

فرمولاسیون و دانه‌بندی کیک گوگردی فرآیند سولفیران به روش مرطوب جهت کاربرد در کشاورزی

پژوهش‌نفت

سال بیست و یکم

شماره ۶۶

صفحه ۶۷-۷۵، ۱۳۹۰

احمد روزبهانی دهنوئی*^۱، فروزان وکیلی^۱، خالد فرصت^۲ و ابراهیم علائی^۱

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی

۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز،

Ruzbehania@ripi.ir

چکیده

در فرآیند سولفیران گاز سمی، خورنده و خطرناک سولفید هیدروژن به صورت مستقیم به ذرات بسیار ریز گوگرد عنصری تبدیل می‌شود که معمولاً از محیط آبی به صورت کیک گوگردی مرطوب جدا می‌گردد. بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که از کیک گوگردی می‌توان به‌طور مستقیم در بخش کشاورزی استفاده کرد، ولی شواهد موجود حاکی از آن است که مقاومت مکانیکی چنین کیکی پس از خشک شدن پایین بوده و به سادگی با اعمال اندکی نیرو به صورت پودر در می‌آید. بنابراین به دلیل ملاحظات ایمنی، بهداشت و محیط زیستی، جابجایی و استفاده از چنین کیک گوگردی توصیه نمی‌شود. بررسی‌های آزمایشگاهی اولیه نشان می‌دهد که با استفاده از مواد افزودنی مناسب و ارزان قیمت، می‌توان کیک گوگردی مرطوب ایجاد شده در ادامه فرآیند سولفیران را به محصولی دانه‌بندی شده با مقاومت مکانیکی مناسب تبدیل کرد. با توجه به این نکته که کیک گوگردی حاصل از فرآیند سولفیران، مقداری آب به همراه دارد، استفاده از روش دانه‌بندی مرطوب جهت تولید صنعتی از نظر فنی امکان‌پذیرتر است. از سوی دیگر شواهد آزمایشگاهی به‌دست آمده حاکی از آن است که خاصیت فروپاشی و

پخش محصول دانه‌بندی شده در حضور رطوبت، می‌تواند تحت تاثیر مواد افزودنی به‌کار برده شده قرار گیرد. از این رو با استفاده از مقادیر مناسبی از مواد افزودنی چون بنتونیت، سدیم لیگنوسولفونات، هیومیک اسید و مواد پرکننده دیگر، فرمولاسیون‌های مختلفی از کیک گوگردی تهیه شده و پس از دانه‌بندی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان دهنده این است که فرمولاسیون نهایی مشتمل بر ۵٪ بنتونیت، ۲٪ لیگنوسولفونات و ۱۰٪ هیومیک اسید، دارای مقاومت مکانیکی مناسبی است و در محیط آبی به سرعت پخش شده و ذرات ریز گوگرد تولید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: سولفیران، گوگرد، کیک گوگردی، دانه‌بندی مرطوب

مقدمه

گاز استحصال شده از اغلب منابع گازی علاوه بر ترکیبات هیدروکربنی و بخار آب، حاوی ترکیبات دیگری چون CO_2 و H_2S نیز می‌باشد. اصولاً حضور چنین ترکیبات مزاحمی در مخلوط گاز طبیعی، نه تنها موجب کاهش ارزش حرارتی محصول می‌گردد، بلکه وجود ترکیب

از مخلوط گاز طبیعی معرفی شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از بسترهای جاذب مایع و جامد، فرآیند اکسایش-کاهش^۱ و روش کلاوس^۲ اشاره کرد. انتخاب و استفاده از هر یک از روش‌های جداسازی، به عوامل اقتصادی و همچنین محتوای گوگرد در گاز بستگی دارد. اصولاً در مواردی که غلظت H_2S در گاز معادل ۰/۲ تا ۲۰ تن گوگرد در روز باشد، استفاده از روش اکسایش-کاهش توجیه اقتصادی دارد [۱ و ۲]. امروزه با تشدید مقررات زیست محیطی و لزوم کاهش انتشار ترکیبات گوگردی به جو، استفاده از روش اکسایش-کاهش به‌عنوان روشی مکمل در کنار سایر فرآیندهای بازیافت گوگرد با استقبال خوبی روبرو شده است، به نحوی که طبق گزارشات موجود، بالغ بر ۲۰۰ واحد صنعتی در دنیا با این روش مشغول به حذف گاز سولفید هیدروژن می‌باشند [۱].

گوگردی سولفید هیدروژن می‌تواند اثرات مخرب و جبران‌ناپذیری بر محیط زیست و سلامتی موجودات زنده داشته باشد.

سولفید هیدروژن ماده‌ای بسیار سمی، خورنده و بدبوست که در اثر سوختن، به گاز گلخانه‌ای SO_2 که یکی از عوامل اصلی ایجاد باران اسیدی است، تبدیل می‌شود. علاوه بر این، وجود بیش از حد سولفید هیدروژن در گاز طبیعی، باعث خوردگی تجهیزات و خطوط لوله انتقال و همچنین لوازم مصرف کنندگان گاز طبیعی در صنایع و منازل می‌شود. به دلیل وجود مشکلات فوق‌الذکر و دیگر اثرات خطرناک و کشنده گاز سولفید هیدروژن که در جدول ۱ خلاصه شده است، جداسازی این گاز از مخلوط‌های گازی و تبدیل آن به ماده‌ای کم خطر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

تا کنون روش‌های مختلفی برای جداسازی گاز H_2S

جدول ۱- اثرات فیزیولوژیکی غلظت‌های مختلف H_2S

اثرات فیزیولوژیکی	میزان H_2S		
	mg / m ³	ppmv	درصد حجمی
بوی نامطبوع عموماً در غلظت ۰/۱۳ ppm قابل استشمام بوده و در غلظت ۴/۶ ppm به‌طور کامل قابل تشخیص است. به محض افزایش غلظت، حس بویایی از کار افتاده و تشخیص گاز از طریق استشمام غیر ممکن می‌شود.	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۰۰۰۱۳
در استانداردهای سازمان بهداشت و ایمنی شغلی (OSHA) سقف غلظت مجاز شناخته شده است.	۲۸/۸۳	۲۰	۰/۰۰۲
حد ماکزیمم قابل قبول بالاتر از سقف غلظت مجاز استانداردهای سازمان بهداشت و ایمنی شغلی، یک بار برای مدت ۱۰ دقیقه به ازای هر ۸ ساعت نوبت کاری، در صورتی که در این مدت گاز دیگری منتشر نشود.	۷۲/۰۷	۵۰	۰/۰۰۵
سرفه، سوزش چشم‌ها، از دست دادن حس بویایی پس از ۳ تا ۱۵ دقیقه، اختلال تنفسی، درد چشم و خواب آلودگی پس از ۱۵ تا ۳۰ دقیقه و در پی آن سوزش گلو بعد از یک ساعت. طولانی شدن زمان تماس با گاز به تدریج منجر به افزایش وخامت نارسایی‌های فوق و مشکلات حاد دیگر در بدن می‌شود.	۱۴/۱۴۴	۱۰۰	۰/۰۱
حس بویایی به‌طور کامل از کار افتاده، گلو و چشم‌ها به‌شدت می‌سوزند.	۲۸۸/۰۶	۲۰۰	۰/۰۲
سرگیجه و از دست دادن حس تعادل و قدرت تشخیص، مشکل تنفس در عرض چند دقیقه نمایان می‌شود. افراد مصدوم به‌شدت به تنفس مصنوعی نیازمندند.	۷۲۰/۴۹	۵۰۰	۰/۰۵
بی‌هوشی سریع، تنفس قطع شده و در صورت عدم رسیدگی سریع، مرگ حتمی به‌وقوع می‌پیوندد.	۱۰۰۸/۵۵	۷۰۰	۰/۰۷
بیهوشی سریع در صورت عدم نجات سریع بیمار، صدمه دائمی مغز و سپس مرگ حتمی روی می‌دهد.	۱۴۴۰/۹۸	۱۰۰۰	۰/۱

1. Redox
2. Claus

ایجاد کیک گوگردی در فرآیند سولفیران

در فرآیند اکسایش-کاهش، گاز H_2S به‌طور مستقیم در محیط آبی^۱ توسط کاتالیزور به گوگرد عنصری تبدیل می‌شود که برای این منظور کاتالیزورهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیند سولفیران از کیلات‌های آهن^۲ برای جذب شیمیایی گاز سولفید هیدروژن استفاده می‌شود که در مراحل بعد، کیلات استفاده شده به‌صورت شیمیایی بازیافت می‌گردد. از سوی دیگر گوگرد به‌صورت ذرات بسیار ریز در مخلوط آبی ایجاد و پس از فیلتر کردن به‌صورت کیک مرطوب از فرآیند جدا می‌شود. نمودار عملیاتی شکل ۱ مراحل فرآیند سولفیران را به‌طور مختصر نشان می‌دهد [۳ و ۴].

معادلات واکنش‌های شیمیایی در مراحل مختلف فرآیند (معادلات ۱-۵) نشان می‌دهد که ابتدا مولکول‌های گاز H_2S در اثر عبور از محیط آبی توسط مولکول‌های آب احاطه و به‌صورت محلول در آب در می‌آیند (معادله ۱).

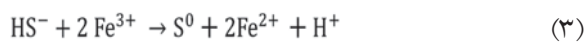


سپس مولکول‌های محلول در آب هیدروژن سولفید، همان‌گونه که در معادله ۲ نشان داده شده است، یونیزه شده و آنیون HS^- ایجاد می‌کند.

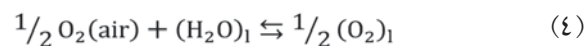


در مرحله بعد، آنیون‌های سولفید هیدروژن توسط کاتیون‌های

آهن (III) به گوگرد عنصری اکسید می‌شوند (معادله ۳).

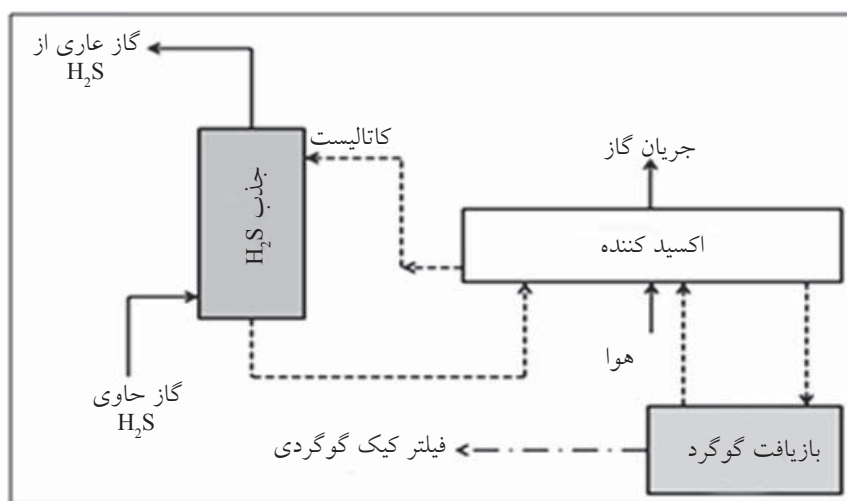


مطابق معادله ۳، کاتیون‌های آهن (III) در این مرحله به Fe^{2+} احیا می‌شوند، که لازم است جهت استفاده مجدد توسط هوا اکسید و به مرحله جذب بازگردانده شوند که این واکنش‌ها در معادلات ۴ و ۵ معرفی شده است [۳].



استفاده از کیک گوگردی

نتایج تحقیقات به‌دست آمده طی چند دهه، حاکی از آن است که خواص فیزیکی - شیمیایی خاک‌های آهکی و قلیایی را می‌توان با به‌کار بردن گوگرد عنصری بهبود بخشید. در واقع گوگرد در محیط گرم و مرطوب و در حضور میکروارگانیسم‌های خاک به اسیدسولفوریک تبدیل می‌شود که پس از واکنش با کربنات کلسیم خاک، باعث آزاد شدن کلسیم می‌گردد. کلسیم آزاد شده جایگزین سدیم کلونید خاک شده و در نتیجه زمینه نفوذ آب به داخل بافت خاک مهیا می‌گردد [۵].



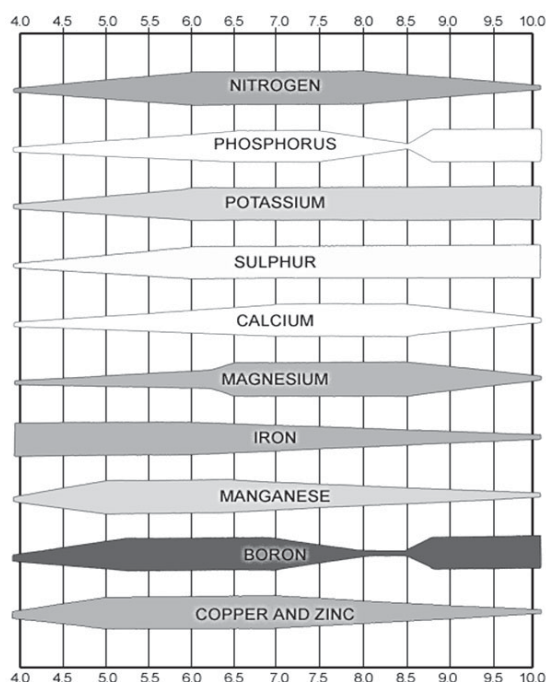
شکل ۱- نمودار عملیاتی مراحل فرآیند سولفیران

1. Aqueous

2. Iron chelates

خاص توسط گیاه می باشد. اثرات مثبت گوگرد بر کاهش واکنش‌های خاک‌های آهکی، افزایش حلالیت عناصر کم مصرف و همچنین پر مصرف و به ویژه نقش آن در اصلاح خاک‌های شور و قلیایی، باعث شده که توجه ویژه‌ای به این عنصر در بخش کشاورزی گردد. در این خصوص مشخص شده که اندازه ذرات گوگرد نقش بسزایی در سرعت اکسایش و در نتیجه عملکرد آن در خاک دارد (جدول ۲). هر چه اندازه ذرات گوگرد کوچک‌تر باشد، سطح تماس بیشتری برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها به وجود می‌آید و در نتیجه آن، فرآیند اکسایش میکروبی تسریع می‌گردد [۶ و ۷].

مطالعه و بررسی شیمی خاک نشان می‌دهد که عامل pH مهم‌ترین خاصیت خاک است که در حقیقت فعالیت و کارایی عناصر مغذی گیاهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، pH خاک نه تنها حلالیت و انتقال یون‌های عناصر مغذی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی را نیز کنترل می‌کند [۵]. بر همین اساس، همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، pH بالای خاک‌های قلیایی باعث می‌شود حلالیت برخی عناصر مغذی چون فسفر، آهن، منگنز و روی به میزان محسوسی کاهش یابد. در این شکل، افزایش ضخامت نمودار جذب هر یک از عناصر، نشان دهنده افزایش در جذب آن عنصر در یک pH



شکل ۲- تاثیر pH بر قابلیت جذب عناصر غذایی [۵]

جدول ۲- تاثیر اندازه ذرات گوگرد در سرعت اکسایش میکروبی [۷]

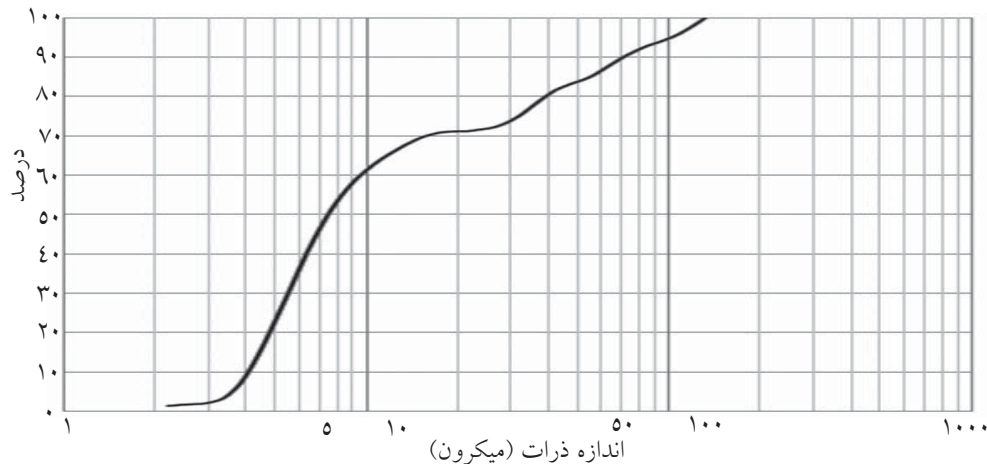
درصد گوگرد اکسید شده		اندازه ذرات (mm)
پس از دو هفته	پس از چهار هفته	
۱	۲	۴-۲
۲	۵	۲-۰/۸۴
۵	۱۴	۰/۸۴۱-۰/۴۲۰
۱۵	۳۶	۰/۴۲-۰/۱۸
۳۶	۶۸	۰/۱۷۷-۰/۱۲۵
۶۱	۸۱	۰/۱۲۵-۰/۰۸۸
۸۰	۸۲	۰/۰۶۳

دانه‌بندی گوگرد سولفیران

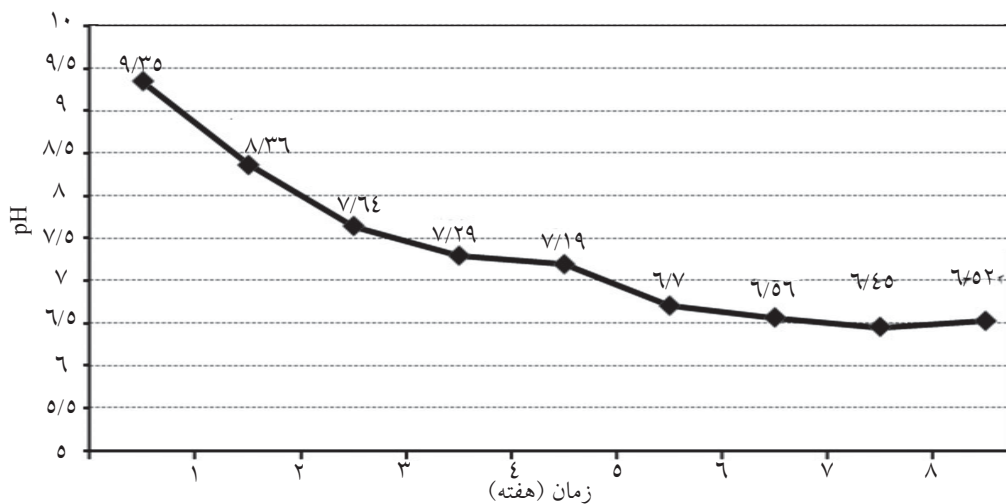
اگر چه شواهد موجود نشان‌دهنده تأثیر بسزای گوگرد فرآیند سولفیران در کاهش pH خاک است، ولی حمل و نقل و استفاده از چنین محصولی با اندازه ذرات بسیار ریز مشکل بوده و علاوه بر آن خطر آتش سوزی را نیز به دنبال خواهد داشت [۸]. بنابراین در نگاه اول چنین به نظر می‌رسد که از گوگرد فوق‌نتوان به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و یا منبع کودی استفاده کرد. بررسی‌های انجام شده در این خصوص، حاکی از آن است که با استفاده از تکنیک‌های دانه‌بندی، می‌توان بر این مشکلات غلبه کرد. از سال ۱۹۵۰ فرآیندهایی برای دانه‌بندی گوگرد معرفی شده‌اند که در آن زمان، اساساً در پالایشگاه‌ها و واحدهای با مقیاس کوچک به‌کار برده می‌شدند.

نمودار تجمعی مربوط به اندازه ذرات در شکل ۳ نشان می‌دهد که اندازه ذرات حداقل ۸۰٪ گوگرد ایجاد شده در فرآیند سولفیران، کمتر از ۵۰ میکرون است. بنابراین، انتظار می‌رود این محصول نسبت به گوگرد کریستالی (گوگرد آلفا) استحصال شده از روش کلاوس، عملکرد بسیار بهتری در کاهش pH از خود نشان دهد [۶].

در یک آزمایش میدانی که در سال ۱۹۹۷ در کالیفرنیا توسط شرکت شیمیایی هوندو صورت گرفته، مشخص گردید که چنین گوگردی در مدت زمان ۴۵ روز به‌طور کامل به اسید سولفوریک تبدیل شده و توانسته به‌صورت موثری pH خاک را از ۹/۳۵ به ۶/۵۲ کاهش دهد (شکل ۴). از سوی دیگر ثابت شده که برای تبدیل کامل همین مقدار از گوگرد بازیافتی فرآیند کلاوس به اسید سولفوریک، ۱ تا ۳ سال زمان مورد نیاز است [۷].



شکل ۳- نمودار توزیع اندازه ذرات گوگرد سولفیران



شکل ۴- نمودار تأثیر استفاده از گوگرد استحصالی از فرآیند اکسایش در کاهش pH خاک

سایر مواد شیمیایی به کار برده شده در فرمولاسیون‌ها، نظیر خاک بنتونیت، هیومیک اسید و اوره از منبع داخلی با گرید تجارتي تهیه گردید [۱۳-۱۴]. همچنین برای اندازه‌گیری و مقایسه مقاومت مکانیکی فرمولاسیون‌های دانه‌بندی شده، ابتدا مخلوط مورد نظر توسط دستگاه قرص‌زنی IR به شکل قرص‌هایی با قطر ۲۰ mm و ضخامت ۳ mm درآمده و سپس نیروی لازم برای خرد شدن آنها اندازه‌گیری شد.

روش تهیه فرمولاسیون به شکل قرص

ابتدا نمونه‌هایی از بخش‌های مختلف کیک گوگردی جدا شده و پس از مخلوط کردن آسیاب می‌شود. سپس مواد افزودنی مورد نظر مطابق جدول ۴ به آن اضافه شده و پس از تنظیم رطوبت با آب، مطابق روش شرح داده شده در بالا به صورت قرص درمی‌آید (شکل ۵). قرص‌های حاصل در آن خلأ و دمای 70°C به مدت ۲ ساعت خشک می‌شوند. شایان ذکر است که در آزمایش‌های مشابه، کیک گوگردی بدون هیچ‌گونه افزودنی به‌عنوان شاهد اول و گوگرد پالایشگاه تهران به‌عنوان شاهد دوم انتخاب گردیده و به صورت قرص درآمدند.

خاصیت پخش در آب و مقاومت مکانیکی قرص‌ها

از هر فرمولاسیون، سه قرص برای آزمون حلالیت و سه قرص برای تعیین مقاومت مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور، در سه ظرف شیشه‌ای مناسب، یک قرص را قرار داده و زمان پخش کامل آنها در آب اندازه‌گیری و میانگین گرفته می‌شود. همچنین در آزمون دیگری، نیروی لازم برای خرد شدن چنین قرص‌هایی مشخص و معدل‌گیری می‌شود که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

نتایج و بحث

از تکنیک X-ray برای تعیین فرم آلوتروپی و نیز ساختار کیک گوگردی استفاده گردید. بر این اساس مشخص شد که نمونه کیک گوگردی بی‌شکل و حاوی مقادیر جزئی از عناصری مانند آهن، کلسیم، پتاسیم و سلیسیوم می‌باشد که برای مصرف در زمینه کشاورزی مشکل‌ساز نبوده و نیاز به مراحل تصفیه و پاکسازی بعدی ندارد (جدول ۳).

با افزایش تولید گوگرد در سال‌های ۱۹۶۰، روش‌های مختلف دانه‌بندی نیز در اروپا توسعه داده شدند. امروزه در واحدهای صنعتی تولید گوگرد، فرآیندهای مختلفی نظیر گرانول‌سازی^۱، پاستیل کردن^۲ و تهیه پرل^۳ برای شکل‌دهی به گوگرد استفاده می‌شود [۸ و ۹]. شایان ذکر است که روش‌های فوق برای دانه‌بندی گوگرد به شکل مذاب کاربرد دارد. از آنجا که گوگرد بازیافتی فرآیند سولفیران به شکل کیک مرطوب است، روش‌های فوق‌الذکر کمکی در دانه‌بندی آن نخواهد کرد. نتایج تحقیقات گزارش شده در منابع مختلف نشان می‌دهد که اکثر پودرهای شیمیایی را می‌توان با استفاده از روش دانه‌بندی مرطوب به اشکال مختلف درآورد [۱۰-۱۲]. در این میان فرم‌های کروی و میله‌ای از اهمیت بالایی در صنایع شیمیایی برخوردارند. تجهیزات مورد نیاز برای ساخت این نوع مواد دانه‌بندی شده را می‌توان با صرف هزینه‌ای کمتر نسبت به سایر روش‌ها تهیه نمود. از سوی دیگر، چنین تجهیزاتی به راحتی در فضاهای کوچک جاسازی شده و به تجهیزات جانبی زیادی نیاز ندارند. بر این اساس، آزمایش‌هایی برای دانه‌بندی کیک گوگردی به روش مرطوب در دستور کار قرار گرفت که در بخش تجربی به آنها اشاره می‌گردد.

بخش تجربی

در این بخش، جهت ساخت فرمولاسیون‌های مختلف، از کیک گوگردی استحصال شده از پایلوت سولفیران به‌عنوان منبع گوگردی استفاده شده است. در این خصوص با استفاده از تکنیک X-ray، نوع عناصر و ترکیب درصد آنها در نمونه شناسایی و اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- جزء وزنی اجزای موجود در کیک گوگردی

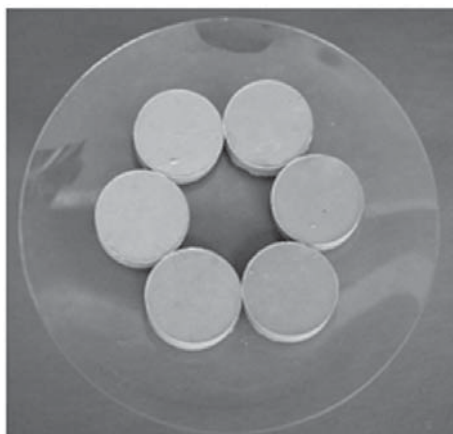
۶/۲	خاکستر
۱/۷	پتاسیم
۰/۶	سدیم
۰/۰۰۳	کلسیم
۰/۲۲	آهن
۰/۳	سلیسیوم
۹۰/۹۷۷	گوگرد

1. Granulation
2. Pastillation
3. Prilling

جدول ۴- فرمولاسیون‌های انجام شده با گوگرد سولفیران و آزمون‌های مربوطه

مقاومت مکانیکی (کیلوگرم)	مقدار پخش	زمان پخش در آب	اجزای فرمولاسیون (گرم (درصد))					آزمایش	
			آب	اوره	هیومیک اسید	لیگنوسولفونات	خاک بتونیت		گوگرد
<1000	ناچیز	۲ ماه	۰/۱۱	-	-	-	-	۳(۱۰۰) ^۲	۱
<1000	پخش نشد	۲ ماه	۰/۱۱	-	-	-	-	۳(۱۰۰) ^۲	۲
<800	۵۰ درصد	۱ هفته	۰/۱۱	-	-	(۲) ۰/۰۶	(۵) ۰/۱۵	(۹۳) ۲/۷۹	۳
<1000	۵۰ درصد	۴ روز	۰/۲۱	-	-	(۲) ۰/۰۶	(۷) ۰/۲۱	(۹۱) ۲/۷۳	۴
<1000	۵۰ درصد	۲ روز	۰/۲۱	-	-	(۲) ۰/۰۶	(۱۰) ۳	(۸۸) ۲/۶۵	۵
<1000	۵۰ درصد	۴ روز	۰/۲۱	-	-	(۴) ۰/۱۲	(۷) ۰/۲۱	(۸۹) ۲/۶۸	۶
<800	۵۰ درصد	۲۴ ساعت	۰/۲۱	(۲/۳) ۰/۰۷	-	(۲) ۰/۰۶	(۵) ۰/۱۵	(۹۰/۷) ۲/۷۲	۷
<800	۵۰ درصد	۲۴ ساعت	۰/۲۱	-	(۳/۴) ۰/۱۳	(۲) ۰/۰۶	(۵) ۰/۱۵	(۸۸/۷) ۲/۶۶	۸
<1000	۱۰۰ درصد	۲۴ ساعت	۰/۲۱	-	(۸/۷) ۰/۲۶	(۲) ۰/۰۶	(۵) ۰/۱۵	(۸۴/۳) ۲/۵۳	۹
<1000	۱۰۰ درصد	۸ ساعت	۰/۲۱	-	(۱۰) ۰/۳	(۲) ۰/۰۶	(۵) ۰/۱۵	(۸۳) ۲/۴۹	۱۰

- ۱- نیروی لازم برای خرد کردن قرص‌های به قطر ۲۰ میلیمتر پس از خشک کردن در آن خلأ
- ۲- شاهد اول (از گوگرد سولفیران بدون هیچ‌گونه افزودنی جهت تهیه قرص استفاده شده است)
- ۳- شاهد دوم (از گوگرد پالایشگاه تهران بدون هیچ‌گونه افزودنی جهت تهیه قرص استفاده شده است)



شکل ۵- فرمولاسیون گوگردی به شکل قرص

گوگردی بدون استفاده از سایر مواد کمکی، پخش شدن آنها در آب به شدت به تأخیر می‌افتد. از سوی دیگر، همان‌گونه که نتایج آزمایش‌های ۳ تا ۶ نشان می‌دهد، استفاده از درصدهای مختلف خاک بتونیت و لیگنوسولفونات می‌تواند حداکثر باعث پخش ۵۰٪ فرمولاسیون‌ها در مدت زمان دو روز گردد. تلاش‌های بیشتر در این خصوص، حاکی از آن است که با به‌کار بردن ترکیباتی چون اوره در فرمولاسیون، می‌توان خاصیت پخش شونده‌گی را کیک گوگردی بهبود بخشید.

نتایج مربوط به تست‌های تعیین مقاومت مکانیکی، زمان فروپاشی و پخش در آب مربوط به فرمولاسیون‌های مختلف گوگرد سولفیران در جدول ۴ آمده است. تست‌های اولیه انجام شده، نشان می‌دهد که نوع و نسبت مواد افزودنی به‌کار برده شده، تأثیر بسزایی در زمان و میزان پخش شدن قرص‌های فرموله شده در آب و همچنین مقاومت مکانیکی آنها دارد. مطابق جدول ۴، نمونه‌های شاهد ۱ و ۲ علی‌رغم مقاومت مکانیکی مناسب، حتی پس از گذشت ۲ ماه، در آب پخش نمی‌شوند. در نتیجه، در صورت دانه‌بندی کیک

که اگر در ادامه فرآیند سولفیران، مواد افزودنی مناسب به کیک گوگردی مرطوب اضافه شوند، محصولی دانه‌بندی شده با مقاومت مکانیکی مناسب به دست خواهد آمد.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نیز مؤید این موضوع بوده و نشان می‌دهد که به کارگیری افزودنی‌های مناسب نظیر ۵٪ بتونیت، ۲٪ سدیم لیگنو سولفونات، ۱۰٪ هیومیک اسید به تهیه فرمولاسیون‌های دانه‌بندی شده‌ای از گوگرد سولفیران با پخش شونده‌گی کامل در مدت زمان ۸ ساعت در مقایسه با دو ماه در مورد نمونه‌های شاهد و نیز مقاومت مکانیکی مناسب در برابر شکستن، منجر می‌گردد. بنابراین، نه تنها استفاده انبوه آن از نظر ایمنی، بهداشت و محیط زیست اشکالی ندارد، بلکه به سبب امکان تولید آن با استفاده از تجهیزات ساده و استفاده از روش دانه‌بندی مرطوب جهت تولید صنعتی، می‌تواند راهبردی جهت ارائه محصولی با فرمولاسیون جدید به بازار باشد، به دلیل وجود برخی از عناصر اصلی و ریز مغذی در ترکیب کیک گوگردی و نیز ساختار خاص گوگرد در آن که نسبت به سایر شکل‌ها با سهولت بیشتری قابل تجزیه باکتریایی می‌باشد، می‌توان از این گوگرد به منظور اصلاح pH خاک و نیز به عنوان کود شیمیایی استفاده نمود.

از آنجا که اوره ماده‌ای بسیار محلول است، وجود آن در فرمولاسیون کمک شایانی به تخریب ساختار قرص در محیط آب می‌نماید. در ادامه آزمایش‌ها مشخص می‌شود که با افزودن درصدهای مختلف هیومیک اسید به فرمولاسیون، مقاومت مکانیکی فرمولاسیون تا حد قابل قبولی افزایش یافته و زمان پخش شدن کامل قرص نیز به ۸ ساعت کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

آنالیزهای انجام شده نشان می‌دهد که فیلتر کیک گوگردی محصول فرآیند سولفیران، عاری از عناصر سمی و مزاحم بوده و کیک گوگردی حاصل می‌تواند به طور مستقیم در بخش کشاورزی به منظور اصلاح خاک، مورد استفاده قرار گیرد. مشاهدات نشان می‌دهد که مقاومت مکانیکی این کیک پایین است و پس از خشک شدن به سادگی به صورت پودر با ذرات بسیار ریز در می‌آید که با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی، بهداشت و محیط زیست، حمل و نقل و استفاده از این محصول با این شکل توصیه نمی‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از تکنیک‌های دانه‌بندی، می‌توان بر این مشکلات غلبه نمود. بدین ترتیب

منابع

- [1] Graubard D., Rouleau W., Bogner J., *Cost-Effective Technologies for Removing H2S from Landfill Gas*, http://www.merichem.com/resources/technical_papers/landfill_gas_technologies/index.php, 2011.
- [2] Nagl G., "Liquid redox enhances Claus Process", *Sulphur*, Vol. pp. 274, 2001.
- [3] Watson J., *Small capacity sulfur recovery units*, *AIChE Midwest Regional Conference*, Chicago, Illinois, Sep.22. 2008. www.gtp-merichem.com.
- [4] Nagl G., *The flexibility of liquid redox processing in refinery sulfur management*, http://www.merichem.com/resources/technical_papers/liquid_redox_flexibility/index.php, 2011.
- [5] Graeme J.B., Rod B.L., Dana M., Anderson G.C., "Modeling of sulfur oxidation from elemental sulfur, Plant and Soil", No.155/156, pp.379-382, October, 1993.
- [6] Neeley F., *Sulfur: At the crossroads of energy, the environment, and agriculture*, *Fertilizer International*, NO.388, pp. 68-72 May/June 2002.
- [7] Connock L., "Sulfur as a fertilizer and fungicide", *Sulphur*, Vol.296, pp. Jan/Feb 2005.
- [8] Roland E.J., "Powder compacting apparatus for continuous pressing of pharmaceutical powder", U.S.Patent: 0084560, 2005.

- [9] Haldar R., Dipan B., *Process and apparatus for forming agglomerates of a powder composition of an active and binder*, U.S.Patent: 7534381, 2009.
- [10] Shroff D., *Improved sulfur formulation suitable for organic agriculture*, WO/2009/125435, 2009.
- [11] Caldwell B.L., Fletcher R B., *Process for pelletizing a sulfur-bentonite clay mixture and the product formed thereby*, U.S.Patent: 4133669, 1997.
- [12] Phinney R., *Wet granulation method generating sulfur granules*, U.S. patent: 6331193 B1(2001).
- [13] Knowles D.A., *Chemistry and technology of agrochemical formulations*, pp. 165-160, Kluwet Academic Publisher, 1998.
- [14] Mollet H., *Formulation technology: emulsion, suspension, solid forms*, pp.149-153, Wiley-VCH, 2001.