون آسیب رساندن به گیاهان استفاده کرد (۱۱). در مقایسه با کودهای مرسوم و گرانوله فسفر، استروویت دارای محتوای  $P_2O_5$  نسبتاً بالا است و یک کود کندرها است که به دلیل حلالیت کم در محلول‌های خشی کننده pH در هنگام استفاده بیش از حد، ریشه‌ها را نمی‌سوزاند (۳۷). اثر استروویت بر عملکرد در طیف وسیعی از محصولات زراعی از جمله غلات و دانه‌های روغنی یکساله، علف‌ها، حبوبات علوفه‌ای و سبزیجات ارزیابی شده است (۱۷). پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که جذب فسفر در گیاهان سورگوم، ذرت، ذرت علوفه‌ای، چاودار و آفتابگردان کوددهی شده با استروویت برابر یا بیش‌تر از کود سوپر فسفات تریپل بود (۴۳). تالبویز<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در شرایط آزمایشگاهی دلیل این تفاوت را به تولید اسیدهای آلی یا آنیون‌های که توسط ریشه‌های محصولات ترشح می‌شوند نسبت داد (۳۸) این درحالی است که رج و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) نتوانستند این اثر را با استفاده از غلظت‌های ضعیف‌تر اسیدهای آلی باز تولید کنند (۳۳). رابطه بین تولید اسید آلی/آنیون و پاسخ محصولات به استروویت مستقیماً در گیاهان زراعی آزمایش نشده است. با این حال مطالعات فراوان نشان می‌دهند که پاسخ محصولات به استروویت بیش‌تر از پاسخ به سایر کودهای فسفر بازیافت شده یا سنگ فسفات در طیف وسیعی از خاک‌ها بوده است (۲۶) و (۴۹). فسفر از مهم‌ترین و پرکاربردترین نهاده‌ها در نظام‌های تولید به منظور افزایش عملکرد محسوب می‌شود. از آنجاکه

1 - Talboys

2 - Rech et al

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

اعمال گردید. بر اساس آزمون خاک و وزن خاک گلدان‌ها عناصر نیتروژن و پتاسیم با احتساب مقدار موجودشان در استروویت، از منبع‌های اوره ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) و سولفات پتاسیم ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) تأمین شدند.

### آزمایش گلدانی

در این پژوهش، به‌علت پایین بودن حلالیت استروویت در آب و برای غلبه بر کمبود احتمالی فسفر در اوایل فصل رشد گیاه، از نسبت‌های مختلف استروویت (S) با کودهای تجاری فسفر (P) شامل ۱۰۰ به صفر (S100:P0)، ۷۵ به ۲۵ (S75:P25)، ۵۰ به ۵۰ (S50:P50)، ۲۵ به ۷۵ (S25:P75) صفر به ۱۰۰ (S0:P100) استفاده شد (۱۸). مقدار کاربرد استروویت بر اساس مقدار فسفر کل ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) سوپر فسفات محاسبه شد (۹). بدین منظور آزمایش گلدانی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور نسبت استروویت و کود فسفر در شش سطح (S0:P0، S0:P100، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و مقدار کاربرد فسفر در سه سطح (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار) در ۳ تکرار اجرا گردید. جهت انجام آزمایش تعداد ۱۰ عدد بذر گندم در هر گلدان کشت گردید که پس از دو هفته به ۴ عدد کاهش یافت. جهت حذف اثرات محیطی در طول دوره رشد، جای گلدان‌ها به‌صورت تصادفی تغییر داده شد. عملیات آبیاری (آب مقطر) و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت مزرعه به‌طور وزنی حفظ شد.

### اندازه‌گیری پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه گندم

پس از گذشت ۱۰ هفته (شروع گلدهی)، گیاهان به‌صورت کف‌بر برداشت شدند و گیاه به تفکیک اندام هوایی و ریشه با آب شهری سپس با آب مقطر شسته و روی تورهای پلاستیکی پخش شد تا آب اضافی موجود در سطح آنها حذف شود سپس نمونه‌ها داخل آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند آنگاه ویژگی‌های رشد رویشی شامل وزن تازه و خشک اندام هوایی و ریشه اندازه‌گیری گردید. هضم نمونه‌های گیاهی با روش

طراحی مرکب مرکزی<sup>۱</sup> در نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>۲</sup> بهینه‌سازی شد. برای تولید استروویت ابتدا لجن فاضلاب خام به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس خرد و آنگاه از الک ۱۰ مش ( $< 2\text{mm}$ ) عبور داده شد. سپس در محدوده دمایی ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در یک کوره الکتریکی سوزانده و در دمای اتاق خنک شد (۱۴ و ۵۱). از روش سطح پاسخ برای بررسی تاثیر سه فاکتور اصلی غلظت اسید سولفوریک (۰/۲ تا ۰/۸ مول بر لیتر)، نسبت جامد به مایع (۲۰ تا ۱۵۰ میلی لیتر بر گرم) و زمان (۰/۵ تا ۴ ساعت) برای استخراج فسفر از لجن فاضلاب (۱۴، ۲۵ و ۵۱) و برای بازیابی آن به‌صورت استروویت تاثیر سه فاکتور نسبت N/P (۱ تا ۲) نسبت Mg/P (۱ تا ۲) و pH (۸ تا ۱۱) بهینه‌سازی شد (۵۱ و ۵۳). لازم به ذکر است که برای جداسازی فلزات سنگین از محلول حاصل از فرآیند لیچینگ از رزین تبدالی (AG 50W-X8) و برای رسوب کریستال استروویت از کلراید منیزیم ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) و کلراید آمونیوم ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) به‌عنوان منبع منیزیم و آمونیوم استفاده شد (۵۱ و ۵۳). نتایج نشان داد تحت شرایط بهینه، واکنش ۰/۵ مول بر لیتر اسید سولفوریک در نسبت جامد به مایع ۵۷ میلی لیتر بر گرم به مدت ۲ ساعت ۹۹/۸ درصد فسفر قابل استخراج بود. همچنین بیش‌ترین بازیابی فسفر به‌عنوان استروویت در pH 8 نسبت Mg/P و N/P به ترتیب ۲ و ۱ به دست آمد. برای تعیین فراهمی زیستی فسفر بازیابی شده و همچنین به‌منظور بررسی عملکرد استروویت در کشاورزی، نمونه‌ی جامد در آون با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. آنگاه مقادیر فسفر محلول در آب، فسفر محلول و غیرمحلول در سترات (۱۵) و همچنین غلظت فسفر کل و فلزات سنگین با دستگاه ICP-OES آنالیز شد (۵۱ و ۵۳). آنالیز ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی استروویت در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به پودری بودن استروویت و برای کاهش خطای آزمایش کود سوپر فسفات تریپل و استروویت نیز از الک ۱ میلی‌متر عبور داده شد (شکل ۱)، ۳ روز قبل از کشت به خاک گلدان‌ها

1 - Central composite design

2 - Expert Design

که تقریباً مشابه با مقدار تثوری است (۵۳). همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که گرید کودی استروویت مورد استفاده در پژوهش (۹۷/۱۰-۷/۰-۵/۲۹) و کود سوپرفسفات تریپل برابر با مقادیر (۰-۴۶-۰) بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر نوع تیمار کودی ( $P < 0/01$ ) و سطوح مصرف استروویت ( $P < 0/01$ ) و اثر متقابل آنها بر وزن تازه اندام هوایی گیاه گندم در سطح احتمال پنج درصد ( $P < 0/05$ ) معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین اثر نوع و سطوح تیمار کودی استروویت و اثر متقابل آنها بر وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ( $P < 0/01$ ) معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مختلف استروویت نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپرفسفات تریپل در هر سه سطوح کودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار وزن تازه اندام هوایی گندم افزایش یافت به نحوی که بیش‌ترین مقدار وزن تازه اندام هوایی با میانگین ۷/۷۹ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار بدست آمد هر چند نسبت به تیمار S100:P0 کود استروویت با میانگین ۷/۳۱ گرم در گلدان سطح ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۳/۲۵ گرم در گلدان مربوط تیمار شاهد سطح ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار بود (جدول ۴). همچنین بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی گندم با میانگین ۱/۱۳۰ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد استروویت (S100:P0) و ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل (S0:P100) ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات در هکتار با میانگین ۰/۹۳۴ و ۰/۷۱۸ گرم در گلدان به ترتیب افزایشی معادل با ۱۷/۳۴ و ۳۶/۴۶ درصد داشت.

خاکستری خشک انجام گرفت (۱۹). پس از آن غلظت فسفر در زیست توده اندام هوایی و ریشه با روش مولیدات وانادات (روش زرد) و جذب کل فسفر از خاک هر گلدان (حاصل ضرب وزن ماده خشک در غلظت فسفر در گیاه)، غلظت و جذب نیتروژن پس از هضم با اسید سولفوریک به روش کجدال (۲۹) به عنوان پاسخ‌های گیاهی به استروویت در نظر گرفته شد. پس از برداشت، بلافاصله از خاک گلدان‌ها نمونه برداری و پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. پس از عصاره‌گیری فسفر خاک به روش اولسن، مقدار فسفر خاک به روش رنگ سنجی تعیین شد (۳۰). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح احتمال ۵ درصد) استفاده شد. همچنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel ۲۰۱۶ استفاده شد.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. خاک دارای قابلیت هدایت الکتریکی برابر با ۰/۳۷۲ دسی‌زیمنس بر متر و pH برابر با ۷/۱۸ بود. براساس نتایج جدول ۱ خاک دارای کمبود ماده آلی (۰/۵۸)، نیتروژن (۰/۰۶)، فسفر (۲/۵۴) و غیر شور بود. برخی از ویژگی‌های مهم استروویت بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب شهری سنندج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جرم مولی مقدار تثوری استروویت (۲۴۵/۴۰) و جرم مولی نیتروژن (۱۴)، فسفر (۳۰/۱) و منیزیم (۲۴/۳۰)، کود استروویت تثوری با نسبت مولی ۱:۱:۱ و محتوایی استروویت ۱۰۰ درصد دارای مقادیر ۱۲/۶ درصد فسفر، ۵/۷ درصد نیتروژن و ۹/۹ درصد منیزیم است (۵۳). با توجه به مقادیر استروویت تثوری و مقادیر موجود در جدول ۲، استروویت مورد استفاده در این پژوهش دارای ۱۳/۱ درصد فسفر، ۵/۴ درصد نیتروژن و ۱۰/۳ درصد منیزیم با نسبت مولی P: N: Mg ۱/۲: ۱/۰: ۰/۹ و محتوایی استروویت ۹۴/۶ درصد

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

جدول (۱) برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش قبل از کاشت

Table(1) Some physico-chemical properties of soil tested before planting

پ هاش	قابلیت هدایت الکتریکی	پتاسیم قابل دسترس	فسفر قابل دسترس	نیترژن کل	کربن آلی	شن	سیلت	رس	بافت خاک
pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	N (%)	OC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
7.18	0.372	260	2.54	0.06	0.58	31	37	32	لوم رسی

جدول (۲) برخی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی استروویت مورد استفاده در پژوهش

Table (2) Some physico-chemical properties of struvite used in this study

سوپر فسفات تریپل	استروویت	ویژگی‌ها	سوپر فسفات تریپل	استروویت	ویژگی‌ها
TSP	Struvite	Parameters	TSP	Struvite	Parameters
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> MgPO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	فرمول شیمیایی	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> MgPO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	فرمول شیمیایی
<50	10.9	آرسنیک As (mg L <sup>-1</sup> )	>39	12.46	فسفر محلول در آب Water soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
<25	0.28	کادمیم Cd (mg L <sup>-1</sup> )	-	15.25	فسفر محلول در سیترات Citrate-soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
<50	3	سرب Pb (mg L <sup>-1</sup> )	-	2.25	فسفر غیر محلول در سیترات Citrate-soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
-	1250	آهن Fe (mg L <sup>-1</sup> )	46	29.97	فسفر کل (درصد) Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
-	605	روی Zn (mg L <sup>-1</sup> )	-	16.40	(درصد) اکسید منیزیم MgO (%)
-	114	مس Cu (mg L <sup>-1</sup> )	-	1.19	اکسید کلسیم (درصد) CaO (%)
-	310	منگنز Mn (mg L <sup>-1</sup> )	-	0.80	اکسید سدیم (درصد) Na <sub>2</sub> O (%)
-	55	نیکل Ni (mg L <sup>-1</sup> )	-	0.10	اکسید پتاسیم (درصد) K <sub>2</sub> O (%)
-	43	کروم Cr (mg L <sup>-1</sup> )	-	0.99	اکسید آلومینوم (درصد) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)





شکل (۱) استروویت بازیابی شده (فسفات آمونیوم منیزیم) و کود فسفر تجاری (سوپرفسفات تریپل)  
**Figure (1) Recovered struvite (magnesium ammonium phosphate) and commercial phosphorus fertilizer (triple superphosphate)**

ال دیوانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) در بررسی اثر استروویت بازیابی شده از فاضلاب صنعتی مصر در مقایسه با کودهای شیمیایی (نترات آمونیوم، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم) در یک آزمایش گلدانی ۴۵ روزه بر روی رشد گیاه لویا در خاکی با اسیدیته ۸/۰۱ گزارش کردند که کاربرد استروویت می‌تواند عملکرد وزن تر و خشک گیاه لویا را در مقایسه با کود شیمیایی به ترتیب معادل ۵۴ و ۵۸ درصد افزایش دهد (۱۰). در همین راستا ریو و لی<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) در بررسی اثر استروویت بازیابی شده از فاضلاب خوکی و استفاده از آن به‌عنوان کود نشان دادند که کاربرد استروویت وزن تر و خشک گیاه کاهو را به‌طور قابل توجهی نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. آنها همچنین نشان دادند که کاربرد ۱۱۰ کیلوگرم در هکتار استروویت به‌عنوان کود نیتروژن باعث افزایش ۲۰۰ و ۲۷۵ درصدی وزن تر و خشک گیاه کاهو نسبت به کود شیمیایی شد. آن‌ها دلیل این افزایش را به فسفر و منیزیم موجود در استروویت نسبت دادند (۳۴). منیزیم نقش مهمی در افزایش فتوسنتز گیاهان دارد زیرا جزء کلروفیل و عامل فعال کننده

آنزیم‌ها است (۱۳ و ۴۱). گونزالس-پونس و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۹) گزارش کردند که استروویت به دلیل افزایش مقدار منیزیم و همچنین اثر هم افزایی آن بر جذب فسفر، در افزایش عملکرد کاهو نسبت به سوپر فسفات تریپل موثرتر است (۱۵). اثر بخشی استروویت بر وزن تازه و خشک اندام هوایی را می‌توان به محتوای عناصر غذایی موجود در آن نسبت داد (۴) و (۱۲). اگرچه حلالیت استروویت کم است، اما برخی از گیاهان توانایی تولید برخی اسیدهای آلی را دارند که حلالیت استروویت را افزایش دهند (۱۲). گندم یکی از گیاهانی است که توانایی تولید اسیدهای آلی از ریشه را دارد. استفاده از استروویت در مقایسه با کودهای شیمیایی دیگر می‌تواند مقدار بیش تری منیزیم و پتاسیم به خاک اضافه کند (۴۷). علاوه بر این، عرضه منیزیم باعث افزایش تجمع کلسیم، مس و فسفر در اندام هوایی گیاهان می‌شود (۴۷).

3 - González-Ponce

1 - El Diwani *et al*

2 - Ryu and Lee *et al*

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر وزن تازه و خشک اندام هوایی و ریشه در گیاه گندم  
 Table (3) Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on fresh and dry weight of shoots and root in wheat

میانگین مربعات Mean Square					
وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تازه ریشه Root fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن تازه اندام هوایی Shoot fresh weight	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variance
0.061**	7.13**	0.335**	9.39**	2	سطوح کودی Fertilizer levels
0.037**	2.51**	0.110**	10.35**	5	تیمار کودی Fertilizer treatments
0.004**	0.456**	0.022**	0.778*	10	سطوح * تیمار کود Fertilizer level*
0.0003	0.075	0.0009	0.358	36	treatments خطا
6.76	12.16	4.39	11.23		Error ضریب تغییرات C.V (%)

ns, \*\*, \* و \* به ترتیب غیر معنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک و پنج درصد می باشد.

ns, \* and \*\* are non-significant, significant  $P \leq 0.05$  and  $P \leq 0.01$ , respectively

تیمار شاهد بدست آمد و کمترین مقدار آن با میانگین ۰/۱۷ گرم مربوط به تیمار کاربرد استروویت بود (۴۷). در همین راستا اردال و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۳) در بررسی مقایسه استروویت با کودهای شیمیایی (سوپر فسفات تریپل، کود ۲۰-۲۰-۲۰، مونو دی آمونیوم فسفات) نشان دادند که کاربرد تیمارهای مورد بررسی بر طول و وزن ریشه در سطح احتمال یک درصد ( $P < 0.01$ ) معنی دار شد به نحوی که بیشترین وزن تازه ریشه با میانگین ۱۱/۸ گرم در گیاه مربوط به کاربرد تیمار مونو آمونیوم فسفات بود که نسبت به تیمار دی آمونیوم فسفات، کود ۲۰-۲۰-۲۰، سوپر فسفات تریپل و استروویت به ترتیب با میانگین ۱۱/۴، ۱۰/۸، ۱۱/۱ و ۹/۶ گرم در گلدان افزایشی معادل با ۳/۳۸، ۸/۴۷، ۵/۹۳ و ۱۱/۶۴ درصد داشت (۱۲). همچنین نتایج آنها نشان داد که کمترین مقدار طول ریشه با میانگین ۱۲/۲ سانتی متر از کاربرد تیمار استروویت و بیشترین مقدار آن با میانگین ۲۱/۵ سانتی متر از کاربرد تیمار مونو فسفات آمونیوم بدست آمد (۱۲). در واقع می توان

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که نوع و سطوح تیمار کودی استروویت و اثر متقابل آنها بر وزن تازه و خشک ریشه گیاه گندم در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین های اثر تیمارهای مختلف استروویت نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی وزن-تر و خشک ریشه گندم کاهش یافت به نحوی که بیشترین مقدار وزن تازه و خشک ریشه به ترتیب ۳/۳۰ و ۰/۴۳ گرم در گلدان مربوط به تیمار شاهد (S0:P0) بود (جدول ۴). جایگزین کردن استروویت با کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطح کودی باعث افزایش وزن تازه و خشک اندام هوایی شد. این درحالیست که بر وزن تازه و خشک ریشه گیاه گندم نتیجه معکوس داشت (شکل ۲). ون و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) در بررسی اثر استروویت در مقایسه با سوپر فسفات ساده بر جذب عناصر غذایی در گیاه کلم و کاهو گزارش کردند که بیشترین وزن تازه ریشه با میانگین ۰/۲۷ گرم از

گندم افزایش می‌یابد (جدول ۶). بیش‌ترین مقدار غلظت نیتروژن اندام هوایی با میانگین  $4/82$  درصد از تیمار  $S100:P0$  ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار  $S75:P25$  از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و نسبت به تیمار  $S100:P0$  ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار به ترتیب با میانگین  $4/22$  و  $3/30$  درصد به ترتیب افزایشی معادل با  $12/44$  و  $31/53$  درصد داشت (جدول ۶). همچنین بیش‌ترین مقدار جذب نیتروژن  $5/44$  گرم در گلدان از تیمار  $S75:P25$  ۱۵۰ کود سوپر فسفات بدست آمد هر چند نسبت به تیمار  $S75:P25$  ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار به ترتیب با میانگین  $2/69$  و  $1/99$  گرم در گلدان افزایشی معادل  $50/55$  و  $63/41$  درصد داشت و کمترین مقدار جذب نیتروژن با میانگین  $1/40$  مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۶).

اینگونه بیان کرد که کود استروویت نسبت به سایر تیمارها دارای طول ریشه کوتاه‌تری هستند که دلیل این امر را می‌توان تلاش ریشه‌ها برای رسیدن و دسترسی به عناصر غذایی گزارش کرد (۱۲ و ۴۴). اگرچه ریشه‌ها در شرایط استفاده از استروویت هستند، وزن آنها نزدیک سایر کودهای کارآمد است که این مسئله نشان می‌دهد که ساختار ریشه گیاهان رشد یافته در شرایط استفاده از استروویت کوتاه‌تر، اما متراکم تر است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های اثر نوع تیمار کودی و سطوح مختلف استروویت و اثر متقابل آنها بر غلظت نیتروژن اندام هوایی و ریشه گیاه گندم در سطح احتمال یک درصد ( $P < 0/01$ ) معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که با افزایش سطوح مصرف و همچنین زمانی که استروویت جایگزین کود سوپر فسفات تریپل می‌شود مقدار نیتروژن در اندام هوایی و ریشه گیاه



شکل (۲) مقایسه اندام هوایی و ریشه گیاه گندم الف) تیمار کود دهی شده با استروویت ب) تیمار شاهد (بدون کود فسفر)  
Figure(2) Comparison of shoots and root of wheat plant a) struvite b) Blank (without P fertilizer)

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

جدول (۴) نتایج مقایسه میانگین تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در گیاه گندم  
Table (4) Means comparison of the effect of different levels of Struvite on fresh and dry weight of shoots and root in wheat

وزن خشک ریشه (گرم در گلدان) Root dry weight (g pot <sup>-1</sup> )	وزن تازه ریشه (گرم در گلدان) Root fresh weight (g pot <sup>-1</sup> )	وزن خشک اندام هوایی (گرم در گلدان) shoot dry weight (g pot <sup>-1</sup> )	وزن تازه اندام هوایی (گرم در گلدان) shoot fresh weight (g pot <sup>-1</sup> )	تیمارها treatments	منابع resource
0.413a	3.09a	0.498k	3.25g	شاهد S0:P0	
0.311c	3.05ab	0.529k	4eg	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
0.333bc	2.99ab	0.538i	4.82ef	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
0.332bc	2.99ab	0.582ij	5.18de	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 50 kg TSP/ha
0.365b	2.60bc	0.619hi	5.41de	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
0.327c	2.52c	0.635gh	5.43de	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
0.430a	3.30a	0.498k	3.48g	شاهد S0:P0	
0.275de	1.83d	0.672fg	5.27de	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
0.306cd	2.39c	0.679efg	5.50de	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
0.304cd	2.49c	0.699def	5.53de	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 100 kg TSP/ha
0.274de	1.75d	0.727de	5.52de	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
0.253ef	1.81d	0.744d	5.88cd	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
0.430a	3.30a	0.531jk	3.33g	شاهد S0:P0	
0.169jk	1.13ef	0.718def	5.83cd	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
0.198hj	1.54de	0.846c	5.87cd	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
0.235fg	1.46def	0.902b	6.53bc	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP/ha
0.155k	1.24ef	1.130a	7.79a	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
0.203gh	1.03f	0.934b	7.31ab	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at  $p < 0.05$  by LSD Test.

گیاه گندم گزارش کردند که کاربرد S100:PO ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار در مقایسه با S0:P100 می تواند مقادیر کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید را به ترتیب به میزان ۷/۷۸، ۳/۸۲، ۶/۴۴ و ۶/۸۴ درصد افزایش دهد (۲۸). ریو و لی (۲۰۱۶) در بررسی ۱۱۰ کیلوگرم کود نیتروژن از چهار منبع کود شیمیایی، کود کمپوست، کود آلی و استروویت بازیابی شده از فاضلاب خوکی در کشت گلخانه ای ۵۴ روزه گیاه کاهو گزارش کردند که بیشترین مقدار نیتروژن اندام هوایی با میانگین ۷۱۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار کود استروویت بدست آمد که نسبت به تیمارهای کود کمپوست، کود آلی، کود شیمیایی و تیمار شاهد به ترتیب با میانگین ۴۵۸۶، ۴۲۱۸، ۴۹۵۴ و ۱۶۸۳ میلی گرم بر کیلوگرم افزایشی معادل با ۳۵/۵۶، ۴۰/۷۳، ۳۰/۳۹ و ۷۶/۳۵ درصد داشت (۳۴).

با توجه به این نکته که خاک مورد استفاده در پژوهش از لحاظ کربن آلی (۵۸/۰ درصد) و نیتروژن خاک (۰/۰۶ درصد) فقیر بود (جدول ۲)، لذا هر سه سطح کودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار باعث افزایش مقدار غلظت و جذب نیتروژن در گیاه گندم شد (جدول ۶). در واقع می توان اینگونه بیان کرد در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار زمانیکه کود استروویت به طور کامل جایگزین سوپر فسفات تریپل می شود جذب نیتروژن توسط گیاه گندم به ترتیب معادل با ۱۸/۲۹، ۳۹/۸۰ و ۵۵/۱۱ درصد افزایش می یابد (جدول ۶). علاوه بر نیتروژن، منیزیم یکی از عناصر موجود در کود استروویت می باشد که برای رشد گیاهان ضروری بوده و نقش اصلی آن شرکت در ساختمان کلروفیل است. نظری و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی ارزیابی تاثیر جایگزینی استروویت با کود سوپر فسفات تریپل بر شاخص های فیزیولوژیکی در

جدول (۵) نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر غلظت و جذب نیتروژن اندام هوایی و ریشه گندم  
Table (5) Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on N concentration and uptake of shoots and root of wheat

میانگین مربعات					
Mean Square					
جذب نیتروژن ریشه Root N uptake	جذب نیتروژن اندام هوایی Shoot N uptake	غلظت نیتروژن ریشه Root N concentration	غلظت نیتروژن اندام هوایی Shoot N concentration	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variance
0.030**	14.02**	1.268**	4.08**	2	سطوح کودی Fertilizer levels
0.068**	5.59**	1.141**	2.75**	5	تیمار کودی Fertilizer treatments
0.0008**	1.411**	0.189**	0.469**	10	سطوح * تیمار کود Fertilizer level* treatments
0.0014	0.014	0.0006	0.0019	36	خطا Error
7.57	1.41	1.38	1.27		ضریب تغییرات C.V (%)

ns و \* به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک می باشد.

ns, \* and \*\* are non-significant, significant  $P \leq 0.05$  and  $P \leq 0.01$ , respectively

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

جدول (۶) نتایج مقایسه میانگین تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر غلظت و جذب نیتروژن اندام هوایی و ریشه گیاه گندم  
Table (6) Means comparison of the effect of different levels of Struvite on N concentration and uptake of shoot and root of wheat plant

جذب نیتروژن ریشه (گرم در گلدان) Root N uptake (gr pot <sup>-1</sup> )	جذب نیتروژن اندام هوایی (گرم در گلدان) Shoot N uptake (gr pot <sup>-1</sup> )	غلظت نیتروژن ریشه (درصد) Root N concentration (%)	غلظت نیتروژن اندام هوایی (درصد) Shoot N concentration (%)	تیمارها treatments	منابع resource
0.582abc	1.40l	1.41j	2.81j	شاهد S0:P0	
0.606ab	1.48l	1.41ij	2.81j	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	
0.439fg	1.72k	1.45hi	2.96i	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S25:P75	
0.487ef	1.74k	1.46h	2.99i	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپرفسفات S50:P50	۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار 50 kg TSP/ha
0.614a	1.99fg	1.68g	3.21h	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپرفسفات S75:P25	
0.598ab	2.09hi	1.82f	3.30g	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
0.606ab	1.40l	1.41j	2.81i	شاهد S0:P0	
0.389gh	1.89jk	1.41ij	2.81i	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	
0.510de	2.23h	1.66g	3.29g	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S25:P75	
0.568abcd	2.48g	1.86ef	3.55f	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپرفسفات S50:P50	۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار 100 kg TSP/ha
0.545bcde	2.69f	1.99d	3.70e	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپرفسفات S75:P25	
0.555abcd	3.14e	2.19c	4.22c	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
0.582abc	1.40l	1.41j	2.81j	شاهد S0:P0	
0.248j	2.02ij	1.46h	2.81j	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	
0.374i	3.35d	1.88e	3.96d	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S25:P75	
0.534cde	4.10c	2.26b	4.55b	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپرفسفات S50:P50	۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار 150 kg TSP/ha
0.444fg	5.44a	2.84a	4.82a	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپرفسفات S75:P25	
0.580abc	4.50b	2.85a	4.82a	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at  $p < 0.05$  by LSD Test

جذب نیتروژن باشد (۴۶). در پژوهشی دیگر رحمان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) گزارش کردند تنها ۲ درصد از کل نیتروژن عرضه شده در خاک تیمار شده با استروویت از بین می‌رود این درحالیست که برای کودهای شیمیایی رایج (سوپرفسفات + اوره) این مقدار ۷/۱ درصد بود (۳۲).

مطابق با جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۷) نوع تیمار و سطوح مختلف کودی استروویت و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار غلظت فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه گندم در سطح یک درصد ( $P < 0/01$ ) معنی‌دار شد (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه گیاه گندم در هر سه سطح کودی افزایش یافت به نحوی که بیش‌ترین غلظت فسفر اندام هوایی گندم با میانگین ۰/۱۷۴ درصد از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S100:P0 با میانگین ۰/۱۶۹ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۰/۰۹۴ درصد در تیمار شاهد (S0:P0) بدست آمد (جدول ۸). بیش‌ترین مقدار جذب فسفر در گیاه گندم با میانگین ۰/۱۹۷ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد کود استروویت (S100:P0) و ۱۰۰ کود سوپرفسفات تریپل (S0:P100) با میانگین‌های ۰/۱۵۸ و ۰/۱۰۹ گرم در گلدان به ترتیب افزایشی معادل با ۱۹/۷۹ و ۴۴/۶۷ درصد داشت (جدول ۸). با توجه به این نکته که خاک مورد استفاده در پژوهش از لحاظ کربن آلی (۰/۵۸ درصد) و فسفر اولسن خاک (۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) فقیر بود (جدول ۲)، لذا هر سه سطح کودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار باعث افزایش مقدار غلظت و جذب فسفر در گیاه گندم شد (جدول ۸). در واقع می‌توان اینگونه بیان کرد در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار زمانی‌که کود استروویت به طور کامل جایگزین سوپر فسفات تریپل می‌شود جذب فسفر توسط گیاه گندم به ترتیب معادل با ۱۸/۶۰، ۲۲/۸ و ۳۱/۰۱ درصد افزایش می‌یابد

مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد بیش‌ترین مقدار غلظت نیتروژن ریشه گیاه گندم با میانگین ۲/۸۵ درصد از تیمار S100:P0 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت. در تیمار ۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار زمانی‌که استروویت به‌طور کامل جایگزین کود استروویت می‌شود مقدار غلظت نیتروژن ریشه ۲۲/۵۲ درصد تغییر می‌کند این تغییر برای تیمار ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار به ترتیب برابر با ۳۵/۶۱ و ۴۸/۷۷ درصد بود که نشان می‌دهد کود استروویت علاوه بر فسفر می‌تواند غلظت و جذب نیتروژن را افزایش دهد که می‌تواند به علت مواد غذایی موجود در کود و اثر هم‌افزایی فسفر بر مقدار نیتروژن باشد (جدول ۶). بخش آمونیاکی استروویت شکل‌های نترات را آزاد می‌کند که تأمین طولانی‌مدت عناصر غذایی را تضمین می‌کند. این ویژگی اجازه می‌دهد تا کاربرد مستقیم و دوز بالای استروویت، نسبت به کودهای معمولی برای گیاهان خطر کم‌تری داشته باشد (۲۴). از طرفی نسبت نیتروژن به فسفر پایین در استروویت سبب شده است که نیتروژن برای رشد بهینه گیاه کافی نباشد. در تغذیه گیاهان با توجه به این نکته که مقدار نیتروژن اندام هوایی و ریشه گیاهان به مراتب بیش‌تر از مقدار فسفر است. بنابراین تأمین نیتروژن خاک و گیاه با سایر منابع نیتروژنی راحت‌تر است. از استروویت به‌عنوان کود فسفر استفاده می‌شود (۱۷ و ۲۴). در همین راستا وانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۳) در بررسی تاثیر استروویت بازیابی شده از کود مرغی به‌عنوان کود فسفر بر عملکرد و جذب مواد مغذی در سیستم متناوب برنج-گندم در یک آزمایش مزرعه‌ای دو ساله گزارش کردند که استروویت به‌دلیل محتوای نیتروژن پایین و مقدار و سرعت انحلال کم زمانی که همراه با کود اوره استفاده شود نسبت به زمانی که کود اوره به‌تنهایی مصرف شود جذب نیتروژن را بیش‌تر افزایش می‌دهد (۴۶). از طرفی پتانسیل بالای استروویت برای کاهش از دست دادن نیتروژن ممکن است دلیل دیگری برای

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

(جدول ۸). وانگ و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی تاثیر استروویت بازیابی شده از کود مرغی (با مقادیر ۲۴/۶ درصد فسفر  $P_2O_5$ ، ۵ درصد نیتروژن و ۱۲ درصد منیزیم) به عنوان کود فسفر بر عملکرد، جذب مواد مغذی در سیستم متناوب برنج-گندم در یک آزمایش مزرعه‌ای دو ساله نشان دادند که کاربرد تیمارهای (۱) ۹۶ کیلوگرم فسفر در هکتار با ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به عنوان کود معمولی، (۲) جایگزین ۱۰۰ درصد استروویت با کود فسفر (۳) جایگزین ۵۰ درصد استروویت با کود فسفر (۴) بدون استفاده از نیتروژن و (۵) بدون استفاده از فسفر می‌تواند غلظت و جذب فسفر گیاه گندم در هر دو سال زراعی ارتقا دهد به نحوی که بیشترین میزان غلظت

فسفر گیاه گندم در سال زراعی دوم با میانگین ۴/۳۱ گرم در کیلوگرم گیاه از تیمار ۱۰۰ جایگزین کود استروویت بدست آمد که نسبت به تیمار ۵۰ درصد جایگزین استروویت و کود معمولی به ترتیب با میانگین ۳/۵۶ و ۴ گرم در کیلوگرم گیاه افزایشی معادل با ۱۷/۴۰ و ۷/۱۹ درصد داشت (۴۶). همچنین بیشترین و کمترین مقدار جذب فسفر با میانگین ۳۰/۸ و ۱۲/۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به ترتیب از تیمار ۱۰۰ جایگزینی استروویت و تیمار بدون نیتروژن بدست آمد. آنان دلیل افزایش جذب فسفر گیاه را به حالیت بالای استروویت در اسید گزارش کردند (۴۶).

جدول (۷) نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر زیست فراهمی فسفر در خاک و گیاه گندم

Table (7) Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on Phosphors availability in soil and wheat plant

میانگین مربعات Mean Square						
فسفر اولسن خاک P Olsen soil	جذب فسفر ریشه Root P uptake	جذب فسفر اندام هوایی Shoot P uptake	غلظت فسفر ریشه Root P concentration	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variance
62.56**	0.0003**	0.0159**	0.0034**	0.0029**	2	سطوح کودی Fertilizer levels
106.09**	0.00004**	0.007**	0.0021**	0.0043**	5	تیمار کودی Fertilizer treatments
5.28**	0.00003**	0.001**	0.0002**	0.00020**	10	سطوح * تیمار کود Fertilizer level* treatments
0.288	0.00000	0.00002	0.00001	0.00001	36	خطا Error
4.20	8.04	4.90	3.22	2.86		ضریب تغییرات C.V (%)

ns و \*\* به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک می‌باشد.

ns and \*\* are non-significant and significant  $P \leq 0.01$ , respectively



جدول (۸) نتایج مقایسه میانگین تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر زیست فراهمی فسفر در خاک و گیاه گندم  
**Table (8) Means comparison of the effect of different levels of Struvite on Phosphors availability in soil and wheat plant**

فسفر اولسن خاک (میلی گرم بر کیلوگرم) P Olsen soil (mg/kg)	جذب فسفر ریشه (گرم در گلدان) Root P uptake (gr pot <sup>-1</sup> )	جذب فسفر اندام هوایی (گرم در گلدان) Shoot P uptake (gr pot <sup>-1</sup> )	غلظت فسفر ریشه (درصد) Root P concentration (%)	غلظت فسفر اندام هوایی (درصد) Shoot P concentration (%)	تیمارها treatments	منابع resource
5.67j	0.033abde	0.047n	0.081f	0.094h	شاهد S0:P0	
8.55i	0.030def	0.070m	0.099e	0.134ef	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
9.72h	0.032def	0.072lm	0.097e	0.124g	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
11.64gf	0.032def	0.074lm	0.097e	0.128fg	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 50 kg TSP/ha
12.28ef	0.035abc	0.079kl	0.100e	0.128fg	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
12.65de	0.032bcde	0.086jk	0.100e	0.135e	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
5.67j	0.035abcd	0.047n	0.081f	0.094h	شاهد S0:P0	
9.83i	0.030ef	0.091ij	0.111d	0.136e	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
9.99h	0.037a	0.091hi	0.121c	0.144d	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
11.36g	0.036ab	0.101gh	0.121c	0.144d	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 100 kg TSP/ha
12.92de	0.033bcde	0.112ef	0.121c	0.154bc	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
13.29d	0.031def	0.118e	0.124c	0.159b	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	
5.67j	0.032def	0.050n	0.079f	0.094h	شاهد S0:P0	
10.36h	0.021g	0.109fg	0.125bc	0.152c	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	
13.29d	0.024g	0.130d	0.123c	0.154bc	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	
15.26c	0.030ef	0.139c	0.130b	0.155bc	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP/ha
17.51b	0.021g	0.197a	0.140a	0.174a	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	
18.95a	0.028f	0.158b	0.140a	0.169a	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at p<0.05 by LSD Test

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین غلظت فسفر ریشه گندم با میانگین  $0/140$  درصد از تیمار S100:P0 (۱۰۰ درصد کود استروویت) ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S75:P25 از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۸). همچنین بیش‌ترین مقدار جذب فسفر ریشه با میانگین  $0/037$  گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد (جدول ۸). با توجه به این نکته که خاک مورد استفاده در پژوهش از لحاظ کرن آلی ( $0/58$  درصد) و فسفر اولسن خاک ( $2/54$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) فقیر بود (جدول ۲)، لذا هر سه سطح کودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار باعث افزایش مقدار غلظت فسفر در ریشه و اندام‌هوایی در گیاه گندم شد و کم‌ترین مقدار آن با میانگین  $0/079$  درصد از تیمار S0:P0 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد (جدول ۶). در واقع می‌توان اینگونه بیان کرد در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار زمانیکه کود استروویت به‌طور کامل جایگزین سوپر فسفات تریپل می‌شود غلظت فسفر ریشه توسط گیاه گندم به‌ترتیب معادل با ۱،  $10/48$  و  $10/71$  درصد افزایش می‌یابد (جدول ۸). در همین راستا رچ و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی حلالیت، انتشار و جذب فسفر با سه استروویت مختلف گزارش کردند که فسفر محلول در سترات استروویت تولید شده از کود مرغی، کود خوکی و فاضلاب شهری به‌ترتیب ۱۸، ۲۸ و ۲۹ درصد بود، این در حالیست که حلالیت در آب آنها کم‌تر و در حدود ۲-۳ درصد است (۳۳). حلالیت فسفر در سترات به این معنی است که انحلال استروویت می‌تواند توسط اسیدهای آلی تراوش شده توسط ریشه گیاهان، به‌ویژه برای گندم با ریشه‌های متراکم ایجاد شود (۳۲). در کودهای فسفر تجاری با حلالیت بالا (سوپر فسفات تریپل)، یون‌های فسفات که توسط محصولات جذب نمی‌شوند، به سرعت توسط خاک از طریق ترکیب با آهن و کلسیم به‌صورت فسفات‌های نامحلول تثبیت می‌شوند، بنابراین

قابلیت دسترسی برای گیاهان کاهش می‌یابد (۵). با توجه به این نکته که حلالیت استروویت در آب کم است (کم‌تر از ۵ درصد)، فسفر موجود در استروویت به تدریج با رشد محصول از طریق اسید آلی تراوش شده توسط ریشه‌های محصول آزاد شده و عرضه فسفر با تقاضای فسفر هماهنگ است (۵). بنابراین، غلظت فسفر در گیاهان رشد یافته با استروویت بیش‌تر از گیاهان رشد یافته با سایر کودهای فسفر است که توسط دیگر پژوهشگران این امر گزارش شده (۱۲ و ۱۶) و با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. علاوه بر این، نیتروژن و منیزیم موجود در استروویت ممکن است یکی دیگر از عوامل جذب فسفر بیش‌تر به‌دلیل اثر هم-افزایی منیزیم و نیتروژن بر جذب فسفر باشد (۲۰ و ۲۸). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع تیمار کودی و سطوح مصرف استروویت و اثر متقابل آنها بر مقدار فسفر خاک به روش اولسن در سطح احتمال پنج درصد ( $P < 0/01$ ) معنی‌دار شد (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی مقدار فسفر اولسن خاک افزایش یافت به نحوی که بیش‌ترین مقدار فسفر خاک بعد از برداشت گیاه با میانگین  $18/95$  میلی‌گرم بر کیلوگرم از تیمار S100:P0 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S100:P0 ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار با میانگین  $13/29$  و  $12/56$  میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب افزایشی معادل با  $29/86$  و  $33/72$  درصد داشت (جدول ۸). فسفر قابل دسترس به‌عنوان عامل اصلی در ارزیابی ظرفیت فراهمی فسفر و تعیین میزان کودفسفاته در نظر گرفته می‌شود. در خاک‌های آهنکی غلظت فسفر اولسن شاخص خوبی در ارزیابی قابلیت فراهمی فسفر خاک است (۵۰). تیسن مارتنز و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۳) در بررسی تاثیر استروویت و مونو آمونیوم فسفات بر فراهمی

گندم بهاره<sup>۲</sup> (با سطح ترشح اسیدهای آلی کم) قادر به جذب فسفر از استروویت است، که دلیل آن را ترشح بیش تر اسیدهای آلی توسط گندم سیاه نسبت داده دادند، همچنین جذب بیش تر فسفر ممکن است با اسیدی شدن ناحیه ریزوسفر نیز مرتبط باشد (۳۸). تقریباً تمام مطالعاتی که استروویت را با منابع کود فسفر محلول مقایسه کردند به این نتیجه رسیدند که استروویت اثر زراعی برابر با کودهای محلول دارد (۱ و ۴). با توجه به اینکه فسفر قابل دسترس (Olsen-P) به عنوان شاخصی از فسفر قابل دسترس برای گیاه در نظر گرفته می شود. لذا همبستگی بین فسفر استخراج شده توسط عصاره گیر اولسن با شاخص های گیاهی در جدول ۹ آورده شده است. بین مقدار فسفر قابل دسترس خاک، و مقدار وزن تازه اندام هوایی گیاه ( $r=0/82^{**}$ )، وزن خشک اندام هوایی گیاه ( $r=0/87^{**}$ )، جذب نیتروژن اندام هوایی ( $r=0/88^{**}$ ) همبستگی مثبت و معنی داری وجود داشت. همچنین بین مقدار فسفر قابل دسترس خاک، و جذب فسفر اندام هوایی ( $r=0/89^{**}$ ) همبستگی مثبت و معنی داری وجود داشت. نتایج جدول ۹ نشان می دهد همبستگی منفی و معنی داری بین مقدار فسفر قابل دسترس خاک، با وزن تازه ریشه ( $r=0/74^{**}$ ) و وزن خشک ریشه ( $r=0/76^{**}$ )، جذب نیتروژن ریشه ( $r=0/64^{**}$ ) و جذب فسفر ریشه ( $r=0/38^{**}$ ) به دست آمد. برای آگاهی از چگونگی اثرات و مکانیسم های استروویت بر زیست فراهمی فسفر در خاک و جذب آن در گیاه لازم است کاربرد انواع مختلف استروویت بازایی شده از منابع مختلف در آزمون آزمایشگاهی با مقیاس کوچک سپس در آزمایش های گلخانه ای و نهایتاً در شرایط مزرعه مورد آزمون، پژوهش و بهره برداری قرار گیرد.

فسفر در دو نوع خاک، رسی (Olsen P = 5/7 mg/kg، ۸/۱ pH=) و خاک لوم رسی شنی (Olsen P = 10 mg/kg، ۷ pH=) گزارش کردند که ویژگی های خاک و نوع کود بر حلالیت فسفر نقش غالب دارد به نحوی که غلظت فسفر اولسن خاک برای استروویت در هر دو خاک کم تر مونو آمونیوم فسفات بود. این نتایج، همراه با حضور بقایای گرانول استروویت در خاک، نشان می دهد که فسفر موجود در استروویت به میزان کم تری نسبت به فسفات آمونیوم در خاک حل و انتشار می یابد (۳۹). از آنجایی که انحلال فسفر تا حدی توسط گرادیان غلظت فسفر محلول در محلول خاک کنترل می شود، غلظت پایین فسفر محلول در خاک- های اصلاح شده با استروویت پتانسیل بسیار کمی برای انتشار به نواحی دورتر از گرانول ها ایجاد می کند و باعث می شود فسفر آزاد شده از استروویت در نزدیکی گرانول ها بماند (۳۹). در خاک های قلیایی، استروویت به آرامی در خاک حل می شود و فسفر آزاد شده ممکن است فقط در فاصله کوتاهی از دانه های کودی پخش شود (۸). انحلال آهسته استروویت و حرکت محدود فسفر ممکن است خطر از دست دادن فسفر را در محیط نسبت به کودهای محلول کاهش دهد (۸). دگریس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) در بررسی انحلال و اثر بخشی کود تجاری مونو آمونیوم فسفات و استروویت به صورت گرانوله و پودری بر جذب فسفر در گیاه گندم گزارش کردند که انحلال استروویت در خاک به اندازه ذرات بستگی دارد. انحلال استروویت گرانوله بسیار کندتر از استروویت پودری است. نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان داد زمانی که استروویت پودر شده با خاک مخلوط می شود در اثر کاهش اندازه ذرات استروویت سطح تماس کود با خاک افزایش و جذب فسفر در فاز جامد خاک امکان انحلال سریع تر استروویت را فراهم می کند (۸). تالبویز و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که گندم سیاه<sup>۲</sup> (با سطح ترشح اسیدهای آلی زیاد) بهتر از

1 - Degryse *et al*  
2 - buckwheat

نظری و همکاران: اثر کاربرد توأم استروویت بازیابی شده...

جدول (۹) ضریب همبستگی ساده بین صفات مورد مطالعه  
Table (9) Simple correlations coefficients between studied traits

9	8	7	6	5	4	3	2	1	parameter
								1	۱- وزن تازه اندام هوایی Shoot fresh weight
							1	0.83**	۲- وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight
						1	-0.84**	-0.66**	۳- وزن تازه ریشه fresh weight Root
				1	0.86**	-0.84**	-0.71**		۴- وزن خشک ریشه dry weight Root
			1	-0.75**	-0.76**	0.88**	0.81**		۵- جذب نیتروژن اندام هوایی Shoot N uptake
			-0.07**	0.63**	0.40**	-0.24**	-0.15**		۶- جذب نیتروژن ریشه Root N uptake
		1	0.91**	0.96**	-0.87**	-0.85**	0.98**	0.84**	۷- جذب فسفر اندام هوایی Shoot P uptake
	1	-0.55**	-0.46**	-0.47**	0.76**	0.60**	-0.54**	-0.43**	۸- جذب فسفر ریشه Root P uptake
1	-0.38**	0.89**	0.88**	0.88**	-0.76**	-0.74**	0.87**	0.82**	۹- فسفر اولسن خاک P Olsen soil

ns, \*\*, \* و \* به ترتیب غیر معنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک و پنج درصد می باشد.

ns, \* and \*\* are non-significant, significant  $P \leq 0.05$  and  $P \leq 0.01$ , respectively

### نتیجه گیری

انجام این پژوهش در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی کود استروویت نسبت به سوپر فسفات تریپل کارایی بالاتری در رشد رویشی و افزایش زیست فراهمی فسفر داشت لذا برای درک بهتر از استفاده استروویت لازم است با دیگر کودهای فسفره همانند دی آمونیوم فسفات و مونو آمونیوم فسفات‌ها برای گیاهان زراعی مختلف در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین با در نظر گرفتن مزایای مرتبط با فرآیند بازیابی استروویت از لجن فاضلاب و شیرابه‌ها (یعنی حفظ منابع محدود فسفر، جلوگیری از پدیده اوتروفیکاسیون و دفع ایمن ضایعات مملو از مواد غذایی)، لازم است هزینه بالای استخراج و بازیابی فسفر و همچنین حضور فلزات سنگین در استروویت و تعیین سرنوشت این فلزات پس از ورود به خاک و اطمینان از سلامت محصولات کشاورزی و دامی از طریق تحقیق و توسعه مناسب مورد توجه قرار گیرد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد است با جایگزین کردن استروویت بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب (۱۳/۱) درصد فسفر، ۵/۴ درصد نیتروژن و ۱۰/۳ درصد منیزیم با نسبت مولی P: N: Mg ۱/۰: ۱/۰: ۹/۹۴/۶ و محتوایی استروویت ۹۴/۶ درصد) به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) پارامترهای مورد بررسی بجز وزن تازه و خشک ریشه افزایش یافت به نحوی که بیشترین وزن تازه اندام هوایی و وزن خشک اندام هوایی، غلظت فسفر اندام هوایی و غلظت فسفر ریشه از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات بدست آمد. نتایج همچنین نشان داد بیشترین مقدار فسفر خاک پس از برداشت گیاه از تیمار S100:P0 ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات در هکتار بدست آمد. با وجود حلالیت کم استروویت به اندازه کود فسفره بسیار محلول، برای گیاهان موثر است. با توجه به

## References

1. Antonini, S., Arias, M.A, Eichert, T. and Clemens, J. 2012. Greenhouse evaluation and environmental impact assessment of different urine-derived struvite fertilizers as phosphorus sources for plants. *Chemosphere*, 89: 1202–1210.
2. Barker, A.V. and Pilbeam, D.J. eds. 2015. *Handbook of plant nutrition*. 2nd ed.; Press, C., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
3. Benton Jones, J. R., and Case, V. W. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue sample. *Soil Testing and Plant Analysis, SSSA*, 3.
4. Cabeza, R., Steingrobe, B., Römer, W., and Claassen, N. 2011. Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 91:173–184.
5. Christiansen, N. H., Sørensen, P., Labouriau, R., Christensen, B. T., & Rubaek, G. H. 2020. Characterizing phosphorus availability in waste products by chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(4), 416-428.
6. Dalecha, T., Assefa, E., Krasteva, K. and Langergraber, G. 2012. Experiments on struvite precipitation, application and economic analysis in Arba Minch, Ehtiopia. Project Report Under Capacity-Linked Water Supply and Sanitation Improvement for Africa's Peri urban and Rural Area, International Water Association.
7. Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 545-567.
8. Degryse, F., Baird, R., Da Silva, R.C. and McLaughlin, M.J., 2017. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers—effect of soil pH, granulation and base excess. *Plant and soil*, 410.139-152.
9. Ehmman, A., Bach, I. M., Laopeamthong, S., Bilbao, J., and Lewandowski, I. 2017. Can phosphate salts recovered from manure replace conventional phosphate fertilizer? *Agriculture*, 7:(1). 1.
10. El Diwani, G., El Rafie, S., El Ibiari, N. N., and El-Aila, H. I. 2007. Recovery of ammonia nitrogen from industrial wastewater treatment as struvite slow releasing fertilizer. *Desalination*, 214, 200-214.
11. El-Rafie, S., Hawash, S. and Shalaby, M.S. 2013. Evaluation of struvite precipitated from chemical fertilizer industrial effluents. *Advances in Applied Science Research*, 4:(1).113-123.
12. Erdal, i., Mejri, R., Yaylaci, C. and Turkan., S.A. 2023. Comparison of the Effectiveness of Struvite and Some Commercial Fertilizers on the Growth of Lettuce. *Bahçe*, 52:(2). 95-102.
13. Farhat, N., Elkhouni, A., Zorrig, W., Smaoui, A., Abdelly, C., Rabhi, M., 2016. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta physiologiae plantarum*, 38:6. 145.
14. Franz., M. 2008. Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Management*, 28(10): 1809–1818.
15. Gericke, S. 1968. *Thomasphosphat Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung (Thomasphosphate, handbook of plant nutrition and fertilisation)*. 2: 1168-1202.
16. González-Ponce, R., López-de-Sá, E. G., and Plaza, C. 2009. Lettuce response to phosphorus fertilization with struvite recovered from municipal wastewater. *HortScience*, 44:(2), 426-430.
17. Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., and Margenot, A. J. 2020. A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 653-671.

18. Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., and Margenot, A. J. 2021. Maize and soybean response to phosphorus fertilization with blends of struvite and monoammonium phosphate. *Plant and Soil*, 461, 547-563.
19. Jones Jr, J. B., and Case, V.W. 1990. Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil testing and plant analysis*, 3. 389-427.
20. Katakı, S., West, H., Clarke, M. and Baruah, D.C., 2016. Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 107.142-156.
21. Lee, J.E., Rahman, M.M. and Ra, C.S. 2009. Dose effects of Mg and PO<sub>4</sub> sources on the composting of swine manure. *Journal of hazardous materials*, 169(1-3). 801-807.
22. Liu, Y., Kwag, J.H., Kim, J.H. and Ra, C. 2011. Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. *Desalination*, 277(1-3). 364-369.
23. Mancho, C., Diez-Pascual, S., Alonso, J., Gil-Díaz, M. and Lobo, M.C. 2023. Assessment of recovered struvite as a safe and sustainable phosphorous fertilizer. *Environments*, 10:(2), p.22.
24. Mancho, C., Diez-Pascual, S., Alonso, J., Gil-Díaz, M., García-Gonzalo, P. and Lobo, M.C. 2023. Medium/Long-Term Efficiency of Struvite for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production: Effect on Soil Quality. *Horticulturae*, 9:(6). 645.
25. Meng, X., Liu, X., Huang, Q., Gao, H., Tay, K., and Yan, J. 2019. Recovery of phosphate as struvite from low-temperature combustion sewage sludge ash (LTCA) by cation exchange. *Waste Management*, 90. 84-93.
26. Meyer, G., Frossard, E., Mäder, P., Nanzer, S., Randall, D.G., Udert, K.M., and Oberson, A. 2018. Water soluble phosphate fertilizers for crops grown in calcareous soils – an outdated paradigm for recycled phosphorus fertilizers? *Plant Soil*. 424: 367–388.
27. Muhmood, A., Lu, J., Dong, R. and Wu, S. 2019. Formation of struvite from agricultural wastewaters and its reuse on farmlands: Status and hindrances to closing the nutrient loop. *Journal of environmental management*, 230, pp.1-13.
28. Nazari, T., Barani Motlagh, M., Rastegar, S.O., and Sedri, M.H. 2024. Evaluation of the effects of replacing struvite with triple superphosphate fertilizer on some physiological and phosphorus availability in wheat. *Journal of Water and Soil*, 38(1), 127-142. (In Persian with English abstract).
29. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L. Page et al (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* 2nd Edition, Agronomy Series No. 9, ASA SSSA, Madison. pp. 961-1010.
30. Olsen, S. R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
31. Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. 1982. *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties*, 2nd edn. American Society of Agronomy Inc, Madison.
32. Rahman, M.M., Liu, Y., Kwag, J.H. and Ra, C. 2011. Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil. *Journal of hazardous materials*, 186(2-3), 2026-2030.
33. Rech, I., Withers, P.J.A., Jones, D.L., and Pavinato, P.S. 2019. Solubility, diffusion and crop uptake of phosphorus in three different struvites. *Sustainability* 11: 134.
34. Ryu, H. D., and Lee, S. I. 2016. Struvite recovery from swine wastewater and its assessment as a fertilizer. *Environmental Engineering Research*, 21, 29-35.

35. Shaddel, S., Grini, T., Andreassen, J.P., Østerhus, S.W. and Ucar, S. 2020. Crystallization kinetics and growth of struvite crystals by seawater versus magnesium chloride as magnesium source: towards enhancing sustainability and economics of struvite crystallization. *Chemosphere*, 256.126968.
36. Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H. J., Duveiller, E., Reynolds, M., and Muricho, G. 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, 5:(3), 291-317.
37. Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., Johnson, J. 2006. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digestersupernatant. *Bioresource Technology*, 97: (17). 2211–2216.
38. Talboys, P.J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J.R., Jones, D.L. and Withers, P.J. 2016. Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and soil*, 401.109-123.
39. Thiessen Martens, J.R., Srinathan, O.D. and Amarakoon, I., 2023. Fertilizing effect of wastewater-derived granular struvite on contrasting Manitoba soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 103:(1), 259-263.
40. Ueno, Y. and Fujii, M. 2001. Three years experience of operating and selling recovered struvite from full-scale plant. *Environmental Technology*, 22(11), 1373-1381.
41. Vafaie, A., Ebadi, A., Rastgou, B., Moghadam, S.H. 2013. The effects of potassium and magnesium on yield and some physiological traits of safflower (*Carthamus tinctorius*). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 5: (17), 1895–1900.
42. Valle, S.F., Giroto, A.S., Dombinov, V., Robles-Aguilar, A.A., Jablonowski, N.D. and Ribeiro, C. 2022. Struvite-based composites for slow-release fertilization: A case study in sand. *Scientific reports*, 12(1), 14176.
43. Vogel, T., Nelles, M., and Eichler-Löbermann, B. 2015. Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. *Ecological Engineering*, 83: 466–475.
44. Vysotskaya, L., Akhiyarova, G., Feoktistova, A., Akhtyamova, Z., Korobova, A., Ivanov, I., Kudoyarova, G. 2020. Effects of phosphate shortage on root growth and hormone content of barley depend on capacity of the roots to accumulate ABA. *Plants*, 9(12):1722.
45. Walkley, A., and Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37:(1), 29-38.
46. Wang, J., Xue, L., Hou, P., Hao, T., Xue, L., Zhang, X., Sun, T., Lobanov, S. and Yang, L. 2023. Struvite as P Fertilizer on Yield, Nutrient Uptake and Soil Nutrient Status in the Rice–Wheat Rotation System: A Two-Year Field Observation. *Agronomy*, 13(12), 2948.
47. Wen, G., Huang, L., Zhang, X., and Hu, Z. 2019. Uptake of nutrients and heavy metals in struvite recovered from a mixed wastewater of human urine and municipal sewage by two vegetables in calcareous soil. *Environmental Technology and Innovation*, 15. 100384.
48. Withers, P.J., van Dijk, K.C., Neset, T.S.S., Nesme, T., Oenema, O., Rubæk, G.H., Schoumans, O.F., Smit, B. and Pellerin, S. 2015. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe. *Ambio*, 44. 193-206.
49. Wollmann, I., Gauro, A., Müller, T., and Möller, K. 2018. Phosphorus bioavailability of sewage sludge-based recycled fertilizers. *Journal of plant nutrition and soil science*, 181(2): 158–166.
50. Wong, V. N., Dalal, R. C., and Greene, R. S. 2010. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 41:(1), 29-40.

51. Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., and Shao, L. 2012. Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences*, 24:(8), 1533-1538.
52. Zhang, T., Ding, L., Ren, H. and Xiong, X. 2009. Ammonium nitrogen removal from coking wastewater by chemical precipitation recycle technology. *Water research*, 43(20). 5209-5215.
53. Zin, M. M. T., and Kim, D. J. 2019. Struvite production from food processing wastewater and incinerated sewage sludge ash as an alternative N and P source: Optimization of multiple resources recovery by response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 242-249.