Journalof Farayandno – Vol. 20 – No. 90 (2025): 91-101

Research Article

DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067250.2003

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Production of Sulfur-Bentonite Fertilizer from Gas Sweetening Waste at and Evaluation of its Performance on Sulfur Release in Soil

Yasaman Salamat[1], Hosein Hamadi[2*], Kazem Mokafa[3]

[1] PhD Student, Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University, Ahvaz

[2] Associate Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University, Ahvaz

[3] Research and Technology Expert, Research and Technology Unit, Abadan Oil Refinery, Abadan

Received: 16 May 2025 **Accepted:** 17 Aug 2025

Abstract

In this study, the possibility of producing bentonite-sulfur fertilizer from sulfur waste from the Abadan Refinery's desalination unit was investigated with an applied approach. For this purpose, fertilizer samples with different percentages of bentonite were prepared and subjected to laboratory tests to evaluate the effect of bentonite content on the sulfur release process in soil. The research method included processing sulfur waste, preparing bentonite-sulfur compounds in different concentrations, and comparative experiments in controlled soil conditions. In addition to measuring the sulfur release rate, the performance of the produced fertilizer was also compared with similar industrial samples. The total sulfur content of the sample was 99.23% of the received waste, and no significant heavy metals were observed in it. The results showed that increasing the proportion of bentonite from 10% to 50% increased the sulfur release rate from 4.63 to 11.54 mg/L, which is attributed to the improved dispersion of sulfur particles and the increased contact surface area of sulfur particles in the soil. Comparison with existing commercial fertilizers showed that the product produced from refinery waste has similar efficiency and, in some cases, relative superiority.

Keyword: Sulfur Bentonite Fertilizer, Soil Fertility, Refinery Sulfur Waste, Sustainable Agriculture, Industrial Waste Management.

* h.hammadi@scu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Salamat, Y., Hamadi, H., Mokafa, K., “Production of Sulfur-Bentonite Fertilizer From Gas Sweetening Waste at Abadan Refinery and Evaluation of its Performance on Sulfur Release in Soil”, Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 90, pp. 91-101, In Persian, (2025).

نشریه فرآیندنو، سال بیستم، شماره 90، صص 101-91 (تابستان 1404)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067250.2003

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

تولید کود بنتونیتی گوگردی از زائدات واحد شیرین‌سازی گاز و بررسی عملکرد کود بر رهاسازی گوگرد در خاک

یاسمن سلامات[1]، حسین حمادی[2*]، کاظم مکفا[3]

[1] دانشجوی دکترا شیمی آلی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

[2] دانشیار شیمی آلی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

[3] کارشناس پژوهش و فناوری، واحد پژوهش و فناوری، پالایشگاه نفت آبادان، آبادان، ایران

دریافت: 1404/02/26 **پذیرش:** 1404/05/26

چکیده

در این پژوهش با رویکردی کاربردی، امکان تولید کود بنتونیت-گوگردی از زائدات گوگردی واحد شیرین‌سازی پالایشگاه آبادان مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، نمونه‌های کود با درصدهای مختلف بنتونیت تهیه و تحت آزمون‌های آزمایشگاهی قرار گرفتند تا اثر میزان بنتونیت بر فرآیند رهاسازی گوگرد در خاک ارزیابی شود. روش تحقیق شامل فرآوری زائدات گوگردی، تهیه ترکیبات بنتونیت-گوگردی در غلظت‌های متفاوت، و آزمایش‌های مقایسه‌ای در شرایط کنترل‌شده خاک بود. علاوه بر سنجش میزان آزادسازی گوگرد، عملکرد کود تولیدی با نمونه‌های مشابه صنعتی نیز مقایسه گردید. مقدار کل گوگرد نمونه، 99/23% زائدات دریافتی بوده و هیچ فلز سنگین قابل توجهی در آن مشاهده نشد. نتایج نشان داد افزایش سهم بنتونیت از 10% به 50% میزان رهاسازی گوگرد را از 4/63 به 11/54 mg/L افزایش می‌دهد که این امر، به دلیل بهبود پراکنش ذرات گوگرد و افزایش سطح تماس ذرات گوگرد در خاک می‌باشد. مقایسه با کودهای تجاری موجود نشان داد محصول تولید شده از زائدات پالایشگاه، کارایی مشابه و در برخی موارد برتری نسبی دارد.

کلمات کلیدی: کود بنتونیت گوگردی، حاصلخیزی خاک، زائدات گوگردی پالایشگاه، کشاورزی پایدار، مدیریت پسماند صنعتی

* h.hammadi@scu.ac.ir

استناد به مقاله:

سلامات،ی.، حمادی،ح.، مکفا،ک.، "تولید کود بنتونیتی گوگردی از زائدات واحد شیرین سازی گاز پالایشگاه آبادان و بررسی عملکرد کود بر رهاسازی گوگرد در خاک"، نشریه فرآیندنو، سال نوزدهم، شماره 88، صص.101-91، (تابستان 1404).

1- مقدمه

گوگرد (S) یکی از عناصر پرمصرف و ضروری برای رشد و نمو گیاهان است که در سنتز اسیدهای آمینه (سیستئین، متیونین)، پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و ترکیبات ثانویه نقش بنیادی دارد [1، 2]. در گذشته، رسوب جوی گوگرد ناشی از فعالیت‌های صنعتی نقش مهمی در بازپروری ذخایر خاک ایفا می‌کرد، اما با گسترش استفاده از سوخت‌های کم‌گوگرد و اجرای قوانین سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، این ورودی‌ها به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. در نتیجه، کمبود گوگرد به‌ویژه در خاک‌های آهکی و قلیایی که ذاتاً دارای سولفات کمی هستند، به یکی از محدودیت‌های اصلی در تولیدات کشاورزی تبدیل شده است [3، 4]. صنعت نفت و گاز به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد جهانی، نقش حیاتی در تأمین انرژی و مواد اولیه برای صنایع مختلف ایفا می‌کند. با این حال، فرآیندهای استخراج، پالایش و فرآوری این منابع، به ویژه در واحدهای شیرین‌سازی، منجر به تولید حجم بالایی از زائدات گوگردی می‌شود که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌توانند تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان‌ها باشند [5-7].

صنایع پالایش نفت و شیرین‌سازی گاز طبیعی سالانه میلیون‌ها تن گوگرد عنصری تولید می‌کنند. ایران، کانادا و عربستان سعودی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان این محصول جانبی هستند که به انباشت گسترده گوگرد در محوطه پالایشگاه‌ها منجر شده است [8]. روش‌های سنتی مدیریت این پسماندها، شامل دفن یا سوزاندن، نه تنها ناکارآمد بوده‌اند بلکه خود منبعی از آلودگی‌های ثانویه مانند تولید اسید سولفوریک، تغییر pH خاک و انتشار ذرات معلق محسوب می‌شوند [9]. گوگرد پالایشگاهی معمولاً به‌صورت بلوری، آب‌گریز و با اندازه ذرات نسبتاً درشت است؛ ویژگی‌هایی که سرعت اکسیداسیون میکروبی آن در خاک و کارایی زراعی کوتاه‌مدت را به‌شدت کاهش می‌دهد. مطالعات متعددی تأیید کرده‌اند که مصرف مستقیم گوگرد پالایشگاهی در خاک اثر اندکی داشته و آزادسازی سولفات در آن بسیار کند است [10، 11].

در سال‌های اخیر، با افزایش توجه به اصول توسعه پایدار و مدیریت سبز پسماندهای صنعتی، پژوهش‌های متعددی بر تبدیل این مواد کم‌ارزش به محصولات با ارزش افزوده متمرکز شده‌اند [12]. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، استفاده از زائدات گوگردی پالایشگاه‌ها برای تولید کودهای کشاورزی، به‌ویژه کود بنتونیت‌ـگوگردی است. این مشکل در خاک‌های آهکی و قلیایی، که بخش وسیعی از اراضی کشاورزی ایران را شامل می‌شود، به‌دلیل محدودیت در حلالیت و جذب گوگرد تشدید می‌گردد.

کودهای بنتونیت-گوگرد که در آن بنتونیت به‌عنوان یک رس متورم‌شونده با گوگرد مذاب طی فرآیند گرانول‌سازی ترکیب می‌شود یک انتخاب مناسب می‌باشد. این ترکیب پس از ورود به خاک و جذب رطوبت، متورم شده و موجب خرد شدن گرانول‌ها به ذرات ریزتر می‌شود که به‌سرعت توسط میکروارگانیسم‌ها اکسید می‌گردند. مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی اثربخشی این کود را نشان داده‌اند. برای نمونه، شیوای و همکارانش گزارش کردند که کود گوگرد–بنتونیت باعث افزایش دسترسی سولفات و جذب عناصر غذایی در برنج می‌شود [13]؛ در پژوهش دیگری نیز مشاهده شد که کود گوگرد-بنتونیت باعث افزایش عملکرد دانه و روغن در کلزا می‌شود [14]؛ و همچنین این کود باعث بهبود فعالیت میکروبی و افزایش حلالیت ریزمغذی‌ها در خاک‌های قلیایی می‌شود [15].

بنتونیت به واسطه خاصیت تورم‌پذیری و توانایی ایجاد پراکنش یکنواخت ذرات گوگرد، سطح تماس آن را در خاک افزایش داده و فرآیند اکسیداسیون و تبدیل به سولفات را تسهیل می‌کند [16]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این

نوع کود علاوه بر بهبود آزادسازی گوگرد، موجب اصلاح pH خاک، افزایش دسترسی عناصر ریزمغذی، ارتقای کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی، و حتی کاهش آفات و بیماری‌های خاک‌زاد می‌شود [17]. با وجود این، بخش عمده تحقیقات گذشته بر استفاده از گوگرد خالص یا منابع تجاری متمرکز بوده و بهره‌گیری مستقیم از زائدات پالایشگاهی در این زمینه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

چندین مطالعه در سال‌های اخیر منتشر شده‌اند، که محققان به بررسی استفاده از زائدات صنعتی و گوگرد برای تولید کودهای جدید پرداختند و نتایج نشان داد که این کودها می‌توانند نیازهای تغذیه‌ای گیاهان را بهتر تأمین کنند و در عین حال به مدیریت پسماندهای صنعتی کمک کنند [18-20]. در ایران نیز که کمبود گوگرد در خاک‌های آهکی شایع است، مطالعات متعددی اثر مثبت کود گوگرد–بنتونیت را تأیید کرده‌اند. خاکی و همکاران گزارش کردند که این کود باعث افزایش حلالیت آهن و روی و بهبود رشد ذرت شد [21]. مهدوی و همکاران در گندم افزایش عملکرد دانه و جذب گوگرد را مشاهده کردند [22]. همچنین قاسمی و همکاران در کلزا نشان دادند که گوگرد–بنتونیت علاوه بر افزایش عملکرد دانه، کیفیت روغن را نیز بهبود بخشید و نیز تأکید کرد که گوگرد پالایشگاهی به‌صورت مستقیم کارایی کمی دارد، اما هنگامی که با بنتونیت ترکیب شود، سرعت اکسیداسیون و فراهمی سولفات به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد [23].

مرور همزمان مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که:

- گوگرد پالایشگاهی مستقیم: اکسیداسیون کند، کارایی کم در کوتاه‌مدت، انباشت زیست‌محیطی.
- گوگرد پودری: سرعت اکسیداسیون بالاتر اما مشکلات عملی در کاربرد (گردوغبار، توزیع غیریکنواخت).
- کود گوگرد–بنتونیت: اکسیداسیون سریع‌تر، آزادسازی تدریجی سولفات، افزایش حلالیت ریزمغذی‌ها و بهبود عملکرد گیاه.

بنابراین تبدیل گوگرد مازاد پالایشگاهی به کود گوگرد–بنتونیت نه تنها اثربخشی زراعی آن را افزایش می‌دهد، بلکه رویکردی پایدار برای مدیریت پسماندهای صنعتی است. هدف این تحقیق، تولید کود گوگرد–بنتونیت از گوگرد مازاد واحد شیرین‌سازی گاز پالایشگاه آبادان و ارزیابی عملکرد آن در آزادسازی گوگرد در خاک است. نتایج این پژوهش می‌تواند راهکاری پایدار برای مدیریت پسماند گوگرد در صنایع نفت و گاز فراهم کند و همزمان موجب بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی گردد.

2- الگوسازی نظری یا تجربی

2-1-آنالیز عناصر موجود در زائدات گوگردی

برای ارزیابی ترکیب شیمیایی و تعیین مقدار کل عناصر موجود در زائدات گوگردی پالایشگاه، از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) جهت اندازه‌گیری کمی عناصر و ترکیبات نمونه‌ها استفاده شد. علاوه بر این، برای بررسی سطحی و تحلیل کیفی عناصر، از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) بهره‌گیری گردید، که توانایی تشخیص عناصر با دقت بالا و تعیین ترکیب سطحی نمونه‌ها را فراهم می‌کند.

2-2- تهیه کود بنتونیت گوگردی

کود بنتونیت-گوگردی با درصدهای مختلف 90%، 75%، 60% و 50% تهیه شد. ابتدا مقدار مشخصی از گوگرد با استفاده از ترازو وزن شد و در یک بوته چینی قرار گرفت تا ذوب شود. سپس مقدار مناسب بنتونیت مطابق درصد

مورد نظر به گوگرد ذوب شده اضافه و به‌خوبی هم زده شد. بوته پس از سرد شدن به دمای محیط منتقل شد و کود به دست آمده پودر شد تا برای استفاده آماده گردد. تصویر نمونه‌های تولیدشده با درصدهای مختلف در شکل 1 نشان داده شده است.

شکل 1- کودهای بنتونیت گوگردی با درصدهای مختلف گوگرد

2-3- تعیین بافت خاک

خاک مورد استفاده برای بررسی عملکرد کود، از محوطه فضای سبز دانشگاه شهید چمران اهواز جمع‌آوری شد. نمونه‌ها پس از الک کردن، همگن شدند تا دانه‌های خاک از یکدیگر جدا شده و ساختاری یکنواخت حاصل شود. با استفاده از روش هیدرومتر، بافت خاک تعیین و درصد رس، کلوئید و ذرات درشت‌تر مشخص گردید.

2-4- ظرفیت نگهداری آب خاک

100 گرم خاک به مدت 24 ساعت در دمای 105 درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد. سپس خاک خشک به ظرف مناسبی منتقل و آب مقطر تا حد اشباع به آن اضافه شد. پس از اشباع، خاک وزن شد و ظرفیت نگهداری آب خاک از طریق معادله زیر محاسبه گردید:

$$\text{درصد ظرفیت نگهداری آب خاک} = \frac{\text{وزن آب}}{\text{وزن خاک خشک}} \times 100 \quad (1)$$

2-5- اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی خاک

برای تعیین pH و EC خاک، ابتدا عصاره خاک تهیه شد. مقدار مشخصی از خاک در بشر ریخته شد و آب مقطر تا حد اشباع به آن افزوده شد. پس از 24 ساعت، عصاره خاک فیلتر شد و pH توسط pH متر و هدایت الکتریکی توسط EC متر اندازه‌گیری گردید.

2-6- تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC)

125 گرم خاک به ارلن اضافه شد و 125 میلی‌لیتر محلول آمونیوم استات یک مولار به آن افزوده و به مدت 16 ساعت قرار گرفت. سپس خاک فیلتر و با 8 مرتبه شستشو با اتانول آماده شد. NH_4 جذب‌شده استخراج (با 8 مرتبه افزودن 25 میلی لیتر محلول پتاسیم کلرید 1 مولار) شده و با افزودن فرمالدهید و شناساگر فنول فتالئین تیتر گردید. ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$\text{CEC}\left(\frac{cmol}{kg}\right) = \frac{(NH_4\text{-}N)}{14} \quad (2)$$

2-7- بررسی رهاسازی کود بنتونیت-گوگردی در خاک

برای ارزیابی تأثیر درصد بنتونیت بر رهاسازی گوگرد، 0/05 گرم از کود گوگرد خالص و نمونه‌های کود بنتونیت-گوگردی با نسبت‌های 90%، 75%، 60% و 50% در ظرف‌های حاوی 100 گرم خاک قرار گرفت و 70 میلی‌لیتر آب مقطر به آن‌ها اضافه شد. آزمایش به مدت 97 روز انجام شد. پس از پایان دوره، عصاره خاک توسط محلول پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات 0/32 میلی‌مولار استخراج و سانتریفیوژ شد. برای تعیین گوگرد رهاشده، 50 میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده با 5 میلی‌لیتر HCl غلیظ و 5 میلی‌لیتر محلول ید 0/01 نرمال ترکیب شد و با نشاسته به عنوان شناساگر، با سدیم تیوسولفات 0/1 نرمال تیتر گردید. میزان سولفات آزاد شده با فرمول زیر محاسبه شد:

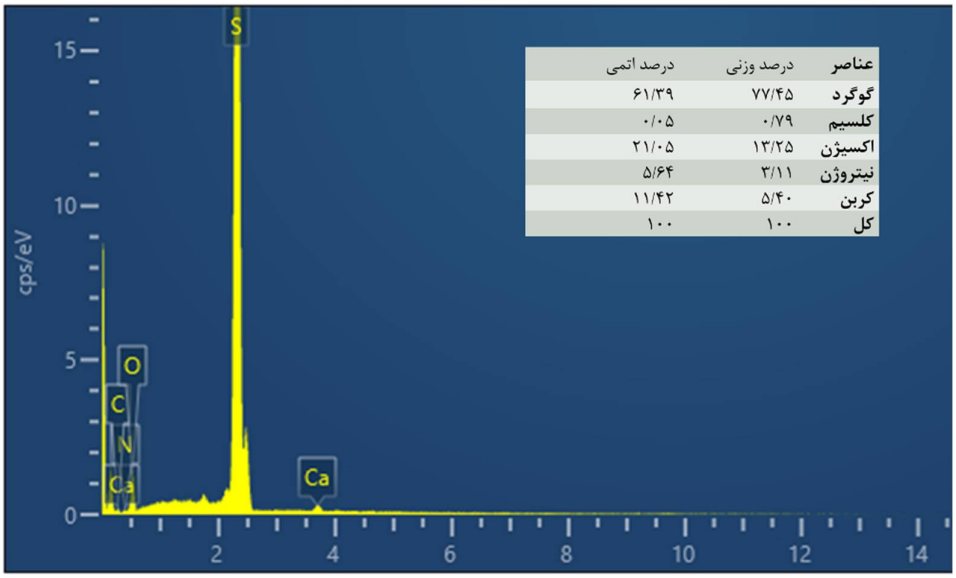
$$S^{2-} = \frac{1000}{V_{ml}\,sample \times V_{ml}titre} \times 0.1603 \qquad (3)$$

در این مطالعه، برای بررسی عملکرد کود بنتونیت گوگردی، خاک مناسبی از محوطه فضای سبز دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شد. پس از جمع‌آوری، نمونه خاک از طریق الک کردن عبور داده شد تا دانه‌های خاک از یکدیگر جدا شده و ساختاری یکنواخت و همگن از خاک حاصل شود. در ادامه، با استفاده از روش هیدرومتر، بافت خاک مورد مطالعه قرار گرفت و درصد رس، کلوئید و ذرات درشت‌تر تعیین شد.

3- نتایج و بحث

3-1- آنالیز ترکیب شیمیایی زائدات گوگردی

برای شناسایی و بررسی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه زائدات گوگردی پالایشگاه آبادان، از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. نتایج آنالیز (شکل 2) نشان داد که بیشترین عنصر سطحی نمونه گوگرد است (77/45% وزنی). عناصر دیگر شامل کلسیم (0/79%)، اکسیژن (13/25%)، نیتروژن (3/11%) و کربن (5/64%) بودند. عدم مشاهده عناصر سنگین و سمی، نشان‌دهنده کیفیت نسبتاً خوب و عدم آلودگی شدید نمونه است.



عناصر	درصد وزنی	درصد اتمی
گوگرد	۷۷/۴۵	۶۱/۳۹
کلسیم	۰/۷۹	۰/۰۵
اکسیژن	۱۳/۲۵	۲۱/۰۵
نیتروژن	۳/۱۱	۵/۶۴
کربن	۵/۴۰	۱۱/۴۲
کل	۱۰۰	۱۰۰

شکل 2- تصویر آنالیز EDX نمونه زائدات گوگردی

علاوه بر آن، برای تعیین مقدار کل گوگرد نمونه، از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده شد که حاکی از 99/23% گوگرد در نمونه بود و هیچ فلز سنگین قابل توجهی گزارش نشد. همچنین آنالیز XRF خاک و بنتونیت مورد استفاده نشان داد که مقدار گوگرد موجود در خاک و بنتونیت به ترتیب تنها 0/073% و 0/43% است که قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

2-3- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده است. خاک دارای بافت لومی بوده، pH برابر با 6/7، هدایت الکتریکی 1113 µS/cm ، ظرفیت نگهداری آب 0/53% و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) 1/54 cmol/kg است. این ویژگی‌ها خاک را برای آزمایش رهاسازی کود گوگردی مناسب می‌سازد.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ورودی	ویژگی خاک	
1	بافت خاک	لومی
2	pH	6/7
3	EC	1113
4	ظرفیت نگهداری آب	0/53
5	ظرفیت تبادل کاتیونی	1/54

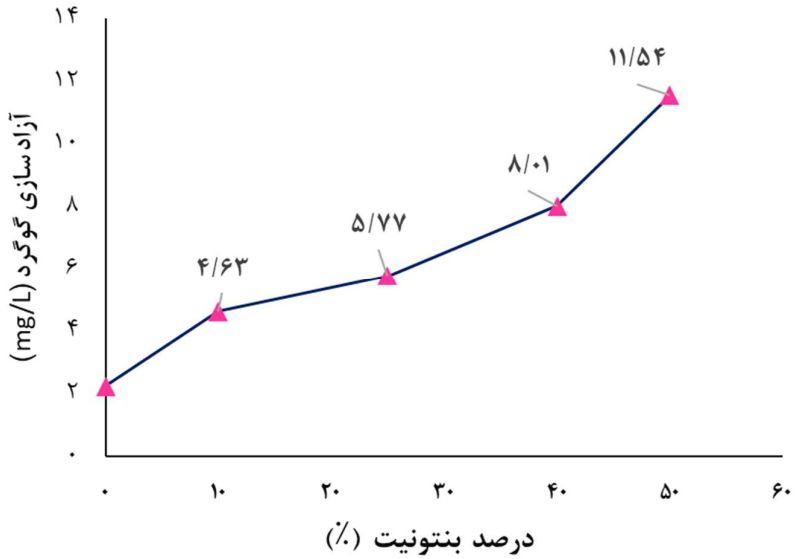
3-3- تأثیر درصد بنتونیت بر رهاسازی گوگرد

برای بررسی اثر درصد بنتونیت، نمونه‌های کود با نسبت‌های 90%، 75%، 60% و 50% در مدت 97 روز مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل 3). نتایج نمودار شکل 3 نشان داد که افزایش درصد بنتونیت از 10% به 50% موجب افزایش سرعت و میزان رهاسازی گوگرد از 4/63 به 11/54 می‌شود، که این افزایش به دلیل خاصیت متورم شدن بنتونیت و ارتقای سطح تماس بین ذرات گوگرد و محیط خاک و تسهیل فرآیند اکسیداسیون گوگرد رخ می‌دهد. بنابراین، رابطه مستقیمی بین میزان بنتونیت و کارایی آزادسازی گوگرد مشاهده شد که می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف کودهای گوگردی کاربرد داشته باشد. پژوهش‌های مختلفی در مورد اثر کودهای گوگرد و اثر مقدار بنتونیت گزارش شده است از جمله بوسول و همکاران اثر مقدار بنتونیت را در کود گوگرد-بنتونیت بر آزاد سازی گوگرد در خاک مورد مطالعه قرار دادند که نتایج نشان دادند با افزایش مقدار بنتونیت از 5% به 40% مقدار آزادسازی گوگرد در خاک افزایش می‌یابد، که تأییدی بر اثر بنتونیت بر افزایش آزادسازی است [16]. در پژوهشی دیگر اثر اوره آغشته شده با گوگرد مورد مطالعه قرار گرفت، که نشان داد اکسیداسیون در حضور این فرم از گوگرد به دلیل پراکندگی ناکافی ذرات گوگرد کاهش می‌یابد [24]. همچنین اثر هم‌افزایی استفاده از ترکیب گوگرد-بنتونیت به همراه مواد فسفری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که نشان می‌دهد که گوگرد با کاهش pH خاک و بنتونیت با فزایش احتباس آب در خاک موجب افزایش فراهمی فسفات برای گیاهان می‌شوند [25]. در یک فرمولاسیون جدیدتر اثر استفاده از ترکیب کود گوگرد-بنتونیت و ضایعات کشاورزی بر روی جوانه‌زنی گیاهان مورد مطالعه قرار گرفت که نشان داد استفاده از این ترکیب موجب افزایش جوانه‌زنی گیاهان می‌شود [26].

یک مطالعه مقایسه‌ای بین فرم‌های مختلف کود گوگردی در جدول 2 آورده شده است. سولفات آمونیوم یکی از فرم‌های رایج کود گوگردی است. در سولفات آمونیوم، سولفات به شکل محلول است و به سرعت در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. گچ ژیپس منبع دیگر کود گوگردی است که نسبت به سولفات آمونیوم حلالیت کمتری دارد، اما به سرعت گوگرد را آزاد می‌کند. شکل رایج دیگر، گوگرد پودری است، گوگرد در فرم عنصری، برای رهاسازی باید توسط باکتری‌های خاک اکسید شود. بنابراین به دلیل نیاز به فعالیت میکروبی رهاسازی بسیار آهسته است. کود گوگرد به فرم بنتونیت-گوگردی به دلیل قابلیت بالای تورم و جذب آب خاک رس بنتونیت، گرانول‌های گوگرد را متلاشی می‌کند. این امر سطح تماس با باکتری‌ها را افزایش می‌دهد و بنابراین سرعت رهاسازی گوگرد افزایش می‌یابد. فرم‌های محلول گوگرد به دلیل حلالیت بالا در مدت زمان کم شسته می‌شوند و کاربرد کشاورزی آن‌ها را محدود می‌کند، اما در فرم بنتونیتی گوگرد با سرعت متوسط و به صورت تدریجی آزاد می‌گردد و برای مصارف کشاورزی مناسب‌تر می‌باشد.

جدول2- مقایسه رهاسازی گوگرد از منابع مختلف کودهای گوگردی

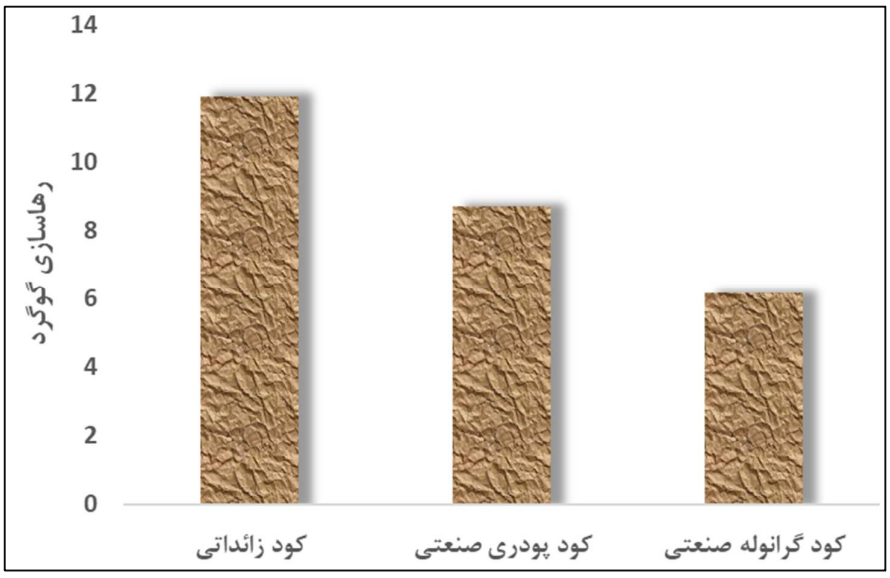
نوع کود گوگردی	غلظت سولفات آزاد شده	سرعت رهاسازی
سولفات آمونیوم	بالا (10-200mg/Kg)	بسیار سریع
گچ ژیپس	متوسط تا بالا (10-200mg/Kg)	سریع
گوگرد عنصری پودری	بسیار کم تا ناچیز (1-5mg/Kg)	بسیار آهسته
گوگرد-بنتونیت دار	متوسط (1-20mg/Kg)	آهسته و تدریجی



شکل 3- نمودار میزان رهاسازی گوگرد بر اساس نسبت درصد بنتونیت

4-3- مقایسه با کودهای صنعتی

عملکرد کود تولید شده از زائدات پالایشگاهی با کودهای صنعتی مشابه مقایسه شد (شکل 4). نتایج نشان می‌دهد که کود تولید شده، کارایی هم‌سطح و در برخی موارد کمی بالاتر از کودهای صنعتی دارد. این یافته‌ها اهمیت بازنگری و بهره‌برداری از مواد زائد صنعتی در تولید کودهای اقتصادی و مؤثر را برجسته می‌سازد و می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه کشاورزی پایدار باشد.



شکل4- نمودار مقایسه‌ای کود تهیه شده از زائدات با کودهای گوگرد بنتونیت صنعتی

4- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که بهره‌گیری از زائدات گوگردی واحد شیرین‌سازی پالایشگاه آبادان می‌تواند به عنوان یک منبع ارزان و در دسترس، راهکاری پایدار برای تولید کودهای کشاورزی ارائه دهد. نتایج کلیدی این مطالعه به شرح زیر است:

1. **کارایی محیطی و اقتصادی:** استفاده از این زائدات، علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، امکان تولید کود با کیفیت و اقتصادی را فراهم می‌آورد و می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت پسماندهای صنعتی کمک کند.
2. **تأثیر درصد بنتونیت بر رهاسازی گوگرد:** افزایش نسبت بنتونیت در ترکیب کود، با افزایش سطح تماس گوگرد با خاک، نقش حیاتی در بهبود فرآیند رهاسازی گوگرد دارد و می‌تواند کارایی کودهای گوگردی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.
3. **مقایسه با کودهای صنعتی:** کود تولید شده از زائدات پالایشگاه، عملکردی هم‌سطح و در برخی موارد برتر نسبت به کودهای صنعتی مشابه داشت، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این رویکرد در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش هزینه‌های تولید است.

4. **دیدگاه آینده‌نگر:** این مطالعه بر تلفیق فناوری‌های نوین با مدیریت زائدات صنعتی تأکید دارد و می‌تواند مبنای توسعه پروژه‌های مشابه در زمینه تولید انواع کودهای گوگردی چون کود اوره-گوگردی در سایر پالایشگاه‌ها یا صنایع تولیدی باشد.

به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نه تنها **بر ارزش فنی و اقتصادی کود بنتونیت–گوگردی تولید شده از زائدات صنعتی** تأکید می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که رویکردهای پایدار در مدیریت منابع زیستی و کشاورزی، می‌توانند همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را محقق سازند.

5- تشکر و قدردانی

از دانشگاه شهید چمران اهواز و پالایشگاه نفت آبادان به‌خاطر حمایت‌های مالی در انجام این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

6- منابع

[1] R. Prasad and Y. S. Shivay. "Sulphur in soil, plant and human nutrition". Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: *Biological Sciences*. vol. 88. no. 2. pp. 429-434, 2018.
[2] T. Zenda. S. Liu. A. Dong. and H. Duan. "Revisiting sulphur—The once neglected nutrient: Its roles in plant growth, metabolism, stress tolerance and crop production". *Agriculture*. vol. 11. no. 7. pp. 626, 2021.
[3] C. C. Boswell. "Sulfur in New Zealand soils and pasture: A review". *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 31(1). pp. 139–148, 1988.
[4] S. Sharma. A. Singh. and D. Patel. "Sulfur deficiency in global agriculture: Challenges and opportunities". *Agronomy*. vol. 14(2). pp. 285–297, 2024.
[5] J. G. Wagenfeld. K. Al-Ali. S. Almheiri. A. F. Slavens. and N. Calvet. "Sustainable applications utilizing sulfur, a by-product from oil and gas industry: A state-of-the-art review". *Waste Management*. vol. 95. pp. 78-89, 2019.
[6] P. R. Robinson. *Sulfur removal and recovery In Springer Handbook of Petroleum Technology*. pp. 649-673. Cham: Springer International Publishing, 2017.
[7] A. De Angelis. "Natural gas removal of hydrogen sulphide and mercaptans". *Applied Catalysis B: Environmental*. vol. 113. pp. 37-42, 2012.
[8] A. Muscolo. T. Papalia. G. Settineri. "Sulfur recovery and utilization in oil refining: A review". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. vol. 8(5). pp. 104303, 2020.
[9] O. P. Narayan. P. Kumar. B. Yadav. M. Dua. and A. K. Johri. "Sulfur nutrition and its role in plant growth and development". *Plant Signaling & Behavior*. vol. 18. no. 1. pp. 2030082, 2023.
[10] M. Rahmani. R. Khavarinejad. K. Davari. "The effect of refinery sulfur application on sulfate release in calcareous soils". *Iranian Journal of Soil and Water Sciences*. vol. 25(2). pp. 145–155, 2011.
[11] M. Yezdian. H. Fathi. A. Keshavarz. "Refinery sulfur and its oxidation rate in calcareous soils of Iran". *Iranian Journal of Agricultural Science*. vol. 46(3). pp. 451–463, 2015.
[12] S. Majee. K.K. Sarkar. R. Sarkhel. G. Halder. D.D. Mandal. N.K. Rathinam. and T. Mandal. "Bio-organic fertilizer production from industrial waste and insightful analysis on release kinetics". *Journal of environmental management*. vol. 325. pp.116378, 2023.
[13] Y. S. Shivay. R. P. Singh. D. Kumar. "Sulfur-bentonite fertilizer improves sulfate availability and nutrient uptake in rice". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. vol. 83(2). pp. 129–138, 2009.

[14] N. S. Solanki, N. S. V. Sharma."Performance of sulfur-bentonite fertilizer on mustard yield and oil content in calcareous soils". *International Journal of Plant & Soil Science*. vol. 22(6). pp. 1–9, 2018.
[15] T. R. Mohanty. J. Prasad. S. Singh. "Effect of sulfur-bentonite on microbial activity and nutrient availability in alkaline soils ". *Archives of Agronomy and Soil Science*. vol. 66(8). pp. 1079–1091, 2020.
[16] Boswell, C.C., Swanney, B. and Owers, W.R., 1988. Sulfur/sodium bentonite prills as sulfur fertilizers. 2. Effect of sulfur-sodium bentonite ratios on the availability of sulfur to pasture plants in the field. *Fertilizer research*, *15*(1), pp. 33-45.
[17] B. Souri and Z. Sayadi. "Efficiency of sulfur-bentonite granules to improve uptake of nutrient elements by the crop plant cultivated in calcareous soil". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. vol. 52. no. 20. pp. 2414-2430, 2021.
[18] Z. Feng. Z. Lu. Q. Liu. W. Carciochi. Z. Li. H. Ma. R. Liu. M. Yang. C. Liu. W. Zhang. and F. Zhang. "Waste resources based new sulfur fertilizers can better match crop nutrient requirement". *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 222. pp. 108467, 2025.
[19] E. Indriani. F. Athallah. E. Despriadi and P. Purnomosidi. "The Development of Environmental Friendly Biological Sulfur Recovery Unit (BSRU) For Sulfur Coated Urea with Slow Release Fertilizer Method: A Case Study in Field X". *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 11(2), pp. 167-172, 2024.
[20] Z. Xie. F. Deng. Y. Wan. Y. Luo. Q. Cao. Y. Chen. and D. Li. "An innovative utilization approach for by-products of biogas desulfurization: Co-hydrothermal treatment of sulfur with biogas slurry to prepare sulfur-enriched liquid fertilizer". *Process Biochemistry*. vol 147, pp.522-529, 2024.
[21] A. Khaki. M. J. Malakouti. H. Fathollahi. "Effect of sulfur-bentonite fertilizers on Fe and Zn solubility and maize growth in calcareous soils". *Iranian Journal of Soil Research*. vol. 27(4). pp. 231–242, 2013.
[22] R. Mahdavi. A. H. Khoshgoftarmanesh. M. Afyuni. "Effect of sulfur-bentonite fertilizer on sulfur availability and wheat yield in calcareous soils". Journal of Plant Nutrition. vol. 39(12). pp. 1764–1774, 2016.
[23] R. Ghasemi. M. J. Malakouti. A. Bybordi. "Evaluation of refinery sulfur and sulfur–bentonite fertilizer on sulfur availability and crop yield in calcareous soils". *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. vol. 19*(2). pp. 456–468, 2019.
[24] H. H. Janzen. J. R. Bettany. "Release of available sulfur from fertilizers". *Can. J. Soil Sci*, 1986.
[25] M. H. Hilal. M. M. Helal. "Role of Sulfur in Agriculture Phosphate-Sulfur-Bentonite Mixture for Optimum Utilization of Rock Phosphate as A Fertilizer". *Egyptian Journal of Soil Science*. vol. 53(3). pp. 299-312, 2013
[26] A. Muscolo. C. Mallamaci. G. Settineri. G. Calamarà. "Increasing soil and crop productivity by using agricultural wastes pelletized with elemental sulfur and bentonite". *Agronomy Journal*. vol. 109(5). pp. 1900-1910, 2017.