

## **Evaluation of the effects of replacing struvite with triple superphosphate fertilizer on some physiological and phosphorus availability in wheat**

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

PhD Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources, Iran

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

### **Introduction:**

Phosphorus is an essential element for all living organisms, and it cannot be replaced by any other element. Phosphorus is however a limited resource, and it is estimated that the extracted phosphorus resources (Apatite) will last for another 50 to 100 years. One of the most widely used technologies for recycling phosphorus is the precipitation of phosphorus from sewage sludge and leachate. Phosphorus Recovery as struvite ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) from sewage sludge has attracted special attention due to its potential for use as an ecological and slow release fertilizer. Struvite is a white, grain-like solid, odor-free and sludge-free ingredient, composed of magnesium, ammonium and phosphorus at equal moly concentrations. Therefore, this study is designed to examine the effect of struvite replacement with triple superphosphate fertilizer on some physiological parameters and 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 the 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. To achieve the aim of this study The factorial experiment was carried out in the form of a completely randomized design in 4 replications. The factors include the application of different proportions of struvite replaced with triple superphosphate (S0:P100, S25:P75, S50:P50, S75:P25 and S100:P0) and 4 levels of phosphorus (0, 50, 100 and 150 kgTSP ha<sup>-1</sup>) and a total of 54 pots. The application rate for

struvite was calculated based on total phosphorus ( $P_2O_5$ ). 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 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  $70^\circ C$  to a constant weight in a forced air-driven oven. Phosphorus concentrations in plant extracts by the molybdenum vanadate or yellow method and chlorophyll content (a, b and ab) and carotenoids were measured using the Arnon 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 the investigated treatments and their interactions were significant at  $p < 0.01$ . However, the interaction effect of fresh weight shoots and height was significant at  $p < 0.05$ . The comparison of the average data showed that the highest amount of fresh weight shoots (7.79 gr/pot), dry weight shoots (1.130 gr/pot) and height (29.66 cm) was obtained from the application of S75:P25  $150 \text{ kgTSP ha}^{-1}$ . By replacing struvite instead of triple superphosphate fertilizer, the phosphorus concentration and uptake of wheat increased at all three fertilizer levels, so that the highest phosphorus concentration (0.174%) is obtained from S75:P25  $150 \text{ kgTSP ha}^{-1}$ . Although there was no statistically significant difference with S100:P0 (0.169%). The highest amount of phosphorus uptake in wheat with an average of 0.197 gr/pot was obtained from the S75:P25 treatment of  $150 \text{ kgTSP ha}^{-1}$ , compared to the treatment of 100% struvite (S100:P0) and 100% triple superphosphate fertilizer (S0:P100) with the averages of 0.158 and 0.109 gr/pot, respectively, there was an increase equivalent to 19.79 and 44.67 percent. Also, the results showed that the treatment of  $150 \text{ kgTSP ha}^{-1}$  100% struvite (S100:P0) compared to 100% triple superphosphate fertilizer (S0:P100) can increase the amounts of chlorophyll a, b, ab and carotenoids by 7.78, 3.82, 6.44 and 6.84 percent, respectively.

### **Conclusions:**

Despite struvite's low solubility, it is as effective for plants as highly soluble phosphorus fertilizers. However, the reasons for this apparent dichotomy and the specific mechanisms of struvite dissolution



# ارزیابی تاثیر جایگزینی استروویت با کود سوپر فسفات تریپل بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی فسفر در گیاه گندم

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

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

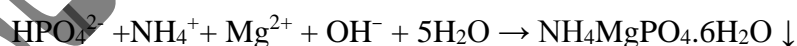
۴- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

## چکیده

استروویت (فسفات آمونیوم منیزیم) یک ماده معدنی با حلالیت کم در آب است که به طور افزایشدهی از تصفیه خانه‌های فاضلاب بازیابی می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی اثر استروویت جایگزین شده با کود سوپر فسفات تریپل بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی فسفر در گیاه گندم بود. بدین منظور آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به صورت گلدانی به مدت ۱۰ هفته به اجرا درآمد. فاکتورها شامل کاربرد نسبت‌های مختلف کود استروویت جایگزین شده با سوپر فسفات تریپل (S0:P100، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و ۴ سطح فسفر (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار) بود. میزان کاربرد استروویت بر اساس مقدار فسفر کل ( $P_2O_5$ ) سوپر فسفات تریپل محاسبه شد. بر پایه نتایج بدست آمده نوع تیمار کودی و سطوح مصرف و اثر متقابل آنها بر تمامی تیمارهای مورد بررسی بجز وزن تر و ارتفاع، در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) معنی‌دار شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار وزن تر اندام‌هوایی ۷/۷۹ گرم در گلدان، وزن خشک اندام هوایی ۱/۱۳۰ گرم در گلدان، ارتفاع ۲۹/۶۶ سانتی‌متر و غلظت فسفر اندام هوایی ۰/۱۷۴ درصد از کاربرد تیمار S25:P75 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد S100:P0 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار در مقایسه با S0:P100 می‌تواند مقادیر کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید را به ترتیب به میزان ۷/۷۸، ۳/۸۲، ۶/۴۴ و ۶/۸۴ درصد افزایش دهد. با وجود حلالیت کم استروویت (۳ تا ۵ درصد) به اندازه کود فسفره رایج، برای گیاهان زراعی موثر است. بنابراین توصیه می‌شود زمان بندی و نرخ کاربرد استروویت در رابطه با تقاضای محصولات زراعی و باغی مختلف بهینه شود.

**کلمات کلیدی:** استروویت، سوپر فسفات تریپل، فسفر، کلروفیل و گندم

فسفر (P) از عناصر ضروری و پرمصرف برای رشد و نمو، ذخیره و انتقال انرژی در گیاهان به شمار می‌رود. این عنصر جزء ترکیبات ساختمانی سلول‌ها و بسیاری از ترکیبات شیمیایی است و بعد از نیتروژن، فسفر دومین عنصر غذایی است که کمبود آن محدود کننده رشد گیاهان است (Hopkins and Ellsworth., 2003). فسفر عنصری حیاتی برای همه موجودات زنده است و با عناصر دیگر قابل جایگزینی نیست (Seyhan., 2009). با این حال، فسفر یک منبع محدود است و تخمین زده می‌شود که منابع فسفر قابل استخراج (آپاتیت) فقط ۵۰ تا ۱۰۰ سال دیگر دوام داشته باشند (Liu et al., 2007). امروزه به علت هزینه‌های سنگین کودهای شیمیایی، لازم است که جذب و مصرف عناصر غذایی از کارایی بالایی برخوردار باشند تا بدین وسیله از هزینه‌های تولید کاسته و سود بیشتری برای کشاورزان داشته باشد. اخیراً استفاده از کودهای کندرها، موجب آزاد سازی کنترل شده مواد غذایی مورد نیاز گیاه شده است. به گونه‌ای که از یک سو کارایی و اثر بخشی آنها بر روی محصول حداکثر و از سوی دیگر اثرات منفی ناشی از استفاده مقادیر بالای کود به حداقل برسد. به همین دلیل کودهای کندرها را می‌توان به عنوان کودهای نسبتاً ایده آل در نظر گرفت (Fageria., 2014). بنابراین، ایجاد یک روش پایدار برای بازیافت و استخراج فسفر از باقی مانده‌های غنی از فسفر از اهمیت زیادی برخوردار است (Xu et al., 2012). در حال حاضر، یکی از پرکاربردترین فن‌آوری‌ها برای بازیافت فسفر، رسوب مواد معدنی فسفر از لجن فاضلاب و شیرابه‌ها است. مواد معدنی فسفر را می‌توان به صورت استروویت<sup>۱</sup>، هیدروکسی آپاتیت یا کلسیم فسفات رسوب داد (Yuan et al., 2012). بازیابی فسفر به عنوان استروویت (NH<sub>4</sub>MgPO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) از خاکستر لجن فاضلاب در دهه گذشته به دلیل پتانسیل استفاده به عنوان کود اکولوژیکی توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است (Militaru et al., 2019). استروویت (فسفات آمونیوم منیزیم) یک ماده جامد بلوری سفید، دانه‌ای، بدون بو و عاری از لجن است که از منیزیم، آمونیوم و فسفر در غلظت‌های مولی برابر تشکیل شده است (El Rafie et al., 2013). از نظر جرم، استروویت از ۴۴٪ آب کریستال، ۳۹٪ فسفات، ۱۰٪ منیزیم و ۷٪ آمونیوم تشکیل شده است (Gell et al., 2011). واکنش کلی رسوب استروویت براساس واکنش شیمیایی بین یون‌های منیزیم، فسفات و آمونیوم در زیر نشان داده شده است (Hertzberger et al., 2020).



اکثر مطالعات نشان می‌دهند که کارایی زراعی رسوب استروویت مشابه کودهای فسفره مشتق شده از سنگ فسفات است (Huygens et al., 2019). محققان متعددی گزارش کردند که استروویت دارای عناصر غذایی ضروری (فسفر و نیتروژن) برای رشد گیاه هست که می‌توان از آن به عنوان کود در کشاورزی استفاده کرد (Li et al., 2019; Mancho et al., 2023). علاوه بر این حلالیت کم استروویت (۳ تا ۵ درصد) سبب رها شدن آهسته فسفر، نیتروژن و منیزیم در خاک شده که این امر افزون بر اینکه امکان رشد بهینه گیاه را در طول زمان فراهم می‌کند، مانع از بروز پدیده‌های زیان بار ناشی از مصرف بیش از اندازه این عناصر در خاک می‌شود (Mancho et al., 2023; Hall et al., 2020). بخش آمونیاکی استروویت شکل‌های نیترات را آزاد

<sup>1</sup> Struvite

می‌کند که تامین طولانی مدت مواد مغذی را تضمین می‌کند. این ویژگی اجازه می‌دهد تا کاربرد مستقیم و دوز بالای استروویت، نسبت به کودهای معمولی برای گیاهان خطر کمتری داشته باشد (Mancho et al., 2023). از طرفی نسبت نیتروژن به فسفر پایین در استروویت سبب شده است که مقدار نیتروژن موجود در استروویت برای رشد بهینه گیاه کافی نباشد. در بحث تغذیه، با توجه به این نکته که مقدار نیتروژن موجود در گیاهان به مراتب بیشتر از مقدار فسفر است. بنابراین تامین نیتروژن خاک و گیاه با سایر منابع نیتروژنی راحت تر است و از استروویت به عنوان کود فسفر استفاده می‌شود (Mancho et al., 2023; Hertzberger et al., 2020). مواد غذایی موجود در استروویت با سرعت کمتری در مقایسه با دیگر کودها آزاد می‌شود و ناخالصی‌های موجود بسته به منشا تولید استروویت می‌تواند دو تا سه برابر کمتر از سایر کودهای تجاری است. علاوه بر این همزمان دارای عناصر غذایی فسفر، نیتروژن و منیزیم می‌باشد (Barbosa et al., 2016). وجود منیزیم همچنین استروویت را به کودی کارآمد برای گیاهان علفی تبدیل می‌کند زیرا منیزیم عنصر اساسی کلروفیل است (Muhmood et al., 2019). ژل و همکاران (Gell et al., 2011) گزارش کردند که کود استروویت به اندازه سایر کودهای شیمیایی در بهبود رشد و نمو محصولات مختلف موثر است. همچنین پونس و همکاران (Ponce et al., 2009) گزارش کردند میزان عملکرد و جذب فسفر در گیاه کاهو با استفاده از استروویت مشتق شده از لجن بیشتر از کاربرد سوپر فسفات ساده است. آنان نتایج بهتر حاصل از استفاده از استروویت را به محتوای بالا منیزیم و اثر هم افزایی بر جذب فسفر نسبت دادند. نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد استروویت بازبافت شده از انواع مواد آلی زائد (لجن فاضلاب شهری، ادرار منابع انسانی و شیرابه‌ها) باعث افزایش رشد کاهو (Wen et al., 2019)، ذرت (Nongqwenga et al., 2017)، کلم چینی (Ryu et al., 2017)، جو (Bastida et al., 2019) و گیاه گندم در خاک لوم شنی با pH=6 (Talboys et al., 2016) می‌شود. گندم (*Triticum aestivum L.*) از مهمترین گیاهان زراعی در ایران و تامین کننده بخش قابل توجه پروتئین و انرژی مردم دنیاست (Arzani and Ashraf 2017). با این حال، تقاضا برای گندم به دلیل افزایش سریع جمعیت همچنان در حال افزایش است. بر اساس پیش بینی‌های سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) تا سال ۲۰۵۰ سالانه حدود ۸۴۰ میلیون تن گندم مورد نیاز خواهد بود. با این حال، تولید گندم با افزایش تغییرات آب و هوای جهانی در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی مواجه شده است (Ma et al. 2022). لذا این پژوهش با هدف بررسی تاثیر استروویت حاصل از لجن فاضلاب شهری به عنوان کود فسفره بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک و فراهمی فسفر در گیاه گندم در مقایسه با سوپر فسفات تریپل انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

نمونه برداری خاک و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن :

به منظور بررسی اثر رسوب استروویت بر فراهمی فسفر برای گیاه گندم، تعدادی نمونه خاک از مناطق مختلف استان کردستان انتخاب و پس از تعیین مقدار فسفر قابل استفاده با روش اولسن (Olsen et al, 1954)، یک خاک آهکی که دارای مشکل کمبود فسفر (با مقدار فسفر ۲/۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم) انتخاب گردید. خاک منتخب مورد استفاده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری

منطقه حاجی آباد سیده قروه با مختصات جغرافیایی (N ۳۶° ۰۷' ۳۵) (E ۱۳۳° ۵۶' ۴۷) برداشت و پس از هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای مطالعات آزمایشگاهی به شرح ذیل مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی همانند بافت خاک به روش هیدرومتری (Day, 1995)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در نسبت ۲:۱ خاک به آب، کربن آلی با استفاده از پتاسیم دی کرومات (Walkey and Black., 1934)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (Jones & Case, 1990)، پتاسیم قابل استفاده خاک با استفاده از استات آمونیوم (Page et al., 1982) و مقادیر آهن، روی بعد از عصاره‌گیری خاک با DTPA به روش لیندزی و نورول (Lindsay and Norvell, 1978) به وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین گردید.

### آماده سازی گلدان‌ها و اعمال کودهای مورد نیاز:

نمونه‌های خاک، هواخشک، کوبیده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند 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>۱</sup> و طراحی مرکب مرکزی<sup>۲</sup> در نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>۳</sup> بهینه سازی 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 (۲mm <) 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 (Xu et al., 2012; Franz, 2008). 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 (Meng et al., 2019; Xu et al., 2012; Franz, 2008) و برای بازیابی آن به صورت استروویت تاثیر سه فاکتور نسبت N/P (۱ تا ۲) نسبت Mg/P (۱ تا ۲) و pH (۸ تا ۱۱) بهینه‌سازی شد (Xu et al., 2012; Zin and Kim, 2019). لازم به ذکر است که برای جداسازی فلزات سنگین از محلول حاصل از فرآیند لیچینگ از رزین تبادلی (AG 50W-X8) و برای رسوب کریستال استروویت از کلرید منیزیم (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) و کلراید آمونیوم (NH<sub>4</sub>Cl) به عنوان منبع منیزیم و آمونیوم استفاده شد (Xu et al., 2012; Zin and Kim, 2019). نتایج نشان داد تحت شرایط بهینه، واکنش ۰/۵ مول بر لیتر اسید سولفوریک در نسبت جامد به مایع ۵۷ مول بر گرم به مدت ۲ ساعت ۹۹/۸ درصد فسفر قابل استخراج بود. همچنین بیشترین بازیابی فسفر به عنوان استروویت در pH 8 نسبت Mg/P و N/P به ترتیب ۲ و ۱ به دست آمد. آنالیز فیزیکی شیمیایی کود استروویت در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به پودری بودن کود استروویت و برای کاهش خطای آزمایش هر دو کود سوپر فسفات تریپل و استروویت نیز از الک ۱۸ مش عبور داده شد (شکل ۱)، ۳ روز قبل از کشت به خاک گلدان‌ها اعمال گردید. بر اساس آزمون خاک و وزن خاک گلدان‌ها عناصر نیتروژن و پتاسیم با احتساب مقدار موجودشان در استروویت، از منبع‌های اوره (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) و سولفات پتاسیم (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) تأمین شد.

<sup>1</sup> - Response Surface Methodology

<sup>2</sup> - Central composite design

<sup>3</sup> - Expert Design

## آزمایش گلدانی:

در این پژوهش، 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) و ۱۰۰ به صفر (S0:P100) استفاده شد (Hertzberger et al., 2021). میزان کاربرد استروویت بر اساس مقدار فسفر کل ( $P_2O_5$ ) سوپر فسفات تریپل محاسبه شد (Ehmann et al., 2017). بدین منظور آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با کاربرد ۶ نوع کود (S0:P0، S0:P100، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و ۴ سطح فسفر (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار) و کشت گیاه گندم در ۳ تکرار اجرا گردید. سپس تعداد ۱۰ عدد بذر گندم در هر گلدان کشت گردید که پس از دو هفته به ۴ عدد تقلیل یافت. جهت حذف اثرات محیطی در طول دوره رشد، جای گلدان‌ها به صورت 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 بطور وزنی تامین شد.

اندازه‌گیری پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه گندم:

پس از گذشت ۱۰ هفته (شروع گلدهی)، گیاهان به صورت کفبر برداشت شده و ارتفاع آنها اندازه‌گیری شد. اندام هوایی با آب شهری سپس با آب مقطر شسته شده و بر روی توری‌های پلاستیکی پخش تا آب اضافی موجود در سطح آنها حذف شود سپس وزن خشک اندام هوایی پس از گذاردن نمونه‌ها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، تعیین گردید (Jones and Case., 1990). پس از آن غلظت فسفر در اندام هوایی با روش روش مولیبدات وانادات یا روش زرد (Kuo, 1996) و جذب کل فسفر از خاک هر گلدان (حاصلضرب وزن ماده خشک در غلظت فسفر در گیاه) به عنوان پاسخ‌های گیاهی به کود استروویت در نظر گرفته خواهد شد. همچنین اندازه‌گیری کلروفیل‌ها و کارنتنوئید پس از استخراج با استون ۸۰٪ و با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1949) در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر انجام می‌شود. در نهایت مقدار کلروفیل و کارنتنوئیدها برحسب میلی‌گرم در گرم بافت تر گیاه از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شد

$$a \text{ غلظت کلروفیل} = 12.7(663A) - 2.69(645A) * V / W * 1000 \quad (۱)$$

$$b \text{ غلظت کلروفیل} = 22.9(645A) - 4.68(663A) * V / W * 1000 \quad (۲)$$

$$\text{غلظت کلروفیل کل} = 20.9(645A) - 8.02(663A) * V / W * 1000 \quad (۳)$$

$$\text{غلظت کارنتنوئید} = 7.6(480A) - 1.49(510A) * V / W * 1000 \quad (۴)$$

A: جذب طول موج بر حسب نانومتر، W: وزن تر بافت برحسب گرم، و V: حجم نهایی کلروفیل و کارنتنوئید در استون ۸۰ درصد می باشد (Arnon, 1949). تجزیه و تحلیل آماری مقایسه بین تیمارهای مختلف 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 2016 استفاده شد.



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	آهن قابل استفاده	روی قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	نیترोजن کل	کربن آلی OC(%)	شن	سیلت	رس	بافت خاک
pH	EC (dsm <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	N (%)		Sand	Silt	Clay	Soil texture
7.18	0.372	8.28	1.24	260	2.54	0.06	0.58	31	37	32	لوم رسی



شکل ۱- استروویت (فسفات آمونیوم منیزیم) بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب و کود فسفر تجاری (سوپرفسفات تریپل)  
Fig 1. Recovered struvite from sewage sludge ash (magnesium ammonium phosphate) and commercial phosphorus fertilizer (triple superphosphate)

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استروویت مورد استفاده در پژوهش

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

Parameters	استروویت Struvite	سوپر فسفات تریپل TSP	Parameters	استروویت Struvite	سوپر فسفات تریپل TSP
فرمول شیمیایی	$NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$	فرمول شیمیایی	$NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$
فسفر محلول در آب Water soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	12.46	>39	آرسنیک As (mg/l)	10.9	<50
فسفر محلول در سیترات Citrate-soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	15.25	20-30	کادمیم Cd (mg/l)	0.28	<25
فسفر غیر محلول در سیترات Citrate-soluble P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	2.25	30-40	سرب Pb (mg/l)	3	<50
فسفر کل (درصد) Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	29.97	46	آهن Fe (mg/l)	1250	-

اکسید منیزیم (درصد)	16.40	-	روی	605	-
MgO (%)			Zn (mg/l)		
اکسید کلسیم (درصد)	1.19	-	مس	114	-
CaO (%)			Cu (mg/l)		
اکسید سدیم (درصد)	0.80	-	منگنز	310	-
Na <sub>2</sub> O (%)			Mn (mg/l)		
پتاسیم اکسید (درصد)	0.10	-	نیکل	55	-
K <sub>2</sub> O (%)			Ni (mg/l)		
اکسید آلومینیوم (درصد)	0.99	-	کروم	43	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)			Cr (mg/l)		

## نتایج و بحث:

برخی از ویژگی‌های مهم استروویت بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب شهری سنندج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به مقادیر جرم مولی استروویت تئوری (۲۴۵/۴۰) و جرم مولی نیتروژن (۱۴)، فسفر (۳۰/۱) و منیزیم (۲۴/۳۰)، کود استروویت تئوری 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 (Zin and Kim, 2019). با توجه به مقادیر استروویت تئوری و مقادیر موجود در جدول ۲، استروویت مورد استفاده در این پژوهش دارای ۱۳/۱ درصد فسفر خالص، ۵/۴ درصد نیتروژن و ۱۰/۳ درصد منیزیم با نسبت مولی P: N: Mg = ۱/۰:۰:۰/۹:۱/۲ و محتوایی استروویت ۹۴/۶ درصد بوده که تقریباً مشابه با مقدار تئوری آن است (Zin and Kim, 2019). همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که گرید کودی استروویت مورد استفاده در این پژوهش (۵/۷-۲۹/۹۷-۰/۱۰) و کود سوپرفسفات تریپل برابر با مقادیر (۰-۴۶-۰) بود (جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که نوع تیمار کودی ( $p < 0/01$ ) و سطوح مصرف استروویت ( $p < 0/01$ ) و اثر متقابل آنها بر وزن تر اندام هوایی گیاه گندم در سطح احتمال پنج درصد ( $p < 0/05$ ) معنی‌دار شد (جدول ۳). همچنین نتایج تجزیه واریانس جدول ۳ نشان داد که نوع و سطوح تیمار کودی استروویت و اثر متقابل آنها بر وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0/01$ ) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع تیمار کودی و سطوح مختلف استروویت بر وزن تازه اندام هوایی گیاه (جدول ۴) نشان داد که بیشترین مقدار وزن تازه اندام هوایی با میانگین ۷/۷۹ گرم در گلدان از تیمار S75:P25:150 کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند نسبت به تیمار S100:P0 کود استروویت با میانگین ۷/۳۱ گرم در گلدان سطح ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۳/۲۵ گرم در گلدان مربوط تیمار شاهد سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). همچنین بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه گندم با میانگین ۱/۱۳۰ گرم در گلدان از تیمار S75:P25:150 کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S75:P25:100 و ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب افزایشی معادل ۳۵/۶۶ و ۴۵/۲۲ داشت (جدول ۴). در همین راستا هرتزبرگر و همکاران (Hertzberger et al., 2021) در بررسی واکنش ذرت و سویا به کود دهی فسفر با ترکیبی مخلوط از کود مونو آمونیوم فسفات و استروویت با نسبت‌های مختلف (S0:M100، S25:M75، S50:M50، S75:M25 و S100:M0) گزارش کردند که زیست توده کل گیاه ذرت تا ۵۰ درصد جایگزینی کود مونو فسفات آمونیوم توسط استروویت و

زیست توده کل گیاه سویا تا ۲۵ درصد جایگزینی کود مونو آمونیوم فسفات توسط استروویت از لحاظ مقدار مشابه بود. آنان حساسیت کمتر گیاه ذرت به جایگزینی کود مونو آمونیوم فسفات توسط کود استروویت را داشتن ۵۲ درصد زیست توده ریشه و ۲۲ درصد طول ریشه بیشتر نسبت به گیاه سویا گزارش کردند (Hopkins and Hansen 2019). در شرایط کمبود عناصر غذایی، گیاهان زراعی مواد فتوسنتز تولیدی را برای استراتژی‌های جذب مواد مغذی مانند رشد ریشه و تولید ترشحات اسیدی اختصاص می‌دهند (Talboys et al. 2016). احتمالاً حل شدن استروویت از طریق ترشحات ریشه‌ای و اسیدی شدن ریزوسفر در گیاهانی که دارای زیست توده و طول ریشه کمتری هستند کمتر انجام می‌شود (Hertzberger et al., 2021). از طرفی، بین اسیدهای آلی (سیترات و اگزالات) تراوش شده توسط ریشه‌ها که می‌توانند انحلال استروویت را افزایش دهند، با سطح و زیست توده ریشه‌ها همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد (Eisenhauer et al. 2017; Guyonnet et al. 2018). اردال و همکاران (Eradal et al, 2023) در بررسی مقایسه اثر دو نوع استروویت (نوع ۱ و ۲ به ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری (مونو آمونیوم فسفات، دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و کود ۲۰-۲۰-۲۰) بر رشد گیاه کاهو در یک خاک آهکی گزارش کردند که تیمارهای مورد بررسی بر وزن تر کاهو در سطح یک درصد معنادار شد به گونه‌ای که بیشترین مقدار آن با میانگین ۱۴۵/۳ گرم در گیاه مربوط به استروویت نوع دو بود هر چند از لحاظ آماری با استروویت نوع یک و کود ۲۰-۲۰-۲۰ به ترتیب با میانگین ۱۴۰ و ۱۳۲/۳ گرم در گیاه اختلاف معنی‌داری نداشت و نسبت به کود دی آمونیوم فسفات با میانگین ۱۲۵/۳ گرم در گیاه، کود مونو آمونیوم فسفات با میانگین ۱۱۰/۷ گرم در گیاه و کود سوپر فسفات تریپل با میانگین ۷۳ گرم در گیاه به ترتیب افزایشی معادل با ۱۳/۷۶، ۲۳/۸۱ و ۴۵/۷۵ درصد داشت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر برخی ویژگی‌های رشدی و زیست فراهمی فسفر در گیاه گندم  
Table 3. Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on some of growth parameter and Phosphorus availability in wheat

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square				
		وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	ارتفاع Height plant	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration	جذب فسفر اندام هوایی Shoot P uptake
سطوح کودی a	2	9.39**	0.335**	20.72**	0.0029**	0.0159**
تیمار کودی b	5	10.35**	0.110**	20.38**	0.0043**	0.007**
سطوح * تیمار کود a * b	10	0.778*	0.022**	2.69*	0.00020**	0.001**
خطا Error	36	0.358	0.0009	1.111	0.00001	0.00002
ضریب تغییرات C.V (%)		11.23	4.39	4.20	2.86	4.90

NS، \* و \*\* به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع تیمار کودی ( $p < 0.01$ ) و سطوح مصرف استروویت ( $p < 0.01$ ) و اثر متقابل آنها بر ارتفاع گیاه گندم در سطح احتمال پنج درصد ( $p < 0.05$ ) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مختلف

استروویت نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی ارتفاع گیاه گندم افزایش یافت به نحوی که بیشترین ارتفاع گیاه با میانگین ۲۹/۶۶ سانتی‌متر از تیمار S75:P25 سطح ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S75:P25 سطح کود ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار با میانگین ۲۵/۶۶ و ۲۲/۱۶ به ترتیب افزایشی معادل با ۱۳/۴۸ و ۱۵/۱۷ درصد داشت (جدول ۴). همچنین کمترین مقدار آن با میانگین ۱۸/۱۶ سانتی‌متر از تیمار شاهد (S0:P0) سطح ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد (جدول ۴). اردال و همکاران (Eradal et al., 2023) در بررسی مقایسه دو نوع استروویت (نوع ۱ و ۲ به ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری فسفر اینگونه بیان کردند که هم استروویت و هم کودهای تجاری فسفر نسبت به تیمار شاهد موجب افزایش ارتفاع گیاه شدند. بیشترین مقدار ارتفاع کاهو با میانگین ۱۸/۲ سانتی‌متر مربوط به استروویت نوع یک و کمترین مقدار آن با میانگین ۱۴ سانتی‌متر مربوط به کود سوپر فسفات تریپل بود.

مطابق با جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نوع تیمار و سطوح مختلف کودی استروویت و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی گیاه گندم در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل غلظت و جذب فسفر گیاه گندم در هر سه سطح کودی افزایش یافت به نحوی که بیشترین غلظت فسفر با میانگین ۰/۱۷۴ درصد از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S100:P0 با میانگین ۰/۱۶۹ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). بیشترین مقدار جذب فسفر در گیاه گندم با میانگین ۰/۱۹۷ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد کود استروویت (S100:P0) و ۱۰۰ کود سوپر فسفات 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 ۴). 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 بوده (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 ۴). در واقع می‌توان اینگونه بیان کرد در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار زمانیکه کود استروویت به طور کامل کامل جایگزین سوپر فسفات تریپل می‌شود جذب فسفر توسط گیاه گندم به ترتیب معادل با ۱۸/۶۰، ۲۲/۸۸ و ۳۱/۰۱ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۴). تالبوی و همکاران (Talboy et al., 2016) در بررسی چگونگی انحلال و نقش استروویت به عنوان یک کود آهسته رهش گزارش کردند هنگامی که استروویت برای به حداکثر رساندن عملکرد محصول در نزدیکی ریشه‌های در حال رشد در خاک قرار می‌گیرد، تنها بخشی از دانه‌های استروویت به اندازه کافی حل می‌شود تا منبعی از فسفر را برای رشد اولیه فراهم کند، با این حال در آزمایش گلدانی ۹۰ روزه گیاه گندم بهاره (*T. aestivum*) جذب فسفر پس از کاربرد استروویت مشابه کاربرد سوپر فسفات تریپل بود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد در ۳۶ روز، تنها ۹ درصد از استروویت مورد استفاده در پژوهش حل شده بود این در حالی است که ۲۶ درصد آن طی ۹۰ روز حل شده بود. ترکیب استروویت با کودهای فسفوره محلول در آب، جذب زود هنگام فسفر موجود در کود فسفوره محلول را با آزادسازی آهسته‌تر فسفر از استروویت کاهش داده و به طور بالقوه جذب فسفر در مراحل بعدی رشد را افزایش می‌دهند (Hertzberger et al., 2021).

در همین راستا هرتزبرگر و همکاران (Hertzberger et al., 2021) در بررسی واکنش ذرت و سویا به کود دهی فسفر با ترکیبی مخلوط از کود مونو آمونیوم فسفات و استروویت با نسبت‌های مختلف (S0:M100، S25:M75، S50:M50، S75:M25 و S100:M0) گزارش کردند که مقدار جذب فسفر در گیاه ذرت زمانی که با کود ۱۰۰ درصد استروویت کود دهی شده باشد نسبت به زمانی که با ۱۰۰ درصد با مونو فسفات آمونیوم کود دهی شده است ۸ درصد کمتر است. آنها دلیل این امر را محدودیت رشد گیاه ذرت در اوایل فصل رشد به علت کمبود فسفر قابل دسترس در نسبت‌های بیشتر استروویت نسبت دادند. این در حالیست که اختلاف آماری معنی‌داری در جایگزینی کود استروویت با مونو آمونیوم فسفات در جذب فسفر برای گیاه سویا مشاهده نشد. جذب فسفر در گیاه سویا زمانی که S25:M75 و S50:M50 گیاه ۲۵ تا ۵۰ درصد کود استروویت دریافت کرده بود کمتر از ۱۰۰ درصد کود استروویت بود. همچنین بین ۱۰۰ درصد کود استروویت و ۱۰۰ درصد کود مونو آمونیوم فسفات اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده نشد.

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین تاثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر برخی ویژگی‌های رشدی و فراهمی فسفر در گیاه گندم

Table 4. Means comparison of the effect of different levels of Struvite on some of growth parameter and Phosphors availability in wheat

منابع resource	تیمارها treatments	وزن تر اندام هوایی (گرم در گلدان) Shoot fresh weight (gr/pot)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در گلدان) Shoot dry weight (gr/pot)	ارتفاع (سانتی‌متر) Height plant (cm)	غلظت فسفر اندام هوایی (درصد) Shoot P concentration (%)	جذب فسفر اندام هوایی (گرم در گلدان) Shoot P uptake (%gr/pot)
	شاهد S0:P0	3.25g	0.498k	22.16h	0.094h	0.047n
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	4eg	0.529k	23.50efgh	0.134ef	0.070m
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S25:P75	4.82ef	0.538i	23.33efgh	0.124g	0.072lm
۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار 50 kg TSP ha <sup>-1</sup>	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپرفسفات S50:P50	5.18de	0.582ij	25cdef	0.128fg	0.074lm
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S75:P25	5.41de	0.619hi	25.16cde	0.128fg	0.079kl
	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	5.43de	0.635gh	25.50cd	0.135e	0.086jk
	شاهد S0:P0	3.48g	0.498k	23gh	0.094h	0.047n
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	5.27de	0.672fg	25cdef	0.136e	0.091ij
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S25:P75	5.50de	0.679efg	24.66defg	0.144d	0.091hi
۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات در هکتار 100 kg TSP ha <sup>-1</sup>	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپرفسفات S50:P50	5.53de	0.699def	24.66defg	0.144d	0.101gh
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپرفسفات S75:P25	5.52de	0.727de	25.66cd	0.154bc	0.112ef

	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	5.88cd	0.744d	26bcd	0.159b	0.118e
	شاهد S0:P0	3.33g	0.531jk	22.66h	0.094h	0.050n
	۱۰۰ درصد سوپر فسفات S0:P100	5.83cd	0.718def	24.83def	0.152c	0.109fg
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	5.87cd	0.846c	26.66bc	0.154bc	0.130d
۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP ha <sup>-1</sup>	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	6.53bc	0.902b	25.83cd	0.155bc	0.139c
	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	7.79a	1.130a	29.66a	0.174a	0.197a
	۱۰۰٪ استروویت S100:P0	7.31ab	0.934b	27.66b	0.169a	0.158b

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.



شکل ۲- تاثیر کاربرد سطح ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار استروویت بر ارتفاع گیاه گندم  
**Fig 2. The effect of surface application of 150 kg/ha of struvite on height of wheat plant**

نتایج تجزیه واریانس داده‌های اثر نوع تیمار کودی و سطوح مختلف کود استروویت و اثر متقابل آن‌ها بر صفات فیزیولوژیکی 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 کلروفیل a، b و کلروفیل کل افزایش می‌یابد (جدول ۶). بیشترین مقدار کلروفیل a با میانگین  $0.766$  میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار  $S75:P25$   $150$  کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار  $S100:P0$ ،  $S50:P50$ ،  $S25:P75$  و  $S0:P100$   $150$  کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب با مقادیر  $0.758$ ،  $0.727$ ،  $0.706$  و  $0.699$  میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه و تیمارهای  $S100:P0$ ،  $S75:P25$  و  $S50:P50$   $100$  کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب با مقادیر  $0.737$ ،  $0.749$  و  $0.710$  میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶). همچنین بیشترین مقدار کلروفیل b با میانگین  $0.332$  میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار  $S75:P25$   $150$  کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار  $S75:P25$   $100$  و  $50$  کیلوگرم کود فسفر در هکتار با میانگین  $0.283$  و  $0.238$  میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه به ترتیب افزایشی معادل با  $17/31$  و  $28/31$  درصد داشت (جدول ۶). کلروفیل یکی از عوامل کلیدی در تعیین شدت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاهی و عامل مهمی در کنترل سلامت سبزی‌نگی برگ است (Hakim et al., 2018). کلروفیل a رنگدانه اولیه فتوسنتزی در گیاهان است و غلظت آن ۲ تا ۳ برابر بیشتر از کلروفیل b است. غلظت این ترکیبات اطلاعاتی در مورد بهره‌وری، بنیه گیاه و کیفیت محیطی فراهم می‌کنند. تفاوت در محتوای کلروفیل را می‌توان وجود ترکیبات متفاوت در کودهای فسفره مورد استفاده برای کود دهی گیاهان بیان کرد (Jama-Rodzeńska et al., 2022). جما-رودزه نسکا و همکاران (Jama-Rodzenska et al., 2022).

al., 2022) در بررسی اثر استروویت تجاری (Phosgreen) حاصل از ضایعات فاضلاب و کود سوپر فسفات بر صفات فیزیولوژیک و فراهمی عناصر در گیاه کاهو (*Lactuca sativa L.*) گزارش کردند که کوددهی فسفر تأثیر قابل توجهی و معنی داری بر محتوای کلروفیل a ( $P < 0.01$ )، b ( $P < 0.05$ ) و کل ( $P < 0.01$ ) داشت به نحوی که سطح کلروفیل کل گیاه کاهو را در مقایسه با کود سوپر فسفات تقریباً دو برابر افزایش یافت. آنها دلیل افزایش کلروفیل را وجود عناصر نیتروژن و منیزیم در کنار فسفر در کود استروویت (phosgreen) دانستند. علاوه بر نیتروژن، منیزیم یکی از عناصر ضروری رشد گیاهان بوده و نقش اصلی آن شرکت در ساختمان کلروفیل است. حدود ۷۵ درصد از منیزیم برگ در سنتز پروتئین و ۲۰ تا ۲۵ درصد کل منیزیم در رنگدانه‌های کلروفیل است و به طور عمده به عنوان یک کوفاکتور در فعالیت یکسری از آنزیم‌های درگیر در مرحله تثبیت کربن فتوسنتز نقش دارد (Guo et al., 2016). منیزیم تأثیر مستقیمی بر رشد گیاه دارد و ممکن است جذب فسفر را افزایش دهد و در نتیجه از افزایش رشد گیاه از طریق اثر هم افزایی با فسفر حمایت کند (González-Ponce et al., 2009).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر صفات فیزیولوژیک گیاه گندم

Table 5. Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on the physiological traits of wheat

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square			کارتنوئید Carotenoid
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	
سطوح کودی a	2	0.162**	0.024**	0.310**	0.016**
تیمار کودی b	5	0.123**	0.020**	0.241**	0.007**
سطوح کودی * تیمار کودی (a * b)	10	0.010**	0.001**	0.016**	0.0008**
خطا Error	36	0.0018	0.0000	0.0016	0.0000
ضریب تغییرات C.V (%)		7.01	1.91	4.77	2.90

ns, \*\*, \* و \* به ترتیب غیر معناداری و معناداری 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

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار کلروفیل کل نیز با میانگین  $1/0.9$  میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمارهای S100:P0 و S50:P50 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب با مقادیر  $1/0.7$  و  $1/0.3$  میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه و تیمارهای S100:P0 و S75:P25 ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار به ترتیب با مقادیر  $1/0.32$  و  $1/0.33$  میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معنی داری نداشت (جدول ۶). همچنین بیشترین مقدار کارتنوئید با میانگین  $0/296$  میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمارهای S100:P0 و S50:P50 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به ترتیب با مقادیر  $0/292$  و  $0/291$  میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه اختلاف آماری معنی داری نداشت و نسبت



به تیمار S75:P25 ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار با میانگین ۰/۲۸۳ و ۰/۲۳۸ میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه به ترتیب افزایشی معادل با ۱۲/۵ و ۲۵/۶۷ درصد داشت (جدول ۶). اگرچه استروویت دارای حلالیت کمی در آب (۳ تا ۵ درصد) است (Achat et al. 2014b). لیکن پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان می‌دهد که استروویت به اندازه کود فسفری بسیار محلول، برای گیاهان موثر است. (Achat et al. 2014a; Talboys et al. 2016). با این حال، دلایل این دوگانگی ظاهری و مکانیسم‌های خاص انحلال استروویت هنوز نامشخص است. حلالیت کم استروویت در آب ممکن است بیانگر این امر باشد که آزادسازی فسفر برای رشد اولیه محصولات بسیار کم است، در همین راستا بونوین و همکاران (Bonvin et al., 2015) نشان دادند که نرخ جذب فسفر از استروویت مشتق شده از ادرار در طول یک دوره رشد ۳۰-۷۲ روزه توسط گیاه چمن (*ryegrass*) نسبتاً ثابت بود. تا همین جذب فسفر در مراحل اولیه رشد برای رشد و استقرار گیاه و برای بهینه سازی عملکرد محصول حیاتی است. اگرچه استروویت حلالیت کمی در آب دارد لیکن اثربخشی استروویت‌ها بر مقادیر کلروفیل کل را می‌توان به محتوای مواد مغذی آنها نسبت داد (Ackerman et al., 2013). بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی قبلی نشان داده‌اند که استروویت همانند کود معدنی فسفر بسیار محلول به عنوان منبع فسفر برای گیاهان موثر هستند (Eradal et al., 2023; Talboy et al., 2016). یکی از دلایل اثر بخشی و برتری استروویت‌ها نسبت به بیشتر کودهای شیمیایی را می‌توان آزادسازی آهسته و کافی مواد مغذی آنها دانست (Eradal et al., 2023; Talboy et al., 2016). اگرچه حلالیت استروویت کند است، اما برخی از گیاهان توانایی تولید برخی اسیدهای آلی را دارند که حلالیت استروویت را از ریشه افزایش می‌دهند (Eradal et al., 2023). گیاهانی مانند نخود (*Cicer arietinum*)، کلزار (*Brassica napus*)، باقلا (*Lupinus albus*) و کاهو (*Lactuca sativa*) دارای سیستم ریشه ای توسعه یافته‌اند که می‌توانند اسیدهای آلی مانند اگزالیک اسید، مالیک اسید و سترات را به داخل ریزوسفر ریشه تراوش کنند و باعث انحلال استروویت شوند (Eradal et al., 2023; Talboy et al., 2016). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که گیاهان تیمار شده با استروویت و کودهای مرکب نسبت به سایر تیمارها دارای طول ریشه کوتاه‌تری هستند که دلیل این امر را تلاش ریشه‌ها برای رسیدن و دسترسی به عناصر غذایی گزارش کرده اند (Eradal et al., 2023; Vysotskaya et al., 2016). اگرچه ریشه‌ها در شرایط استفاده از استروویت و کودهای مرکب کوتاه‌تر هستند، وزن آنها نزدیک یا حتی برتر از سایر کودهای کارآمد است که این مسئله نشان می‌دهد که ساختار ریشه گیاهان رشد یافته در شرایط استفاده از استروویت کوتاه‌تر اما متراکم‌تر است. اردال و همکاران (Eradal et al., 2023) در بررسی مقایسه اثر دو نوع استروویت (نوع ۱ و ۲ به ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری (مونو آمونیوم فسفات، دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و کود ۲۰-۲۰-۲۰) بر رشد گیاه کاهو در یک خاک آهکی گزارش کردند که تیمارهای مورد بررسی بر شاخص SPAD کاهو در سطح یک درصد معنادار شد به گونه‌ای که بیشترین مقدار آن با میانگین ۲۸/۹ واحد اسپد مربوط به استروویت نوع یک بود هر چند از لحاظ آماری با استروویت نوع دو و کود ۲۰-۲۰-۲۰ و دی آمونیوم فسفات از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۲۳ واحد اسپد مربوط به تیمار شاهد (بدون استفاده فسفر) بود. جایگزینی جزئی یا کامل کود استروویت با کودهای تجاری فسفر دارای مزایای زیست محیطی فراوانی است علاوه بر بازیابی فسفر از شیرابه‌ها و لجن فاضلاب، باعث کاهش خطرات آبخوبی فسفات‌ها در اثر مصرف کودهای تجاری می‌شود.

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین‌های اثر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر صفات فیزیولوژیک گیاه گندم  
**Table 6. Means comparison of the effect of different levels of Struvite on the physiological traits of wheat**

منابع	تیمار treatment	کلروفیل a میلی گرم بر گرم تازه Chlorophyll a (mg g <sup>-1</sup> )	کلروفیل b میلی گرم بر گرم تازه Chlorophyll b (mg g <sup>-1</sup> )	کلروفیل کل میلی گرم بر گرم تازه Total Chlorophyll (mg g <sup>-1</sup> )	کارتنوئید میلی گرم بر گرم تازه Carotenoid (mg g <sup>-1</sup> )
۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 50 kg TSP ha <sup>-1</sup>	شاهد	0.372e	0.161k	0.533f	0.191kl
	S0:P0				
	۱۰۰ درصد سوپر فسفات	0.527d	0.189j	0.716e	0.203jk
	S0:P100				
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات	0.495d	0.218i	0.714e	0.205j
	S25:P75				
	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات	0.473d	0.223i	0.697e	0.218i
	S50:P50				
	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات	0.476d	0.238h	0.713e	0.220i
	S75:P25				
۱۰۰٪ استروویت	0.614c	0.257g	0.872d	0.220i	
S100:P0					
۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 100 kg TSP ha <sup>-1</sup>	شاهد	0.373e	0.159k	0.532f	0.177m
	S0:P0				
	۱۰۰ درصد سوپر فسفات	0.637bc	0.274f	0.911d	0.232h
	S0:P100				
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات	0.620c	0.274f	0.895d	0.246g
	S25:P75				
	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات	0.710a	0.275ef	0.988c	0.250fg
	S50:P50				
	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات	0.749a	0.283e	1.033abc	0.259ef
	S75:P25				
۱۰۰٪ استروویت	0.737a	0.296d	1.032abc	0.265de	
S100:P0					
۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP ha <sup>-1</sup>	شاهد	0.372e	0.164k	0.536f	0.183lm
	S0:P0				
	۱۰۰ درصد سوپر فسفات	0.699ab	0.302cd	1.001c	0.272cd
	S0:P100				
	۲۵٪ استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات	0.706ab	0.304cd	1.01bc	0.282bc
	S25:P75				
	۵۰٪ استروویت + ۵۰٪ سوپر فسفات	0.727a	0.310bc	1.037abc	0.291ab
	S50:P50				
	۷۵٪ استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات	0.766a	0.332a	1.09a	0.296a
	S75:P25				
۱۰۰٪ استروویت	0.758a	0.314b	1.07ab	0.292ab	
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.

## نتیجه گیری:

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد است با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) پارامترهای مورد بررسی افزایش یافت به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتوتنئید به ترتیب با میانگین ۰/۷۶۶، ۰/۳۳۲، ۱/۰۹ و ۰/۲۹۶ میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار ۷۵ درصد استروویت + ۲۵ درصد کود سوپر فسفات تریپل بدست آمد. نتایج همچنین نشان داد کاربرد تیمار ۱۰۰ درصد کود استروویت نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد کود سوپر فسفات تریپل به ترتیب باعث افزایش ۱۰/۰۵ و ۳۱/۰۱ درصدی در مقدار غلظت و جذب فسفر شد. این امر می تواند به دلیل هم افزایی عناصر موجود در کود استروویت نسبت به کودهای تجاری باشد. با وجود حلالیت کم استروویت به اندازه کود فسفره بسیار محلول، برای گیاهان موثر است. با این حال، دلایل این دوگانگی ظاهری و مکانیسم های خاص انحلال استروویت هنوز نامشخص است. بنابراین اندازه گیری های دقیق تر برای بسترهای با pH و EC مختلف، بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و جزء بندی فسفر در خاک به درک بهتر استفاده از استروویت کمک خواهد کرد. بنابراین توصیه می شود منشاء استخراج استروویت، زمان بندی و نرخ کاربرد در رابطه با تقاضای محصولات زراعی و باغی مختلف بهینه شود.

## References

- Achat, D. L., Daumer, M. L., Sperandio, M., Santellani, A. C., & Morel, C. (2014a). Solubility and mobility of phosphorus recycled from dairy effluents and pig manures in incubated soils with different characteristics. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 99, 1-15.
- Achat, D. L., Sperandio, M., Daumer, M. L., Santellani, A. C., Prud'Homme, L., Akhtar, M., & Morel, C. (2014b). Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma*, 232, 24-33.
- Ackerman, J. N., Zvomuya, F., Cicek, N., & Flaten, D. (2013). Evaluation of manure-derived struvite as a phosphorus source for canola. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(3), 419-424.
- Arzani, A., & Ashraf, M. (2017). Cultivated ancient wheats (*Triticum* spp.): A potential source of health-beneficial food products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 477-488.
- Barbosa, S. G., Peixoto, L., Meulman, B., Alves, M. M., & Pereira, M. A. (2016). A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources. *Chemical Engineering Journal*, 298, 146-153.
- Bastida, F., Jehmlich, N., Martínez-Navarro, J., Bayona, V., García, C., & Moreno, J. L. (2019). The effects of struvite and sewage sludge on plant yield and the microbial community of a semiarid Mediterranean soil. *Geoderma*, 337, 1051-1057.
- Bonvin, C., Etter, B., Udert, K. M., Frossard, E., Nanzer, S., Tamburini, F., & Oberson, A. (2015). Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine. *Ambio*, 44, 217-227.
- 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.

- Degryse, F., Baird, R., Da Silva, R. C., & 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.
- Ehmann, A., Bach, I. M., Laopeamthong, S., Bilbao, J., & Lewandowski, I. (2017). Can phosphate salts recovered from manure replace conventional phosphate fertilizer? *Agriculture*, 7(1), 1.
- Eisenhauer, N., Lanoue, A., Strecker, T., Scheu, S., Steinauer, K., Thakur, M. P., & Mommer, L. (2017). Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific reports*, 7(1), 44641.
- El-Rafie, S., Hawash, S., & Shalaby, M. S. (2013). Evaluation of struvite precipitated from chemical fertilizer industrial effluents. *Advances in Applied Science Research*, 4(1), 113-123.
- ERDAL, İ., MEJRİ, R., YAYLACI, C., & TÜRKAN, Ş. A. (2023). Comparison of the Effectiveness of Struvite and Some Commercial Fertilizers on the Growth of Lettuce. *Bahçe*, 52(2), 95-102.
- Gell, K., De Ruijter, F. J., Kuntke, P., De Graaff, M., & Smit, A. L. (2011). Safety and effectiveness of struvite from black water and urine as a phosphorus fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, 3(3), 67.
- González-Ponce, R., López-de-Sá, E. G., & Plaza, C. (2009). Lettuce response to phosphorus fertilization with struvite recovered from municipal wastewater. *HortScience*, 44(2), 426-430.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, 4(2), 83-91.
- Guyonnet, J. P., Cantarel, A. A., Simon, L., & Haichar, F. E. Z. (2018). Root exudation rate as functional trait involved in plant nutrient- use strategy classification. *Ecology and Evolution*, 8(16), 8573-8581.
- Hakim, A., Jaganath, S., Honnabyraiah, M. K., Kumar, S. M., Kumar, S. A., & Dayamani, K. J. (2018). Effect of biofertilizers and Auxin on total chlorophyll content of leaf and leaf area in pomegranate (*Punica granatum L.*) cuttings. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 6(1), 987-991.
- Hall, R. L., Staal, L. B., Macintosh, K. A., McGrath, J. W., Bailey, J., Black, L., ... & Williams, P. N. (2020). Phosphorus speciation and fertiliser performance characteristics: A comparison of waste recovered struvites from global sources. *Geoderma*, 362, 114096.
- Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., & 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.
- Hertzberger, A. J., Cusick, R. D., & Margenot, A. J. (2021). Maize and soybean response to phosphorus fertilization with blends of struvite and monoammonium phosphate. *Plant and Soil*, 461, 547-563.
- Hopkins, B. G., & Hansen, N. C. (2019). Phosphorus management in high- yield systems. *Journal of environmental quality*, 48(5), 1265-1280.
- Hopkins, B., & Ellsworth, J. (2003, January). Phosphorus nutrition in potato production. In *Idaho Potato Conference* (pp. 22-23).
- Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009). *FeHPO CaHPO*, 4.
- Jama-Rodzeńska, A., Chohura, P., Gałka, B., Szuba-Trznadel, A., Falkiewicz, A., & Białkowska, M. (2022). Effect of Different Doses of Phosgreen Fertilization on Chlorophyll, K, and Ca Content in Butterhead Lettuce (*Lactuca sativa L.*) Grown in Peat Substrate. *Agriculture*, 12(6), 788.

- Jones Jr, J. B., & Case, V. W. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil testing and plant analysis*, 3, 389-427.
- Kuo, S., Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (1996). Phosphorus. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison. *Soil Sci Soc Am. Inc Am Soc Agron Inc*, 4-9.
- Li, B., Huang, H. M., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, Y. F., Wang, G. Q., & Young, B. R. (2019). Phosphorus recovery through struvite crystallisation: Recent developments in the understanding of operational factors. *Journal of environmental management*, 248, 109254.
- Liang, S., Chen, H., Zeng, X., Li, Z., Yu, W., Xiao, K., ... & Yang, J. (2019). A comparison between sulfuric acid and oxalic acid leaching with subsequent purification and precipitation for phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash. *Water research*, 159, 242-251.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, Y., Chen, J., Mol, A. P., & Ayres, R. U. (2007). Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2), 454-474.
- Ma, J., Zhao, D., Tang, X., Yuan, M., Zhang, D., Xu, M., ... & Jiang, L. (2022). Genome-wide association study on root system architecture and identification of candidate genes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1843.
- Mancho, C., Diez-Pascual, S., Alonso, J., Gil-Díaz, M., & Lobo, M. C. (2023). Assessment of recovered struvite as a safe and sustainable phosphorous fertilizer. *Environments*, 10(2), 22.
- Meng, X., Liu, X., Huang, Q., Gao, H., Tay, K., & Yan, J. (2019). Recovery of phosphate as struvite from low-temperature combustion sewage sludge ash (LTCA) by cation exchange. *Waste Management*, 90, 84-93.
- Militaru, B. A., Lupa, L., & Pode, R. (2019). Phosphorus recovery as struvite from sewage sludge ash. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 19(4.1), 749-755.
- Nongqwenga, N., Muchaonyerwa, P., Hughes, J., Odindo, A., & Bame, I. (2017). Possible use of struvite as an alternative phosphate fertilizer. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(3), 581-593.
- Olsen, S. R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (No. 939). US Department of Agriculture.
- Page, A. L. (1982). *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties* (Vol. 9). American Society of Agronomy.
- Ryu, H. D., Lim, C. S., Kang, M. K., & Lee, S. I. (2012). Evaluation of struvite obtained from semiconductor wastewater as a fertilizer in cultivating Chinese cabbage. *Journal of hazardous materials*, 221, 248-255.
- Seyhan, D. (2009). Country-scale phosphorus balancing as a base for resources conservation. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(12), 698-709.
- Talboys, P. J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J. R., Jones, D. L., & Withers, P. J. (2016). Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and soil*, 401, 109-123.
- 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.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

- Wen, G., Huang, L., Zhang, X., & 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 & Innovation*, *15*, 100384.
- Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., & Shao, L. (2012). Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences*, *24*(8), 1533-1538.
- Zin, M. M. T., & 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.