چهارمین کنگره
توسعه علمی و فناوری
دانشجویان زیست
شناسی و شیمی
4th Congress of
Scientific and Technological
Development of Biology and
Chemistry Students
www.bcs.cdsts.ir

بررسی اثرات عنصر گوگرد در فراورده های نفتی و راهکار های برای کاهش آن

سجاد افسا
کارشناسی شیمی کاربردی دانشگاه ولی عصر(ع) رفسنجان
sajjad.afsa84@gmail.com

خلاصه:
وجود ترکیبات گوگردی در فرآورده‌های نفتی یکی از چالش‌های مهم صنعت پالایش نفت به شمار می‌رود. گوگرد و مشتقات آن موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی از جمله انتشار گازهای آلاینده نظیر SO_2، باران‌های اسیدی، و آسیب به سلامت انسان می‌شوند. علاوه بر این، ترکیبات گوگردی سبب خوردگی تجهیزات پالایشگاهی، کاهش کیفیت سوخت و افت عملکرد کاتالیست‌ها در واحدهای پایین‌دستی می‌گردند. از این‌رو، کاهش مقدار گوگرد در فرآورده‌های نفتی به‌عنوان یک الزام زیست‌محیطی و صنعتی مورد توجه گسترده قرار گرفته است هدف این تحقیق بررسی اثرات مخرب گوگرد در فرآورده‌های نفتی و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش آن با تمرکز بر بهبود کیفیت سوخت و کاهش آلایندگی است. در این پژوهش، با استفاده از روش مطالعه کتابخانه‌ای و تحلیل مقالات و منابع معتبر علمی، مهم‌ترین ترکیبات گوگردی موجود در نفت خام و فرآورده‌های آن شناسایی شده و روش‌های متداول گوگردزدایی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند نتایج نشان می‌دهد که گوگردزدایی هیدروژنی (HDS) به‌عنوان رایج‌ترین و کارآمدترین روش صنعتی، نقش کلیدی در کاهش گوگرد دارد، هرچند با محدودیت‌هایی نظیر مصرف بالای هیدروژن و هزینه‌های عملیاتی مواجه است. همچنین روش‌های نوین مانند گوگردزدایی اکسایشی، جذب سطحی و فرآیندهای زیستی به‌عنوان گزینه‌های مکمل یا جایگزین، پتانسیل مناسبی برای کاهش ترکیبات گوگردی مقاوم دارند. دستاورد اصلی این تحقیق تأکید بر لزوم توسعه و بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی گوگردزدایی به‌منظور دستیابی به سوخت‌های پاک‌تر و سازگار با استانداردهای زیست‌محیطی روز دنیا است.

کلمات کلیدی: احتراق،فراش،زیست محیطی، کاتالیست ، هیدروگوگردزدایی ، اقتصاد

مقدمه

گوگرد به‌عنوان یکی از عناصر هتروواتمی اصلی در نفت خام، به‌صورت ترکیبات متنوع آلی و معدنی در ساختار هیدروکربن‌ها حضور دارد. وجود این ترکیبات در فرآورده‌های نفتی، ضمن تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوخت، موجب بروز چالش‌های جدی در فرآیندهای پالایش، انتقال و مصرف می‌گردد. در طی احتراق سوخت‌های حاوی گوگرد، اکسیدهای گوگرد (SO_2) و (SO_3) تولید می‌شوند که از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب شده و نقش بسزایی در تشکیل باران‌های اسیدی، کاهش کیفیت هوا و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی دارند. ازاین‌رو، کنترل و کاهش میزان گوگرد در فرآورده‌های نفتی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در سیاست‌های زیست‌محیطی و استانداردهای بین‌المللی سوخت مطرح است.

افزون بر آثار زیست‌محیطی، وجود گوگرد در فرآورده‌های نفتی می‌تواند موجب خوردگی تجهیزات پالایشگاهی، کاهش طول عمر کاتالیست‌ها و افت بازدهی فرآیندهای تصفیه شود. بنابراین، شناسایی دقیق ترکیبات گوگردی، درک رفتار آن‌ها در مراحل مختلف پالایش و به‌کارگیری فناوری‌های نوین گوگردزدایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، ضمن بررسی ماهیت و اثرات حضور گوگرد در فرآورده‌های نفتی، به تحلیل پیامدهای زیست‌محیطی و صنعتی آن پرداخته و راهکارهای کاهش و حذف گوگرد با رویکردهای نوین فرآیندی و کاتالیستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد

منابع و انواع ترکیبات گوگردی در نفت

گوگرد یکی از عناصر همراه نفت خام است که مقدار آن بسته به منبع و نوع مخزن نفتی بین چند صدم درصد تا بیش از ۵ درصد وزنی متغیر است. منشأ اصلی گوگرد در نفت به مواد آلی گوگرددار موجود در رسوبات اولیه، فرآیندهای زیست‌ژئوشیمیایی و فعالیت‌های باکتریایی در مراحل تشکیل نفت بازمی‌گردد. در محیط‌های احیایی (فاقد اکسیژن)، گوگرد معدنی نظیر سولفات‌ها و سولفیدها توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات به ترکیبات گوگرددار آلی تبدیل می‌شوند که در نهایت در ساختار مولکولی نفت خام تثبیت می‌گردند.

ترکیبات گوگردی موجود در نفت را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد

ترکیبات آلی گوگرددار

این گروه بخش عمده گوگرد نفت خام را تشکیل می‌دهد و شامل انواع مختلفی از ترکیبات آلی گوگردی است، از جمله سولفیدها (R–S–R') و دی‌سولفیدها :(R–S–S–R') ترکیباتی با پیوند ساده گوگردی که در برش‌های سبک‌تر نفت حضور دارند

تیوفن‌ها و مشتقات آن (تیوفن، بنزوتیوفن و دی‌بنزوتیوفن): ترکیبات حلقوی پایدار که در برش‌های سنگین‌تر مانند نفت‌کوره و گازوئیل یافت می‌شوند. این ترکیبات از پایدارترین اشکال گوگرد در نفت محسوب شده و حذف آن‌ها در فرآیندهای گوگردزدایی دشوار است.مرکاپتان‌ها :(R–SH) ترکیبات با بوی تند و نافذ که عمدتاً در برش‌های سبک‌تر مانند گاز مایع (LPG)و بنزین خام یافت می‌شوند و در مقادیر بالا موجب خوردگی و کاهش کیفیت سوخت می‌گردند.

ترکیبات معدنی گوگرددار

این ترکیبات عمدتاً شامل سولفیدهای فلزی مانندFeS ، PbSو ZnS هستند که در رسوبات همراه نفت وجود دارند و در طی فرآیندهای پالایش حذف می‌شوند. اگرچه سهم آن‌ها در کل گوگرد نفت کم است، اما می‌توانند در خوردگی تجهیزات و آلودگی فرآورده‌ها نقش داشته باشند.

به‌طور کلی، میزان و نوع ترکیبات گوگردی موجود در نفت خام تابع عواملی چون منشأ زمین‌شناسی، شرایط دما و فشار حین تشکیل، و درجه گوگردزدایی طبیعی مخزن است. شناخت دقیق این ترکیبات برای انتخاب روش‌های مناسب پالایش و طراحی فرآیندهای کارآمد گوگردزدایی (مانند هیدروگوگردزدایی یا اکسیداسیون انتخابی) اهمیت ویژه‌ای دارد.

اثرات این ترکیب در بخش های مختلف

اثرات زیست‌محیطی ترکیبات گوگردی در فرآورده‌های نفتی

ترکیبات گوگردی موجود در فرآورده‌های نفتی از مهم‌ترین منابع آلاینده‌های هوا در فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی به‌شمار می‌روند. در هنگام احتراق، گوگرد موجود در سوخت به اکسیدهای گوگرد به‌ویژه دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و تری‌اکسید گوگرد (SO_3) تبدیل می‌شود. این گازها در حضور بخار آب موجود در جو، اسیدهایی نظیر اسید سولفوریک (H_2SO_4)را تشکیل می‌دهند که منجر به بروز پدیده‌ی باران اسیدی می‌گردد. باران اسیدی اثرات مخربی بر اکوسیستم‌های زمینی و آبی دارد؛ از جمله اسیدی شدن خاک و آب‌های سطحی، کاهش حاصل‌خیزی خاک، از بین رفتن گیاهان و تخریب جنگل‌ها.

افزون بر آن، اکسیدهای گوگرد از اجزای اصلی ذرات معلق ثانویه ($PM_{2.5}$) در جو محسوب می‌شوند که استنشاق آن‌ها خطرات جدی برای سلامت انسان دارد. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض این ذرات می‌تواند موجب بیماری‌های تنفسی، التهاب مجاری هوایی، آسم، بیماری‌های قلبی—عروقی و افزایش نرخ مرگ‌ومیر زودرس شود.

از دیدگاه زیست‌محیطی، حضور گوگرد در سوخت‌ها نه‌تنها موجب آلودگی هوا می‌شود بلکه در کاهش کارایی سامانه‌های کنترل آلایندگی وسایل نقلیه نیز تأثیر دارد. به‌طور خاص، گوگرد باعث غیرفعال شدن کاتالیست‌های اکسیداسیون و تبدیل سه‌راهه در خودروها می‌شود و در نتیجه، راندمان حذف گازهای مضر مانند CO ، NOx و HC کاهش می‌یابد.

در محیط‌های دریایی، سوزاندن سوخت‌های سنگین حاوی گوگرد بالا (نظیر نفت‌کوره) یکی از منابع اصلی تولید SO_2 در نواحی ساحلی به شمار می‌رود. به همین دلیل، سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) با اجرای مقررات IMO 2020 ، میزان مجاز گوگرد در سوخت‌های دریایی را به ۰٫۵ درصد وزنی کاهش داده است.

به‌طور کلی، اثرات زیست‌محیطی ترکیبات گوگردی را می‌توان در سه سطح عمده خلاصه کرد:

۱.تخریب اکوسیستم‌ها از طریق باران‌های اسیدی و آلودگی خاک و آب.

۲.آسیب به سلامت انسان به‌دلیل افزایش غلظت آلاینده‌های ثانویه و ذرات معلق.

۳.کاهش کارایی فناوری‌های کنترل آلایندگی و در نتیجه افزایش غیرمستقیم انتشار سایر آلاینده‌ها.

بنابراین، کنترل و کاهش گوگرد در فرآورده‌های نفتی نه‌تنها از دیدگاه کیفیت سوخت بلکه به‌عنوان ضرورتی برای حفظ محیط‌زیست و سلامت عمومی مطرح است.

تأثیر ترکیبات گوگردی بر تجهیزات پالایشگاهی و سامانه‌های احتراقی

وجود ترکیبات گوگردی در نفت خام و فرآورده‌های نفتی علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، پیامدهای نامطلوبی بر عملکرد و دوام تجهیزات صنعتی و احتراقی دارد. این اثرات عمدتاً به‌صورت خوردگی، رسوب‌گذاری، کاهش بازدهی کاتالیست‌ها و تخریب مواد سازه‌ای بروز می‌کنند که موجب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در واحدهای پالایش و مصرف سوخت می‌گردد.

خوردگی در تجهیزات پالایشگاهی

ترکیبات گوگردی نظیر مرکاپتان‌ها، سولفیدها، دی‌سولفیدها و تیوفن‌ها در شرایط دمایی و فشاری بالا تجزیه شده و هیدروژن سولفید (H_2S) آزاد می‌کنند. این گاز در حضور رطوبت، با تشکیل اسید سولفیدریک ($H_2S + H_2O \rightarrow H_2SO_3$)

باعث خوردگی شدید در خطوط لوله، مبدل‌های حرارتی و برج‌های تقطیر می‌شود. این نوع خوردگی به‌ویژه در بخش های بالا دستی و واحد های هیدروتریتینگ بسیار نمایان است .

کاهش عمر و کارایی کاتالیست‌ها

گوگرد یکی از عوامل اصلی مسمومیت کاتالیستی در فرآیندهای پالایش و تصفیه سوخت به شمار می‌رود. در واکنش‌های کاتالیستی نظیر هیدروکراکینگ، رفرمینگ کاتالیستی و اکسیداسیون جزئی، حضور ترکیبات گوگردی باعث رسوب گوگرد بر سطح فعال کاتالیست و در نتیجه کاهش سطح مؤثر واکنش می‌شود. این پدیده موجب افت فعالیت کاتالیست، تغییر مسیر واکنش‌ها و کاهش کیفیت محصولات نهایی می‌گردد.

اثرات مخرب در سامانه‌های احتراقی در تجهیزات احتراقی مانند توربین‌ها، موتورهای دیزلی و بویلرها، اکسیدهای گوگرد حاصل از احتراق ترکیبات گوگردی با بخار آب واکنش داده و اسید سولفوریک تولید می‌کنند. در دماهای پایین، این اسید در سطوح فلزی چگالیده شده و باعث خوردگی داغ (Hot Corrosion) در نواحی خروجی گازهای داغ و مسیرهای اگزوز می‌شود. این نوع خوردگی به‌ویژه در پره‌های توربین گازی و دیگ‌های بخار، منجر به کاهش عمر مفید تجهیزات و افزایش هزینه‌های تعمیراتی می‌شود.

اثرات بر سیستم‌های انتقال و ذخیره‌سازی

وجود گوگرد و مشتقات آن در فرآورده‌های نفتی می‌تواند موجب تغییر خواص فیزیکی سوخت، افزایش ویسکوزیته و تشکیل لجن یا رسوب گوگردی در تانک‌ها و خطوط انتقال شود. این رسوبات با کاهش ظرفیت جریان، ایجاد انسداد و تخریب تدریجی لایه‌های محافظتی داخلی لوله‌ها، عملکرد سیستم‌های انتقال را مختل می‌کنند.

به‌طور کلی، حضور گوگرد در فرآورده‌های نفتی باعث ایجاد مجموعه‌ای از مشکلات فنی و اقتصادی در صنایع نفت، گاز و انرژی می‌شود. ازاین‌رو، استفاده از روش‌های گوگردزدایی کارآمد و انتخاب مواد مقاوم به خوردگی در طراحی تجهیزات پالایشگاهی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

تأثیر ترکیبات گوگردی بر کیفیت سوخت

وجود ترکیبات گوگردی در فرآورده‌های نفتی یکی از عوامل تعیین‌کننده در کیفیت نهایی سوخت به‌شمار می‌رود. گوگرد نه‌تنها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوخت تأثیرگذار است، بلکه بر عملکرد احتراقی، پایداری حرارتی و سازگاری سوخت با سامانه‌های موتور و کاتالیست‌ها نیز اثرات نامطلوبی بر جای می‌گذارد.

کاهش عدد ستان و اکتان

ترکیبات گوگردی، به‌ویژه تیوفن‌ها و بنزوتیوفن‌ها، تمایل به تأخیر در فرآیند احتراق دارند و می‌توانند باعث کاهش عدد ستان در سوخت‌های دیزلی و کاهش عدد اکتان در بنزین شوند. این موضوع منجر به احتراق ناقص، افزایش دوده و آلاینده‌ها و کاهش بازده حرارتی موتور می‌گردد.

افزایش تولید آلاینده‌ها در احتراق

در طی احتراق سوخت‌های گوگرددار، ترکیبات گوگردی به اکسیدهای گوگرد تبدیل می‌شوند که در تماس با بخار آب موجود در گازهای خروجی، موجب تشکیل اسید سولفوریک و ذرات معلق سولفاته می‌گردند. این پدیده علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، باعث افزایش دوده، کاهش شفافیت گازهای خروجی و افت راندمان احتراق می‌شود.

اثر بر خواص روان‌کاری و پایداری سوخت

در برخی سوخت‌ها، به‌ویژه گازوئیل، گوگرد به‌صورت طبیعی خاصیت روان‌کاری سوخت را بهبود می‌دهد. بااین‌حال، در مقادیر زیاد، ترکیبات گوگردی باعث تشکیل رسوبات، افزایش ویسکوزیته و ناپایداری حرارتی سوخت می‌شوند. از سوی دیگر، در فرآیند کاهش گوگرد (تولید سوخت‌های کم‌گوگرد)، خاصیت روان‌کاری کاهش می‌یابد و نیاز به افزودن مواد بهبوددهنده احساس میشود. (Lubricity Additives)

ایجاد خوردگی و ناپایداری در سیستم سوخت‌رسانی

وجود مرکاپتان‌ها و سولفیدها در سوخت می‌تواند باعث ایجاد بوی نامطبوع، خوردگی در باک و لوله‌های سوخت‌رسانی و تخریب واشرها و اجزای لاستیکی شود. همچنین، در شرایط ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، ترکیبات گوگردی می‌توانند با اکسیژن و فلزات واکنش داده و منجر به تشکیل صمغ و ترکیبات نامحلول شوند که بر پایداری سوخت اثر منفی دارد.

اثر بر عملکرد سامانه‌های پس‌سوز و کاتالیستی

گوگرد یکی از مهم‌ترین عوامل مسمومیت کاتالیستی در سامانه‌های کنترل آلایندگی وسایل نقلیه است. در حضور گوگرد، سطح فعال کاتالیست‌ها (مانند پلاتین و پالادیوم) با ترکیبات سولفیدی پوشیده می‌شود و کارایی سیستم‌های مبدل به‌شدت کاهش می‌یابد. این موضوع مستقیماً بر کیفیت سوخت از منظر عدم حذف آلاینده های کاتالیستی تاثیر میگذارد.

اثرات اقتصادی ترکیبات گوگردی در فرآورده‌های نفتی

ترکیبات گوگردی علاوه بر اثرات فنی و زیست‌محیطی، پیامدهای اقتصادی گسترده‌ای نیز برای صنایع نفت، پالایش، حمل‌ونقل و حتی جوامع مصرف‌کننده به‌همراه دارند. این اثرات در سه سطح اصلی — هزینه‌های پالایش، هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات، و پیامدهای اقتصادی ناشی از آلودگی محیط زیست — قابل بررسی است.

افزایش هزینه‌های پالایش و فرآورش

حذف گوگرد از فرآورده‌های نفتی یکی از پرهزینه‌ترین مراحل پالایش است. واحدهای هیدروگوگردزدایی (Hydrodesulfurization – HDS)به فشار و دمای بالا، مصرف زیاد هیدروژن و استفاده از کاتالیست‌های گران‌قیمت نیاز دارند. افزایش گوگرد در نفت خام یا فرآورده‌ها باعث می‌شود انرژی و هیدروژن در پالایشگاه افزایش یابد مصرف کاتالیست‌ها زودتر غیرفعال شوند و هزینه تعویض آن‌ها بالا رود.

خسارات ناشی از خوردگی و افت بهره‌وری تجهیزات

ترکیبات گوگردی، به‌ویژه سولفیدها و مرکاپتان‌ها، موجب خوردگی در خطوط لوله، تانک‌های ذخیره، مبدل‌های حرارتی و تجهیزات احتراقی می‌شوند. خوردگی سبب توقف‌های مکرر برای تعمیر، کاهش عمر مفید تجهیزات و افزایش هزینه‌های نگهداری می‌شود.

برآوردها نشان می‌دهد که در صنایع نفت و گاز، حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل هزینه‌های نگهداری به خوردگی ناشی از گوگرد اختصاص دارد. این هزینه‌ها شامل تعویض قطعات، توقف تولید و کاهش بازده حرارتی تجهیزات است.

تأثیر بر بازار و ارزش اقتصادی نفت خام

نفت خام‌ها از نظر میزان گوگرد به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند:

نفت‌های شیرین :(Sweet Crude) با گوگرد کمتر از ۰٫۵٪،
نفت‌های ترش :(Sour Crude) با گوگرد بیشتر از ۰٫۵٪.

نفت‌های ترش به دلیل نیاز به فرآورش بیشتر و هزینه‌های بالاتر گوگردزدایی، ارزش اقتصادی پایین‌تری در بازار جهانی دارند. اختلاف قیمت بین این دو نوع نفت خام می‌تواند از چند دلار تا بیش از ۱۰ دلار در هر بشکه متغیر باشد، بسته به سطح گوگرد و پیچیدگی پالایشگاه.

.

هزینه‌های ناشی از آسیب‌های زیست‌محیطی و بهداشتی

بر اساس برآوردهای سازمان جهانی بهداشت(WHO) ، آلودگی ناشی از سوخت‌های پرگوگرد سالانه میلیاردها دلار خسارت اقتصادی از طریق افزایش هزینه‌های بهداشت و کاهش کیفیت زندگی ایجاد می‌کند. کاهش گوگرد در سوخت می‌تواند تا چندین برابر هزینه پالایش، صرفه‌جویی اقتصادی غیرمستقیم به همراه داشته باشد.

۵ .اثرات در بخش حمل‌ونقل و انرژی

در صنایع حمل‌ونقل، استفاده از سوخت‌های کم‌گوگرد موجب افزایش بازده موتورها، کاهش نیاز به تعمیرات، و افزایش طول عمر کاتالیست‌ها و فیلترهای دوده می‌شود. اگرچه در ابتدا قیمت سوخت‌های کم‌گوگرد بالاتر است، اما در بلندمدت، هزینه عملیاتی پایین‌تر و صرفه‌جویی در مصرف سوخت باعث جبران هزینه اولیه می‌گردد.

به‌طور کلی، ترکیبات گوگردی در فرآورده‌های نفتی از منظر اقتصادی دو پیامد متضاد دارند :

از یک سو، حذف آن‌ها هزینه‌بر و انرژی‌بر است؛ اما از سوی دیگر، عدم حذف گوگرد موجب خسارات گسترده‌تری در قالب آلودگی محیط زیست، کاهش طول عمر تجهیزات و افت کیفیت سوخت می‌شود. بنابراین، از دیدگاه اقتصاد صنعتی، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های گوگردزدایی پیشرفته و تولید سوخت‌های کم‌گوگرد یک اقدام اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی سودمند در بلندمدت محسوب می‌شود.

روش های اندازه گیری ترکیبات گوگردی

سه روش عمده و پر استفاده برای تعیین مقدار گوگرد عبارتند از

طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

احتراق کامل و سنجش H_2S یا SO_2

کروماتوگرافی گازی با آشکارساز گوگرد

طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (X-ray Fluorescence – XRF)

در این روش، نمونه (که می‌تواند مایع، جامد یا پودری باشد) در معرض پرتوی شدید ایکس قرار می‌گیرد
پرتو ایکس، الکترون‌های لایه‌های درونی اتم‌ها را کنده و باعث می‌شود اتم برای بازگشت به حالت پایدار، از لایه‌های بالاتر .الکترونی جابه‌جایی ایجاد کند — در نتیجه، پرتوی فلورسانس ثانویه‌ای ساطع می‌شود

هر عنصر، از جمله گوگرد، انرژی فلورسانس خاص خود را دارد. دستگاه شدت این اشعه را دقیقاً در انرژی مربوط به گوگرد می‌سنجد و از روی آن، مقدار گوگرد موجود در نمونه را محاسبه می‌کند (keV تقریباً ۲.۳)

تجهیزات و فرآیند :

- منبع تابش X (معمولاً مولد X یا آمپول X-tube)
- آشکارساز انرژی پراکندگی (Si Detector)
- سیستم آنالیز داده (برای تفکیک پیک‌ها)
- کالیبراسیون با استانداردهای گوگرد مشخص (SRM)

نمونه معمولاً به شکل لایه‌ی نازک در ظرف مخصوص ریخته می‌شود تا پرتو به‌صورت یکنواخت از آن عبور کند.

از مزایای این روش

سریع و بدون نیاز به تخریب نمونه (چند دقیقه تا نتیجه)

قابل استفاده برای نمونه‌های جامد، مایع و حتی لجن‌های نفتی

امکان اندازه‌گیری چند عنصر همزمان **(Multi-Element Analysis)**

پشتیبانی از محدوده وسیع غلظت (از **ppm** تا درصد)

کاربردهای اندازه گیری با استفاده از طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس

۱. کنترل گوگرد در بنزین و گازوئیل در پالایشگاه‌ها

۲. تعیین گوگرد در روغن‌ها، پلاستیک‌ها، و مواد معدنی

۳.ارزیابی کیفیت فرآورده‌های نفتی مطابق با استاندارد **ASTM D4294**

احتراق کامل و سنجش H_2S یا SO_2

همه‌ی گوگردها می‌سوزند، اما عددشان در شعله باقی می‌ماند!

یعنی تمام ترکیبات گوگردی موجود در نمونه (سولفیدها، دی‌سولفیدها، تیوفن‌ها و ...) در اکسیژن خالص سوزانده می‌شوند تا کاملاً به دی‌اکسید گوگرد (SO_2) یا هیدروژن سولفید (H_2S) تبدیل شوند.

سپس گازهای حاصل به یک سیستم جذب یا آشکارساز هدایت می‌شوند تا مقدارشان به‌صورت دقیق اندازه‌گیری شود.

فرآیند عملی این نوع از اندازه گیری به شرح ذیل است.

۱. ورود نمونه به کوره احتراق (۸۵۰–۱۱۰۰ °C)

اکسیداسیون کامل گوگرد به SO_2

عبور گاز از محلول جذب‌کننده (مثلاً پراکسید هیدروژن یا تتراهیدرات تتراکلرید قلیایی)

اندازه‌گیری با یکی از روش‌های زیر:

تیتراسیون یدومتری

سنجش هدایت الکتریکی

آشکارساز ماوراءبنفش (**UV Detector**) برای SO_2

مزایا این روش
-بسیار معتبر و برای «گوگرد کل (Total Sulfur) «استاندارد شده
-مستقل از نوع ترکیبات — هرچه گوگردی باشد، اندازه گرفته می‌شود
- قابل انجام برای جامدات، مایعات و گازها
این نوع از اندازه گیری دارای محدودیت هایی هم میباشد که به این شرح میباشد
روش تخریبی است (نمونه از بین می‌رود)
عملیات حرارتی پرانرژی و نیازمند کنترل دقیق دما
زمان اندازه‌گیری نسبت به XRF بیشتر است .
کاربرد های این نوع از اندازه گیری :
و زغال‌سنگ (LPG) تعیین گوگرد در نفت، گاز مایع
کنترل آلودگی در فرآیند احتراق صنعتی
آنالیز قیر و کودهای حاوی سولفور

روش‌های جداسازی گوگرد

روش های فیزیکی جدا سازی گوگرد

در روش‌های فیزیکی، گوگرد از ترکیبات یا مواد همراهش جدا می‌شود بدون اینکه ساختارش عوض شود.

روش فراش (Frasch Process)

استخراج فیزیکی حرارتی از ذخایر زیرزمینی این روش معروف‌ترین و صنعتی‌ترین روش فیزیکی جداسازی گوگرد است.
در بعضی مناطق (مثل تگزاس یا مکزیک)، گوگرد در لایه‌های زیرزمینی وجود داردادا به‌صورت جامد و در عمق زیاد است، جایی که کندن سنگ ممکن نیستبنا براین با فشار دادن آب داغ و بخار به داخل چاه، گوگرد را ذوب می‌کنند.

مراحل این نوع از استخراج به شرح ذیل است
سوراخ سه‌لوله‌ای در زمین حفر می‌شود
فرستاده می‌شود تا گوگرد ذوب شود (C°۱۷۰حدود) از لوله بیرونی، آب فوق‌العاده داغ
از لوله داخلی، هوای فشرده فرستاده می‌شود تا گوگرد مذاب به سطح بیاید
ویژگی‌ها :
گوگرد مذاب در سطح سرد می‌شود و به شکل جامد زرد و درخشان به‌دست می‌آید. ویژگی‌ها

هیچ واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد، فقط حالت گوگرد از جامد به مایع تغییر می‌کند
گوگرد استخراج‌شده خلوص بسیار بالایی دارد (۹۹/۵٪)
یکی از زیباترین مثال‌های «جداسازی فیزیکی در مقیاس صنعتی» شناخته می‌شود.

تصفیه فیزیکی از گوگرد خام

گاهی گوگرد استخراج‌شده از معادن، حاوی خاک، گردوغبار و ناخالصی‌های فیزیکی است
برای پاک‌سازی، از روش‌های ساده ولی مؤثر استفاده می‌شود
الف) ذوب و صاف‌کردن :(Filtration of molten sulfur)
گوگرد حرارت داده می‌شود تا ذوب شود،
سپس از صافی فلزی یا فیلتر عبور داده می‌شود تا مواد جامد نامحلول جدا شوند.
ب) تبخیر و چگالش مجدد :(Distillation)
گوگرد را تبخیر و بخار گوگرد را در ظرف سرد چگال می‌کنند
گویه گوگرد خالص کریستالی به‌دست می‌آید.

تصفیه و بازیافت گوگرد از نفت و گاز طبیعی

در نفت خام، ترکیباتی از نوع سولفیدها و مرکاپتان‌ها (R–SH) وجود دارد .
پیش از پالایش بنزین و گازوئیل باید این گوگردها حذف شوند،
چون باعث دود سمی SO_2 و آلودگی می‌شوند.
در مرحله‌ی اول گوگرد فیزیکی به‌صورت بخار یا گاز H_2S جدا می‌شود .
این گاز در مرحله‌ی بعد (در بخش شیمیایی، به نام فرآیند کلاوس) به گ یعنی بخش اولیه‌اش (جدا کردن گوگرد از سوخت) فیزیکی است — با دما، فشار و جذب انتخابی.وگرد جامد تبدیل می‌شود.

بخش دوم: روش‌های شیمیایی جداسازی گوگرد
وقتی گوگرد به شکل «عنصر آزاد» در دسترس نباشد،
باید از ترکیباتش (سولفیدها یا سولفات‌ها) جدا شود — این کار فقط از راه شیمیایی ممکن است،
چون باید واکنش انجام شود و پیوندهای شیمیایی شکسته شوند.

روش های شیمیایی جداسازی گورگرد

فرایند کِلاوس (Claus Process)– جداسازی صنعتی از گاز H_2S

در صنایع نفت و گاز طبیعی، مقدار زیادی گاز هیدروژن سولفید (H_2S) وجود دارد .
این گاز سمی است اما منبع اصلی گوگرد به شمار می‌آید .
برای جداسازی گوگرد، فرآیند شیمیایی دو مرحله‌ای زیر انجام می‌شود
مرحله ۱ – سوختن کنترل‌شده:
نیمی از H_2S را با اکسیژن می‌سوزانند $H2S + 3O2 \rightarrow 2SO2 + 2H2O$

مرحله ۲ – واکنش تبدیل:
گاز SO_2 به همراه H_2S باقیمانده واکنش می‌دهد:

$$2H2S + SO2 \rightarrow 3S + 2H2O$$

در پایان، بخار آب جدا می‌شود و گوگرد خالص به‌دست می‌آید
اهمیت این روش : این روش امروزه بیش از ۹۵٪ گوگرد جهان را تولید می‌کند
نوع واکنش: اکسایش و کاهش هم‌زمان (Redox Reaction)

احیای سولفات‌ها و سولفیدها در معادن

در طبیعت، گوگرد بیشتر به‌صورت سولفید فلزات مانند FeS_2 یا پیریت وجود دارد.
برای استخراج گوگرد از این سنگ‌ها، از واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود:

$$۴FeS2 + 1102 \rightarrow 2Fe203 + 8SO2۴$$

در این فرآیند، گوگرد به‌صورت گاز SO_2 جدا می‌شود. سپس می‌توان با کاهش SO_2 (مثلاً با H_2 یا CH_4) دوباره گوگرد آزاد تولید کرد.

$$SO2 + 2H2 \rightarrow S + 2H2O$$

واکنش‌های اسیدی–قلیایی برای استخراج گوگرد از کانی‌ها

در بعضی موارد، ترکیبات گوگردی (مثل سولفات باریم یا سولفید سرب) را با محلول‌های اسیدی یا قلیایی واکنش می‌دهند تا گوگرد جدا یا تبدیل شود.
مثلاً باقیمانده گوگردی در سنگ معدن را می‌توان با اصلاح pH محلول به گوگرد خالص تبدیل کرد.

و در اخر میتوان گفت اگر گوگرد به‌صورت آزاد در زمین وجود داشته باشد، با روش‌های فیزیکی مثل ذوب و تقطیر به‌دست می‌آید.
اما اگر در ترکیب‌های معدنی یا گازی باشد، باید روش‌های شیمیایی مثل فرآیند کلاوس یا اکسایش-احیا انجام داد. گوگرد یکی از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در فرآورده‌های نفتی است که حضور آن اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، فنی و در فرآیند احتراق، نقش قابل توجهی SO_3 و SO_2 اقتصادی به‌همراه دارد. ترکیبات گوگردی با ایجاد آلاینده‌هایی مانند در آلودگی هوا، باران‌های اسیدی و کاهش کیفیت سوخت ایفا می‌کنند. علاوه بر این، گوگرد موجب مسمومیت کاتالیست‌ها، خوردگی تجهیزات پالایشگاهی و کاهش راندمان فرآیندهای پایین‌دستی می‌شود.
در این مقاله، ضمن بررسی انواع ترکیبات گوگردی موجود در نفت خام و فرآورده‌های نفتی، اثرات مخرب آن‌ها بر محیط زیست و عملکرد صنعتی مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین روش‌های مختلفی از جمله روش فراش برای جداسازی فیزیکی و از روش کلاوس برای جداسازی شیمیایی بررسی شدند.

فهرست منابع

Speight, J. G. (2020). The Chemistry and Technology of Petroleum. CRC Press.

Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2016). Petroleum Refining: Technology and Economics. CRC Press.

World Health Organization (WHO). (2018). Ambient air pollution: Health impacts

Speight, J. G. (2020). The Chemistry and Technology of Petroleum. CRC Pre.

Towler, G., & Sinnott, R. (2022). Chemical Engineering Design. Elsevier

Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2016). Petroleum Refining: Technology and Economics. CRC Press.