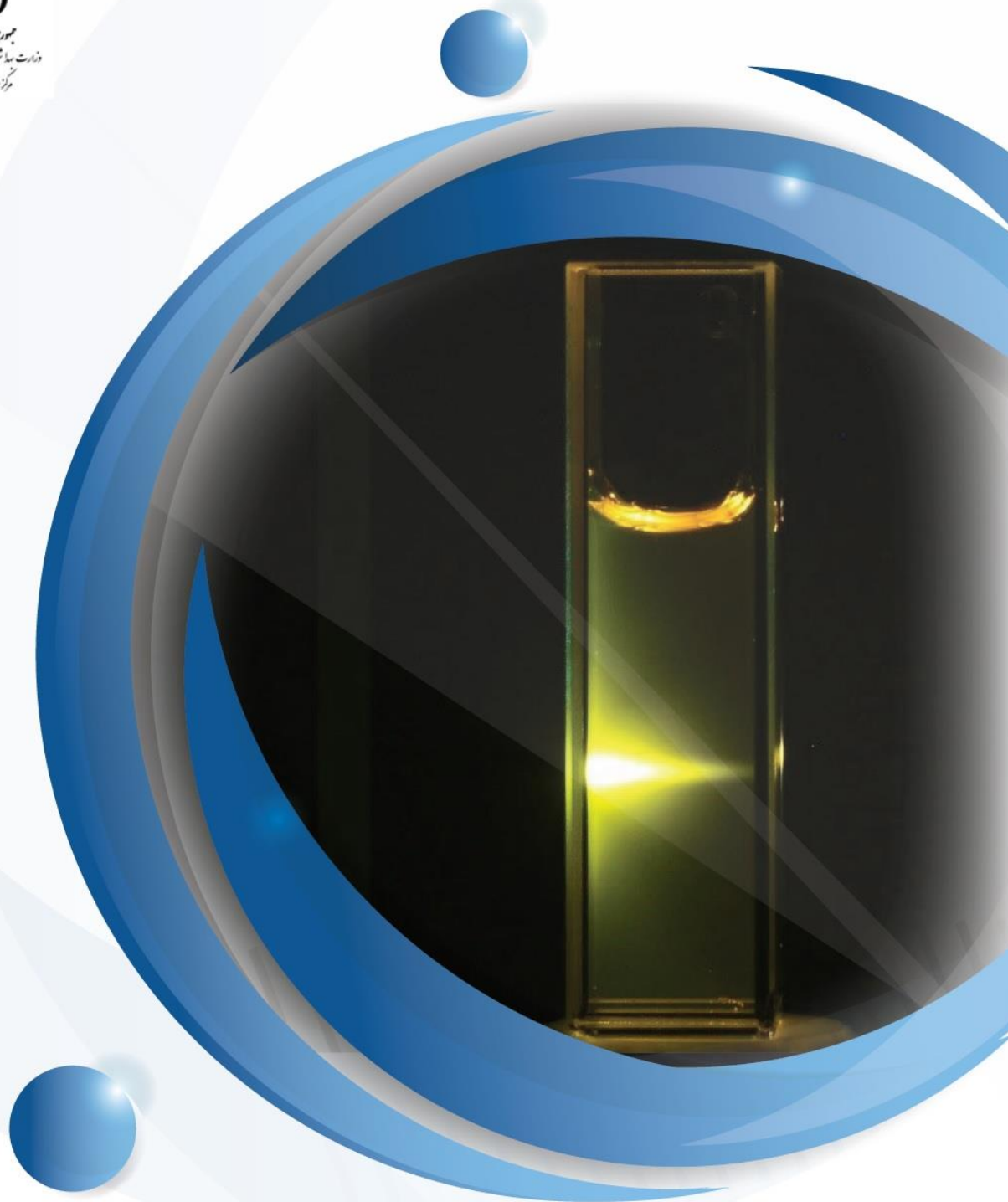




بکارگیری دستگاه مادون قرمز
در تعیین مواجهه شغلی با سیلیسی کریستالی
و روشن معدنی



عنوان و نام پدیدآور	:	بکارگیری دستگاه مادون قرمز در تعیین مزاجیه شغلی با سیلیس کریستالی و روغن معدنی/گردآوری و ترجمه رضوان زنددل...[و دیگران] ، ویراستار احسان فروزش.
مشخصات نشر	:	تهران: وزارت بهداشت درمان و آموزش پزشکی ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	:	۶۶ص: جدول ، نمودار.
شابک	:	978-622-6276-90-0
وضعیت فهرست نویسی	:	فیا
یادداشت	:	گردآوری و ترجمه رضوان زنددل ، احمد جتیدی جعفری ، زهرا مراد پور ، معصومه وهابی تکرلو ، زهرا پنجعلی، فاطمه صانقی ، احسان فروزش.
یادداشت	:	کتابنامه: ص. ۵۵ - ۶۶.
موضوع	:	تجیزات مادون قرمز -- آزمایش
	:	Infrared equipment -- Testing
	:	تست مادون قرمز -- کاربردهای صنعتی
	:	Infrared radiation -- Industrial applications
	:	سیلیس
	:	Silica
	:	روغن‌های معدنی
	:	Mineral oils
	:	بهداشت صنعتی
	:	Industrial hygiene
شناسه افزوده	:	زنددل، رضوان، ۱۳۵۴ -، گردآورنده، مترجم
شناسه افزوده	:	ایران. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی
شناسه افزوده	:	Iran. Ministry of Health and Medical Education
رده بندی کنگره	:	TA۱۵۷۰
رده بندی دیویی	:	۶۲۱/۳۶۲
شماره کتابشناسی ملی	:	۸۷۴۸۴۵۰
اطلاعات رکرد کتابشناسی	:	فیا
تاریخ درخواست	:	۱۴۰۰/۱۱/۱۰
تاریخ پاسخگویی	:	
کد پیگیری	:	8737555

به کارگیری دستگاه مادون قرمز در تعیین مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی و روغن معدنی

گردآوری و ترجمه:

دکتر رضوان زنده‌دل

دکتر احمد جنیدی جعفری

مهندس زهرا مراد پور

مهندس معصومه وهابی شکرلو

دکتر زهرا پنجعلی

دکتر فاطمه صادقی

مهندس احسان فرورش

طراح جلد:

دکتر زهرا پنجعلی

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه‌ای بر طیف‌سنجی مادون قرمز FT-IR.....	۱
۱-مقدمه.....	۱
۱-۱. اجزاء تشکیل دهنده طیف‌سنج FT-IR.....	۲
۱-۲. انواع نمونه‌ها در دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه.....	۵
۱-۳. کاربرد کیفی در دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه.....	۶
منابع:.....	۸
فصل دوم راهنمای تعیین مواجهه تنفسی با میست روغن‌های معدنی.....	۹
۱-مقدمه.....	۱۰
۲-اهداف.....	۱۱
۳-اصطلاحات و تعاریف.....	۱۱
دقت: نزدیکی نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های تکراری برای یک ماده است.....	۱۲
۴-روغن‌های معدنی.....	۱۳
۴-۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی.....	۱۳
۴-۲. کاربردهای صنعتی و میزان مصرف.....	۱۳
۴-۳. ترکیبات موجود در مایعات فلزکاری.....	۱۴
۴-۳-۱. فرمالدئید.....	۱۵
۴-۳-۲. نیتروز آمین ها.....	۱۵
۴-۴. عوارض ناشی از روغن‌های معدنی.....	۱۶
۵-اندازه‌گیری میست روغن‌های معدنی با روش ۵۰۲۶ NIOSH.....	۱۸
۵-۱. مراحل اندازه‌گیری میست روغن‌های معدنی با استفاده از دستگاه FT-IR.....	۲۳
۵-۱-۱. مرحله‌ی اول: تهیه نمونه‌های بالک روغن معدنی.....	۲۳
۵-۱-۲. مرحله‌ی دوم: بررسی دانسیته.....	۲۳
۵-۱-۳. مرحله‌ی سوم: تهیه محلول استاندارد مادر.....	۲۳
۵-۱-۴. مرحله‌ی چهارم: تهیه محلول‌های استاندارد کاربردی.....	۲۴
۵-۱-۵. مرحله‌ی پنجم: آنالیز نمونه‌های استاندارد کاری.....	۲۵

۲۵	۵-۱-۶. دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز
۲۷	۶- اعتبارسنجی روش در آزمایشگاه آنالیز کننده
۲۷	۶-۱. تعیین دقت
۲۹	۶-۲. تعیین صحت
۲۹	۶-۳. تعیین حد تشخیص کیفی (LOD)
۳۰	۶-۴. تعیین حد تشخیص کمی (LOQ)
۳۰	۶-۵. آنالیز نمونه‌های واقعی
۳۱	منابع:
۳۴	فصل سوم راهنمای تعیین مواجهه تنفسی با سیلیس کریستالی
۳۵	۱. مقدمه
۳۶	۱. اهداف
۳۶	۲. اصطلاحات و تعاریف
۳۸	۳. سیلیس کریستالی
۳۸	۴-۱. سیلیکای کریستالی (پلی مورف) و انواع آن
۳۹	۴-۲. خصوصیات فیزیکی اشکال عمده سیلیس کریستالی
۴۰	۴-۳. مواجهه با سیلیس در صنایع مختلف
۴۱	۴-۴. حدود مجاز مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی
۴۱	۴-۵. بیماری‌های ناشی از مواجهه با سیلیس کریستالی
۴۳	۴. تشخیص کمی و کیفی سیلیس کریستالی با طیف‌سنجی FT-IR
۴۵	۶-۱. نمونه‌برداری از سیلیس کریستالی
۴۷	۶-۲. روش آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد سیلیس کریستالی
۴۹	۶-۳. تهیه منحنی کالیبراسیون
۵۳	۶-۴. تعیین نمونه‌های هوا
۵۵	۸. منابع
۳	شکل ۱- دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه
۴	شکل ۲- شمای تداخل سنج مایکلسون

- شکل ۳- طیف مربوط به یک نمونه استاندارد از روغن معدنی در روش FT-IR ۲۵
- شکل ۴- دمای تبدیل انواع سیلیس کریستالی ۳۹
- شکل ۵- طیف مادون قرمز سیلیس کریستالی ۴۴
- شکل ۶- سیکلون جهت نمونه برداری از ذرات قابل استنشاق ۴۵
- شکل ۷- بوته چینی و بشقابک چینی ۴۸
- شکل ۸- ساییدن پودر کوارتز ۴۸
- شکل ۹- قالب سه بخشی ۵۰
- شکل ۱۰- قالب تهیه قرص در دستگاه FT-IR ۵۰
- شکل ۱۱- دستگاه پرس در دستگاه FT-IR ۵۱
- شکل ۱۲- قرص تهیه شده در قالب دستگاه FT-IR ۵۱
- شکل ۱۳- اسپکتروگرام سیلیس در نمونه استاندارد ۵۲
- شکل ۱۴- نمونه‌ی هوا از سیلیس ۵۴
- نمودار ۱- نمونه‌ای از منحنی کالیبراسیون روغن‌های معدنی ۲۷
- نمودار ۲- منحنی استاندارد جهت کالیبراسیون روتامتر ۴۷
- نمودار ۳- منحنی استاندارد جهت تعیین سیلیس کریستالی ۵۳
- جدول ۱- جذب کروموفورهای مهم در مادون قرمز ۷
- جدول ۲- مقدار حد مجاز مواجهه با میست های روغن توسط سازمان‌های مختلف ۱۷
- جدول ۳- روش میست روغن معدنی NIOSH ۵۰۲۶ ۱۹
- جدول ۴- نتایج آنالیز غلظت‌های استاندارد با دستگاه FT-IR ۲۶
- جدول ۵- ضریب تغییرات درون روز و برون روز ۲۸
- جدول ۶- خصوصیات انواع سیلیس کریستالی ۳۹
- جدول ۷- کالیبراسیون روتامتر با فلومتر حباب صابون الکترونیکی ۴۶
- جدول ۸- میزان حجم مورد نیاز از سوسپانسیون سیلیس جهت تهیه منحنی استاندارد ۴۹
- جدول ۹- میزان حجم مورد نیاز از سوسپانسیون سیلیس جهت تهیه منحنی استاندارد ۵۲

پیش گفتار

همگام با توسعه واحدهای صنعتی، بکارگیری تجهیزات و ماشین آلات صنعتی، کشف و استفاده از ده ها هزار نوع ماده شیمیایی با ویژگی های فیزیکی، شیمیایی، سم شناسی و فیزیولوژیکی مختلف، احتمال مواجهه و ابتلای شاغلین به بیماری های شغلی شناخته شده و نوپدید را افزایش داده است و ضرورت شناسایی کیفی و کمی مواد مذکور را جهت اتخاذ راهکارهای پیشگیرانه و انطباق با حدود مجاز مواجهه شغلی کشور اجتناب ناپذیر نموده است. سال هاست که طیف سنجی مادون قرمز به عنوان روش مناسبی برای آنالیز مواد در آزمایشگاه استفاده می شود و یکی از پر کاربردترین تجهیزات آنالیز دستگاهی در شناسایی کیفی، تعیین ساختار مولکولی و گروه های عاملی موجود در مولکول های مختلف آلی و معدنی یک ماده می باشد. در همین راستا، این روش کاربرد های فراوان دیگری در حوزه های مختلفی مانند شیمی، علوم زیستی و دارویی، محیط زیست، پلیمرها، صنایع مختلف، شناسایی مولکول های معدنی، علوم جنایی، هوافضا، علوم و فناوری های نانو و بهداشت حرفه ای پیدا کرده است. همچنین این دستگاه به عنوان روشی مناسب جهت تعیین کمی بسیاری از مواد شیمیایی مدنظر می باشد.

با توجه به تعداد زیاد آزمایشگاه های تخصصی موجود در دانشکده های بهداشت دانشگاه های علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی کشور، معاونت های بهداشتی دانشگاه های علوم پزشکی کشور و بخش خصوصی و لزوم اطلاع رسانی به بازرسان، دانشجویان و کارشناسان و ... تدوین راهنمای کاربردی تخصصی جهت بکارگیری دستگاه مادون قرمز در تعیین مواجهه شغلی با عوامل زیان آور شغلی را بیش از پیش ضروری نموده است.

این راهنما تحت عنوان "به کارگیری دستگاه مادون قرمز در تعیین مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی و روغن معدنی" تهیه گردیده است و سعی شده حتی الامکان محتوایی کاربردی و قابل فهم برای متخصصین این حوزه فراهم نماید. امید است راهنمای مذکور قدم موثری در راستای ارتقای سطح دانش، توانمندسازی و بازآموزی گروه های هدف مورد اشاره داشته و شاهد ارتقاء سطح کیفیت خدمات این حوزه تخصصی برای تامین، حفظ و ارتقاء سطح سلامت شاغلین و محیط های کاری کشور عزیزمان ایران باشیم.

فصل اول

مقدمه ای بر طیف سنجی مادون قرمز FT-IR

۱- مقدمه

با پیشرفت فناوری و لزوم دانستن ساختار و کاربرد ترکیبات پیچیده در صنایع و در تحقیقات مختلف، طیف‌سنج مادون قرمز با تبدیل فوری در چند سال اخیر مورد استفاده بسیاری از متخصصان و محققان مراکز پژوهشی، دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است.

طیف مادون قرمز مولکول‌ها دارای تعداد زیادی نوار جذبی است که در نتیجه برهم‌کنش نور مادون قرمز با ماده و تغییر در حرکات مولکولی فراهم می‌شود. یک مولکول مجموعه‌ای ساکت و بی‌حرکت از اتم‌ها نیست بلکه دارای حرکات ارتعاشی متعددی است. دو نوع ارتعاش اساسی برای مولکول‌ها وجود دارد. ارتعاشات کششی که فاصله‌ی دواتم کم و یا زیاد می‌گردد ولیکن محور پیوند دواتم تغییر پیدا نمی‌کند و دیگری ارتعاشات خمشی است که به وسیله آن موقعیت اتم‌ها نسبت به محور اصلی پیوند شیمیایی تغییر می‌کند.

علاوه بر انتقال الکترونی، انتقالات چرخشی و ارتعاشی در گونه‌های چنداتمی رخ می‌دهد. فرکانس تشعشع الکترومغناطیس در ناحیه مادون قرمز (IR) مطابق با فرکانس ارتعاش طبیعی اتم‌های یک پیوند است و پس از جذب امواج مادون قرمز در یک مولکول، باعث ایجاد یک سری حرکات ارتعاشی در آن می‌شود که اساس و مبنای طیف‌سنج مادون قرمز را تشکیل می‌دهد [۱].

طیف مادون قرمز یک مولکول در نتیجه انتقال بین دو سطح انرژی ارتعاشی مختلف ایجاد می‌شود و دستگاه شدت نور جذب‌شده را نسبت به عدد موجی نشان می‌دهد. نمونه مورد آزمایش باید خشک باشد زیرا آب در ناحیه‌ی 3710 cm^{-1} و 1630 به شدت جذب دارد. در صورتی که نمونه آب داشته باشد جذب مولکول مدنظر در نواحی نامبرده در زیر جذب آب پنهان می‌شود و نتایج گمراه‌کننده‌ای به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری کمی در این دستگاه از سطح زیر پیک استفاده می‌شود که متناسب با غلظت نمونه است. در این دستگاه با تابش نور در ناحیه مادون قرمز^۱ تغییر در سطوح انرژی ارتعاشی مولکول رخ می‌دهد که به‌طور عمده شامل ارتعاشات کششی^۲ و خمشی^۳ است. محدوده‌ی طول موج مادون قرمز $2/5$ تا 25 میکرومتر و یا در عدد موج 400 تا 4000 cm^{-1} است. موقعیت پیک‌ها در طیف مادون قرمز مولکول‌ها بستگی به ماهیت پیوندها در مولکول دارد. پیک‌های دارای انرژی بالاتر در طول موج کوتاه‌تر ظاهر می‌شوند که اغلب مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای کوتاه و قوی می‌باشند. در به‌کارگیری طیف مادون قرمز استفاده از عدد موج به‌جای طول موج به دلیل ارتباط مستقیم با انرژی، جهت بیان

^۱ Infra-red-IR^۲ Stretching^۳ Bending

محل‌های جذب استفاده می‌گردد. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری نمونه‌های جامد، مایع و گاز را دارا است. برای نمونه‌های مایع از سل نمکی با جنس پتاسیم کلرید استفاده می‌شود ولی اگر نمونه‌های مایع حاوی آب باشد از سل‌های با جنس کلسیم فلوئورید استفاده می‌گردد. طیف‌سنج مادون قرمز با تبدیل فوریه از ارتقای دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز ایجاد شده است. سرعت بسیار بالا، همچنین افزایش نسبت سیگنال به نویز از مزیت‌های طیف‌سنج مادون قرمز با تبدیل فوریه است.

جهت تهیه طیف از نمونه‌های جامد معمولاً ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی گرم از ماده با حدود ۸۰۰ میلی گرم برمور پتاسیم خالص و خشک مخلوط کرده و به صورت پودر نرم و یکنواخت با فشار خیلی زیاد در قالب‌های مخصوصی به صورت یک قرص نازک و شفاف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در طیف‌سنج محلول‌ها ترکیبات تترا کلرور کربن، سولفور دی کربن و کلروفرم از حلال‌های مناسب برای طیف‌سنج مادون قرمز است.

طیف‌سنج مادون قرمز شیوه‌ای آسان برای شناسایی حضور گروه‌های عاملی خاص در یک مولکول است. همچنین، با این روش می‌توان مجموعه‌ای از باندهای جذبی را برای تأیید هویت یک ترکیب خالص و یا برای تشخیص وجود ناخالصی در ترکیب استفاده نمود.

وقتی برای اولین بار طیف‌سنج‌های مادون قرمز با تبدیل فوریه به بازار راه یافت، حجیم و گران بود و به تنظیم‌های مکرر مکانیکی نیاز داشت، به همین دلیل استفاده از این دستگاه‌ها به کاربردهای خاصی محدود می‌شد امروزه حجم دستگاه‌های تبدیل فوریه در حد قابل استفاده روی میز آزمایشگاه کاهش یافته، قابل اطمینان گشته و نگهداری آن‌ها بسیار ساده است. این دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری‌های کمی و کیفی مناسب هستند [۲].

۱-۱. اجزاء تشکیل دهنده طیف‌سنج FT-IR

سخت‌افزار دستگاه طیف‌سنج FT-IR از بخش‌های مختلفی همچون منبع نور، نگهدارنده نمونه، آشکارساز، تداخل‌سنج و رایانه تشکیل شده است (شکل ۱).



شکل ۱- دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه

هرکدام از این اجزا دارای انواع مختلفی هستند که بسته به نوع دستگاه و کاربرد مورد نیاز استفاده می‌گردد. نحوه ترکیب اجزا می‌تواند بر روی قدرت تفکیک^۱ دستگاه و همچنین میزان حساسیت، صحت و دقت آزمایش‌ها تأثیر بگذارد.

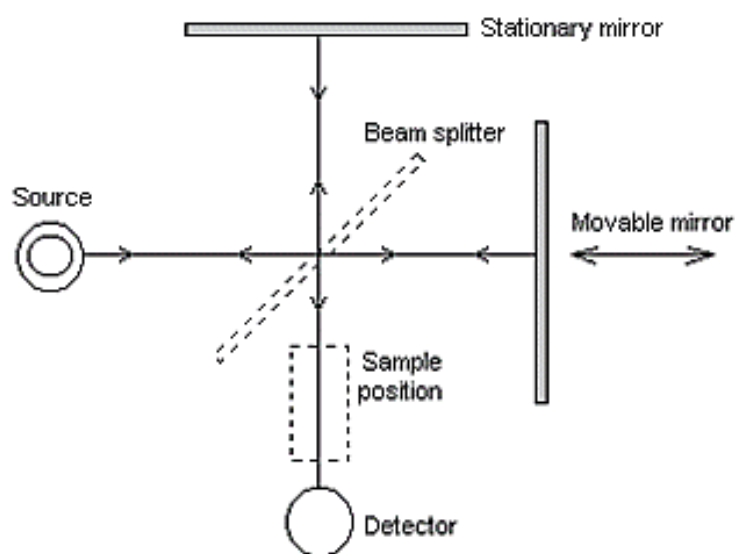
منبع تولید نور مادون قرمز: منبع تابش باید قابلیت تولید طیف پیوسته در گستره مدنظر را داشته باشد، منابع مورد استفاده در دستگاه مادون قرمز عموماً از یک جامد بی‌اثر تشکیل شده‌اند که به صورت الکتریکی به دمای ۹۰۳۳ تا ۱۱۳۳ درجه کلوین می‌رسند و در نتیجه‌ی آن یک تابش پیوسته مانند تابش جسم سیاه^۲ ایجاد می‌نمایند. از جمله این منابع می‌توان به لامپ نرنست که یک لوله توخالی پر شده از گازهای بی‌اثر است اشاره کرد که در آن یک سیم پلاتینی قرار داده شده است. این لامپ در دمای ۱۱۳۳ درجه کلوین نور مادون قرمز تولید می‌کند. منبع دیگر گلوبار است که از یک استوانه‌ی سیلیسیم کاربید تشکیل شده است و توسط نیروی برق به دمای ۹۰۳۳ درجه کلوین می‌رسد. از منابع دیگر می‌توان به منبع قوس جیوه، لامپ سیم تنگستن و همچنین لیزر دی‌اکسید کربن اشاره کرد. پرتو منبع از میان یک روزنه یا دیافراگم عبور کرده و مقدار انرژی انتشار یافته به نمونه و آشکارساز را کنترل می‌کند.

تداخل سنج: یکی از مهم‌ترین اجزای به کار رفته در دستگاه مادون قرمز با تبدیل فوریه تداخل سنج است. در تداخل سنج مایکلسون (شکل ۲) ابتدا نور تابیده شده از منبع توسط یک آینه شکافنده نور (Beam Splitter) به دو باریکه با توان تقریباً یکسان تقسیم می‌شود. یکی از این دو باریکه به یک آینه ثابت و دیگری به یک آینه متحرک برخورد می‌کند. دو باریکه پس از

^۱ Resolution

^۲ اجسامی که توانایی جذب و نشر کامل و سریع انرژی را دارند.

بازتابش از آینه‌های ثابت و متحرک مجدداً در محل آینه شکافنده باهم ترکیب می‌شوند. آینه متحرک را می‌توان قلب تداخل‌سنج دانست. حرکت افقی آینه متحرک باعث می‌شود تا توان تابشی که به آشکارساز می‌رسد افت‌وخیز نماید، به‌عنوان مثال زمانی که فاصله هر دو آینه ثابت و متحرک از آینه شکافنده برابر باشد، اختلاف مسیر آن‌ها صفر بوده و توان خروجی حداکثر خواهد بود. بازتاب نور ساطع‌شده از این دو آینه باعث ایجاد نوری با توان مختلف در زمان می‌شود. تداخل نورهای بازتاب شده باهم باعث می‌شود تا دستگاه بتواند میزان جذب نور با توان‌های مختلف را برای زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری نماید.



شکل ۲- شمای تداخل‌سنج مایکلسون

آشکارساز: نور عبور یافته از نمونه در نهایت به آشکارساز می‌رسد. آشکارسازهای مختلفی در این سیستم‌ها می‌تواند استفاده شوند از جمله: آشکارسازهای گرمایی مثل ترموکوپل، بالومتر و ترمیستور است که ظرفیت گرمایی بسیار پایینی دارند تا بتوانند به تغییرات ناچیز دما پاسخ دهند. آشکارسازهای پیرزو الکتریک و آشکارسازهای دیود نوری بیشترین کاربرد و حساسیت را در میان دیگر آشکارسازها دارند.

تبدیل فوریه: نتایج حاصل از اینترفروگرام تغییرات میزان جذب در واحد زمان را نشان می‌دهد. این نوع داده در طیف‌سنجی چندان قابل‌استفاده نیست. با کمک معادله فوریه تغییرات جذب نور در واحد زمان به تغییرات جذب بر اساس عدد موجی تبدیل می‌گردد که نتایج حاصل از طیف‌سنجی را قابل تحلیل می‌سازد.

در اکثر دستگاه‌های طیف‌سنجی، برای ایجاد گزینش پذیری^۱ مناسب، تابش منبع به یک محدوده باریک از طول‌موج‌ها تبدیل می‌شود. این محدوده توسط صافی‌ها و تکفام‌ها ایجاد می‌گردد که هر کدام دارای زیرمجموعه‌های دیگری بوده و با توجه به شرایط موردنیاز برای روش طیف‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی صافی‌ها بخشی از طول‌موج‌های حاصل از منبع را عبور داده و برخی دیگر را حذف می‌کنند. درحالی‌که تکفام‌ها سازها با استفاده از عناصری مانند آینه، عدسی، منشور یا توری‌ها و دو شکاف برای ورود و خروج نور قابلیت پویش طول‌موج‌ها را به ارمغان می‌آورند. تکفام‌ها سازها بر مبنای شکست نور، تداخل امواج یا پاشندگی^۲ نور عمل کرده و دارای قدرت تفکیک مناسبی هستند.

۱-۲. انواع نمونه‌ها در دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوری

یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های طیف‌سنجی مادون قرمز امکان آنالیز نمونه‌های جامد، مایع و گاز در این دستگاه است. برای هر کدام از این حالات روش آماده‌سازی نمونه و تجهیزات خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه اندازه‌گیری‌ها عموماً بر مبنای جذب تابش است و اکثر گونه‌ها (حتی حلال‌های متداولی مثل آب و الکل‌ها) نور مادون قرمز را جذب می‌کنند، آماده‌سازی نمونه باید با دقت فراوان انجام شود. در نتیجه آماده‌سازی نمونه اغلب مشکل‌ترین و وقت‌گیرترین بخش در طیف‌سنجی مادون قرمز است که می‌تواند به‌طور چشمگیری بر روی کیفیت طیف‌ها تأثیر بگذارد.

نمونه جامد: طیف جامداتی که در یک حلال شفاف نسبت به مادون قرمز حل نمی‌شوند، غالباً با پاشیدن آن در یک ماتریس مایع یا جامد به دست می‌آید. اگر از ماتریس جامد استفاده شود، فرایند قرص‌سازی^۳ خواهد بود و در صورت استفاده از ماتریس مایع، مل^۴ به وجود خواهد آمد. این روش‌ها یک شرط اساسی دارند و آن‌هم این است که اندازه ذرات جامد مورد بررسی باید از طول موج تابش مادون قرمز کوچک‌تر باشد تا از اتلاف تابش در اثر پراکندگی جلوگیری شود [۱].

برای بررسی نمونه‌های پودری با روش قرص‌سازی معمولاً پودر ماده موردنظر را با پودر نمک برمید پتاسیم در هاون مخلوط می‌کنند. سپس مخلوط دو پودر را درون یک قالب ریخته و تحت خلأ نسبی با استفاده از یک پرس به شکل قرص با ابعاد مشخص تهیه می‌شود. قالب نمونه‌ی قرص تهیه‌شده درون دستگاه قرار می‌گیرد و ارزیابی می‌شود؛ بنابراین تبدیل نمونه‌های جامد به قرص مسیر مناسبی جهت آنالیز این نوع نمونه‌ها است.

مایعات و محلول‌ها: همان‌طور که اشاره شد، اکثر ترکیبات در محدوده مادون قرمز دارای جذب هستند، لذا یافتن یک حلال مناسب که در کل محدوده مادون قرمز شفاف باشد و جذبی از خود نشان ندهد، تقریباً امری غیرممکن است و از یک حلال

^۱ Selectivity

^۲ Dispersion

^۳ Pelleting

^۴ Mull

خاص فقط می‌توان در یک محدوده خاص از ناحیه مادون قرمز استفاده کرد. متداول‌ترین پنجره‌ها، پنجره‌هایی از جنس هالید های فلزات قلیایی مثل سدیم کلرید (NaCl) و پتاسیم برمید (KBr) می‌باشند که به رطوبت بسیار حساس هستند. به همین دلیل باید دقت کرد که حلال‌های مورد استفاده کاملاً خشک و عاری از آب باشند.

بعضی نمونه‌های مایع نیاز به آماده‌سازی خاصی ندارد و مایع درون سل دستگاه اسپکتروسکوپی ریخته می‌شود. برای طیف گرفتن از یک مایع خالص و بدون رقیق‌سازی عموماً یک قطره از آن را بین دو قرص با جنس مناسب ریخته و به صورت یک فیلم نازک درمی‌آورند و سپس اقدام به گرفتن طیف می‌نمایند. این روش برای محلول‌ها هم قابل کاربرد است، ولی عموماً از سلول‌های خاصی استفاده می‌شود. این سلول‌ها قابلیت باز و بسته شدن دارند و پنجره‌های آن‌ها نیز از جنس هالید فلزی است و طبق قانون بیر-لامبرت برای افزایش میزان جذب نمونه می‌توان با استفاده از فضا گیر طول مسیر عبور نور از نمونه را افزایش داد.

گازها: طیف یک مایع فرار یا یک گاز را می‌توان با تزریق آن به درون یک سلول تخلیه‌شده از هوا به دست آورد. برای این منظور سلول‌های مختلفی با طول مسیر چند سانتی‌متر تا چند متر در دسترس می‌باشند. شرکت‌های تولیدکننده دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز بالون‌هایی برای آنالیز نمونه‌های گازی شکل تهیه نموده‌اند که شیرهایی برای کنترل ورود و خروج گاز در این بالون‌ها تعبیه شده است. برای ایجاد طول مسیرهای بلندتر، سطح درونی سلول را به صورتی می‌سازند که بتواند نور را بازتاب کند تا نور قبل از خروج از سلول چندین بار از درون نمونه عبور کند.

۱-۳. کاربرد کیفی در دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوری

در طیف‌سنجی مادون قرمز هر گروه شیمیایی مشروط بر اینکه خیلی تحت تأثیر عوامل مجاور قرار نگرفته باشد در محل معینی جذب نشان می‌دهد. بنابراین در مطالعه ساختمان شیمیایی یک جسم می‌توان پیش‌بینی کرد که در طیف مادون قرمز چه نوارهای جذبی باید وجود داشته باشد. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از طیف مادون قرمز اثبات یکسان بودن دو جسم است، زیرا دو جسم یکسان طیف مادون قرمز آن‌ها یکسان است. از طیف مادون قرمز یک جسم ناشناس می‌توان گروه‌های مختلف موجود در آن و موقعیت آن‌ها را به دست آورد. جدول ۱ نواحی عدد موجی برای کروموفورهای مهم در مادون قرمز را نشان می‌دهد که جهت تعیین ساختار مولکول‌ها قابل استفاده است.

جدول ۱- جذب کروموفورهای مهم در مادون قرمز

کروموفور	ترکیب	عدد موجی (Cm^{-1})	شدت
-C-H	آلکان ها	۳۰۰۰-۲۸۵۰	متوسط، قوی
-C=C	آلکن ها	۱۶۸۰-۱۶۰۰	ضعیف تا متوسط
-C $\equiv$ C	آلکین ها	۲۳۰۰-۲۱۰۰	ضعیف تا متوسط
-C $\equiv$ N	نیتریل ها	حدوداً ۲۲۵۰	متوسط تا قوی
-N=C=O	ایزو سیانات ها	حدوداً ۲۲۷۰	متوسط تا قوی
-N=C=S	ایزوتیوسیانات ها	حدوداً ۲۲۵۰ (پهن)	متوسط تا قوی
C=C=C	آلن ها	حدوداً ۱۹۵۰	ضعیف تا متوسط
	کتن ها	۱۷۲۵-۱۷۰۰	
	آلدئید	۱۷۱۵-۱۶۶۰	
	سیکلوپنتانون	۱۷۵۰-۱۷۴۰	قوی
	سیکلو بوتانون	۱۷۸۰-۱۷۶۰	
-C=O	اسیدهای کربوکسیلیک	۱۷۲۵-۱۷۰۰	
	استرها	۱۷۵۰-۱۷۳۵	
	آمیدها	۱۶۹۰-۱۶۳۰	
	الکل ها		متوسط
-O-H	آزاد	۳۶۰۰	
	با پیوند هیدروژنی	۳۴۰۰-۳۲۰۰	
-N-H	آمین ها و آمیدها	۳۵۰۰-۳۳۰۰	متوسط
-S-H	مرکاپتان ها	۲۵۵۰	متوسط
NO $_2$	نیترو	۱۶۵۰-۱۵۰۰	قوی
Cl $^-$	کلریدها	۷۸۰-۵۸۰	قوی
Br $^-$	برمیدها	۸۰۰-۵۶۰	قوی

منابع:

[۱] B.C. Smith, Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, CRC Press, ۱۹۹۶.
<https://olin.tind.io/record/۱۲۶۰۷۹/> accessed

فصل دوم

راهنمای تعیین مواجهه تنفسی با میست روغن‌های معدنی

دستورالعمل کاربردی و رهنمودهای آزمایشگاهی-تخصصی در اجرای روش
NIOSH ۵۰۲۶

۱- مقدمه

مایعات فلزکاری^۱ (MWFs) مخلوط پیچیده‌ای از مواد شیمیایی هستند که در طیف وسیعی از فرایندهای ماشین‌کاری، سایش، فلزکاری، برشکاری و شکل‌دهی فلزات استفاده می‌شوند. از کاربردهای آن می‌توان به روان‌کنندگی (کاهش اصطکاک و فرسایش)، تمیزکاری، خنک‌کنندگی، بازدارندگی در برابر خوردگی، زنگ‌زدگی و دور کردن تراشه‌ها اشاره کرد [۱]. به‌طور کلی مایعات فلزکاری با توجه به مقدار و نوع محتویات آن‌ها به چهار دسته روغن‌های خالص، محلول، نیمه سنتتیک و سنتتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. این مایعات در دو گروه: ۱- بر پایه روغن، شامل روغن خالص و محلول حاوی روغن معدنی و ۲- بر پایه آب شامل روغن‌های محلول، نیمه سنتتیک و سنتتیک. برخی ترکیبات این روغن‌ها باهم دارای همپوشانی بوده و حاوی مواد افزودنی متنوعی می‌باشند [۲].

عموماً روغن‌های معدنی شامل هیدروکربن‌های آلیفاتیک و ترکیبات آلی از قبیل آلکیل بنزن، ترکیبات حلقوی آروماتیک، استرها، فنول‌ها، ترپن، اسیدهای کربوکسیلیک، استرهای فسفات و اترهای گلیکول می‌باشند، افزودنی‌های دیگر همچون ترکیبات نیتروژن‌آمین، تری اتانل آمین، دی اتانول آمین و مشتقات آلکانول آمین برای ممانعت از خوردگی به روغن‌ها افزوده می‌شوند [۳]. موسسه ملی بهداشت و ایمنی کشور آمریکا^۲ تخمین می‌زند ۱/۲ میلیون نفر در ایالات متحده پتانسیل مواجهه با روغن‌های خالص و تعداد بیشتری با مایعات محلول در آب رادارند. مواجهه پوستی ناشی از تماس با روغن، قطعه کار، ابزار یا پاشش مایعات به‌صورت درمانیت‌های آلرژیک، محرک (بثورات پوستی) و آکنه گزارش شده است [۴].

آئروسول‌های روغن معدنی توسط مکانیسم‌های مختلفی از جمله هوادهی، تماس با یک سطح به‌سرعت در حال حرکت یا به‌وسیله حرارت تولید می‌شوند که زمینه‌ساز مواجهه تنفسی هستند و عوارضی همچون سرفه، خلط، خس‌خس، رینیت، برونشیت مزمن، اختلال حاد عملکرد ریه، افزایش حساسیت، پنومونی و تنگی نفس ایجاد می‌کنند [۵].

در مطالعات سرطان‌زایی، روغن‌های معدنی به دو دسته تصفیه‌شده (روغن‌های تمیز که به‌موقع جایگزین می‌شوند) و تصفیه نشده تقسیم‌بندی می‌شوند. آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان^۳ روغن‌های معدنی تصفیه نشده را به‌عنوان گروه یک سرطان‌زا (سرطان‌زا برای انسان) مطرح کرده است [۶]. انجمن مهندسين بهداشت صنعتی آمریکا^۴ نیز در دسته‌بندی سرطان‌زایی مواد، روغن‌های تصفیه‌شده را در رده A^۴ (غیرقابل طبقه‌بندی به‌عنوان یک عامل سرطان‌زای انسانی) و روغن‌های تصفیه نشده را در رده A^۲ (مشکوک به سرطان‌زایی در انسان) قرار داده است.

^۱ Metalworking Fluid^۲ National institute for occupational safety & health-NIOSH^۳ International agency for research on cancer-IARC^۴ American conference of governmental industrial hygienists-ACGIH

موسسه‌ی ملی بهداشت و ایمنی کشور آمریکا حد مجاز تماس شغلی میست روغن را برابر با 5 mg/m^3 و حد تماس کوتاه‌مدت را برابر 10 mg/m^3 اعلام کرده است. این در حالی است که انجمن مهندسين بهداشت صنعتی امریکا با توجه به افزایش اطلاعات اپیدمیولوژی و علمی پیرامون اثرات بالقوه سرطان‌زایی، برای روغن‌های معدنی دو استاندارد تماس شغلی برای ارزشیابی مواجهه کارگران توصیه کرده است، این سازمان حد 5 mg/m^3 را برای روغن‌های تصفیه‌شده مطرح کرده است، ولی با توجه به مظنون بودن روغن‌های تصفیه نشده به سرطان‌زایی عنوان کرده است که میزان تماس با روغن‌های تصفیه نشده باید تا حد امکان کنترل شود.

۲-اهداف

هدف از تهیه این راهنما، آشنایی کارشناسان بهداشت حرفه‌ای با روش اندازه‌گیری و آنالیز میست روغن توسط دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۱ است.

۳-اصطلاحات و تعاریف

طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه^۲: یک روش آنالیز آزمایشگاهی برای مواد شیمیایی طیف‌سنجی مادون قرمز است. در دستگاه FT-IR مسیر حرکت نور به گونه‌ای است که نمودار شدت نسبت به زمان تولید می‌شود. یک عمل ریاضی که تبدیل فوریه خوانده می‌شود، قادر است فرکانس‌های جذبی منفرد را جدا نموده و طیف شدت زمان را به طیف شدت فرکانس تبدیل نماید.

روغن معدنی^۳: ترکیباتی با فرمول $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, $n \geq 16$ می‌باشند که در مایعات فلزکاری بر پایه روغن وجود داشته و انواع روغن‌های برش، کشش، موتور، هیدرولیک، ماشین و ترانسفورماتور را دربرمی‌گیرند. این روغن‌ها به دو صورت تصفیه شده و تصفیه نشده مورد استفاده قرار می‌گیرند. روغن‌های معدنی تصفیه نشده در دسته مواد سرطان‌زای انسانی از سوی آژانس بین‌المللی تحقیقات بر سرطان قرار دارند.

روغن خالص (مستقیم)^۴: یکی از انواع روغن‌های روان کننده فلزکاری، روغن‌های خالص نامحلول در آب است. این روغن‌ها بیشتر در فرایندهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که نیاز به روان کنندگی به جای خنک‌کنندگی دارند. در لغت‌نامه‌ی ایمنی و

^۱ Fourier Transform Infrared Spectroscopy-FTIR

^۲ Fourier transform- infrared spectroscopy

^۳ Mineral Oil

^۴ Straight Oil

بهداشت کار، پارافین، روغن‌های معدنی، گوگرد، روغن‌های کلرینه شده، روغن‌های سولفوکلرینه و آنتی باکتری‌ها از ترکیبات این نوع روغن عنوان شده است. این ترکیب دارای درصد بسیار بالایی از روغن معدنی است.

روغن محلول^۱: این ترکیبات امولسیون آبی با مقدار روغن بالا هستند. در لغت‌نامه‌ی ایمنی و بهداشت کار، روغن‌های معدنی، مواد امولسیون کننده، و آنتی باکتری‌ها، بازدارنده‌های خوردگی، افزودنی‌های با فشار زیاد، مواد ضد کف، خنک‌کننده‌های آبی از ترکیبات این نوع روغن عنوان شده است.

مایعات فلزکاری نیمه سنتتیک^۲: امولسیون آبی با مقدار روغن پایین هستند.

مایعات فلزکاری سنتتیک^۳: محلول‌های شیمیایی از ترکیبات آلی و نمک‌های معدنی در آب، بدون هیچ‌گونه روغن هستند.

طول موج^۴: عبارت است از فاصله‌ی بین دو قله مجاور در باریکه تابش که به‌طور گسترده در طیف بینی (برحسب میکرومتر یا نانومتر) استفاده می‌شود.

عدد موجی^۵: (تعداد امواج در فاصله واحد) یک اشعه الکترومغناطیسی، عکس طول‌موج آن اشعه برحسب سانتی‌متر است که با واحد cm^{-1} بیان می‌شود، عدد موجی به‌طور گسترده در طیف‌سنجی اشعه مادون قرمز استفاده می‌شود.

آنتی باکتری^۶: موادی که باعث از بین بردن میکروارگانیسم‌ها می‌گردند.

حد آستانه مجاز^۷: مقداری است که توسط انجمن متخصصان دولتی بهداشت حرفه‌ای امریکا تعیین شده‌اند. باور بر این است در صورت مواجهه روزانه کارگر با این مقادیر از مواد شیمیایی در طول عمر کاری هیچ‌گونه اثر زیان‌آور قابل تشخیصی بر سلامت شخص ایجاد نخواهد شد.

صحت^۸: نزدیکی نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با مقادیر واقعی ماده‌ی مدنظر است.

دقت^۹: نزدیکی نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های تکراری برای یک ماده است.

^۱ Soluble Oil

^۲ Semi-Synthetic Fluids

^۳ Synthetic Fluids

^۴ Wave length

^۵ Wave Number

^۶ Biocide

^۷ Threshold limit value -TLV

^۸ Accuracy

^۹ Precision

۴- روغن‌های معدنی

۴-۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی

ترکیبات متنوعی در مایعات فلزکاری وجود دارد اما به‌طور کلی، آن‌ها را با توجه به میزان روغن‌های معدنی طبقه‌بندی کرده‌اند. در اکثر موارد، برگه اطلاعات ایمنی مواد^۱ برای بسیاری از اجزای متشکله مایعات فلزکاری گزارش نشده است. مایعات خالص از روغن‌های معدنی و افزودنی‌های آلی تشکیل می‌شوند، مایعات محلول در آب تا ۸۰ درصد از روغن‌های معدنی و عوامل امولسیون‌ی تشکیل شده‌اند. درصد روغن‌های معدنی در مایعات نیمه سنتتیک حدود ۳۰-۵۰ درصد است، لازم به ذکر است مایعات سنتتیک به‌کاربرده شده به‌عنوان روان‌کننده‌های صنعتی حاوی روغن معدنی نیستند. این روغن‌ها در یک طبقه‌بندی دیگر، به دو صورت فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند، روغن‌های فعال به‌عنوان روان‌کننده بکار برده می‌شوند و در دماهای بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه فارنهایت از آن‌ها استفاده می‌گردد، همچنین روغن‌های غیرفعال به‌عنوان چرب‌کننده و در دماهای بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه فارنهایت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

روغن‌های معدنی (خالص و انحلال‌ناپذیر در آب) ترکیباتی با وزن مولکولی متفاوت و جرم مخصوصی در حدود ۰/۹ می‌باشند. نقطه‌جوش این ترکیبات در حدود ۳۶۰ سانتی‌گراد و نقطه اشتعال آن‌ها در حدود ۱۹۳ درجه سانتی‌گراد است. دانسیته روغن‌های روان‌کننده معدنی در حدود ۰/۸۶ تا ۰/۹۸ گرم بر میلی‌لیتر متغیر است [۸].

۴-۲. کاربردهای صنعتی و میزان مصرف

مایعات صنعتی به‌طور گسترده و با حجم بسیار بالا در تمام صنایع تولیدی به دلیل خصوصیات خنک‌کنندگی، نرم‌کنندگی و مقاومت در برابر خوردندگی، در فرآیندهایی نظیر سنگ‌زنی فلزات، دریل کاری و آب‌بندی موتورهای بکار می‌روند. این مایعات ترکیب پیچیده‌ای از روغن‌های معدنی، پاک‌کننده‌ها، آنتی باکتری‌ها می‌باشند [۹].

به‌منظور دستیابی به میزان روغن روان‌کننده مصرفی در صنعت ماشین‌ابزار، به تنهایی کافی است که به رقم ۲۱ میلیون لیتر در انگلستان توجه شود که میزان مصرف سالانه را در این کشور نشان می‌دهد حجم بالایی از مصرف مایعات فلزکاری در صنایع خودروسازی، ماشین‌آلات سنگین، هوافضا و صنایع هواپیمای غیرنظامی، کشاورزی و صنایع فراساحلی گزارش شده است [۱۰]. مایعات محلول در آب، ترکیبی از ۳۰٪ تا ۸۰٪ از روغن‌های تصفیه‌شده و ماده امولسیون‌کننده برای کمک به پراکنده شدن روغن در آب هستند، این ترکیبات روان‌کننده‌های خوبی هستند و در خنک کردن نسبت به روغن‌های خالص بهتر عمل می‌کنند. مشکلات استفاده از این روغن‌ها ضعف در کنترل خوردگی، آلودگی، احتمال ایجاد دود، اختلاط ضعیف و کاهش تراکم‌پذیری

^۱ material safety data sheet-MSDS

آب نسبت به روغن است. همچنین آب می‌تواند به‌طور مستقیم در فرسایش اجزای ماشین‌آلات تأثیرگذار باشد. از مایعات برش‌کاری به‌عنوان سردکننده و لیز کننده در عملیات تراش فلزها استفاده می‌شود، در این مایعات از روغن‌های دارای ویسکوزیته پایین استفاده می‌گردد [۱۱].

۳-۴. ترکیبات موجود در مایعات فلزکاری

مایعات فلزکاری حاوی فراورده‌های نفتی، چربی‌های حیوانی و گیاهی، مواد امولسیون ساز، عوامل ضدزنگ و سایش، مواد محافظت‌کننده در برابر خوردگی، مواد مقاوم در برابر فشارهای بالا، بافرها، آنتی باکتری‌ها و مواد افزودنی متنوعی برای بهبود مشخصات آن‌ها می‌باشند [۱۲، ۱۳]. اتانول آمین‌ها برای پایداری PH و کنترل خوردگی به مایعات فلزکاری افزوده می‌شوند. در مایعات برش‌کاری می‌توان از آمیزه‌های آبی حاصل از سدیم نیترات، تری اتانول آمین سبکات، پلی گلیکول‌ها استفاده کرد. از روغن‌های روان کار اغلب برای کارهای سنگین استفاده می‌شود. اغلب روغن‌های روان کار، شامل روغن‌های معدنی مشتق شده از نفت خام هستند. استرها، پلی گلیکول‌ها، سیلیکون‌ها، هیدروکربن‌های هالوژن دار و پلی فنیل اترها از مایعات ساخته‌شده‌ای هستند که به‌عنوان روان کارهای ویژه استفاده می‌شوند. روغن‌های استفاده‌شده برای مایعات فلزکاری خالص معمولاً حلال‌های تصفیه‌شده یا کنترل‌شده از نظر مقدار آب هستند، آن‌ها را می‌توان از طریق ظاهر روغنی و ویسکوزیته تشخیص داد، آن‌ها ممکن است حاوی مواد افزودنی سولفور یا کلرینه باشند و برای افزایش عمل خیس‌کنندگی و روان‌کنندگی از روغن‌های معدنی دیگر از جمله روغن‌های حیوانی، دریایی یا با منشأ سنتتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

در هنگام عملیات فلزکاری، حرارت تولیدی و واکنش‌پذیری تراشه‌ها منجر به تجزیه مایعات فلزکاری می‌شود، از نظر شیمیایی ذرات با روغن‌ها واکنش داده و باعث شکسته شدن آن‌ها و تسهیل رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها می‌شوند. باکتری‌ها از امولسیون، روغن‌های معدنی و مواد افزودنی به‌عنوان منبع تغذیه استفاده کرده که این مسئله موجب تجزیه، فساد، کاهش کارایی و میزان انتقال حرارت روان‌کننده می‌شوند [۱۴]. کربن‌های موجود در روغن، اسیدهای چرب و مواد آلی موجود در مایعات فلزکاری به‌عنوان منبع اصلی میکروارگانیسم‌ها شناخته می‌شوند، همچنین آب، هیدروکربن‌ها و نمک‌های معدنی شرایط مناسبی را برای رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها فراهم می‌کنند. نگرانی‌هایی در مورد سرطان‌زا بودن ترکیبات آروماتیکی روغن‌های معدنی وجود دارد، هیدروکربن‌های معطر چند حلقه‌ای^۱ و نیتروز آمین‌ها از سوی سازمان IARC به‌عنوان مؤلفه مشکوک یا شناخته‌شده در مایعات فلزکاری عنوان شده است. بنزوالفاپیرن و مشتقات آلکیل آن در دسته مواد سرطان‌زایی هستند که در روغن‌های معدنی وجود دارند [۱۶].

^۱ Polycyclic aromatic hydrocarbon-PAH

۴-۳-۱. فرمالدئید

به‌طور کلی آلدئیدها، از خاصیت حلالیت در چربی بالایی برخوردار هستند و به‌واسطه‌ی اختلال در عملکرد چربی‌های غشایی و یا به‌واسطه‌ی تخریب ساختار پروتئین‌های غشایی، سمیت خود را در سلول‌ها اعمال می‌کنند. فرمالدئید یک ترکیب حاوی یک کربن است و با ترکیبات شیمیایی دیگر به‌شدت واکنش می‌دهد، همچنین در دامنه غلظتی ۰/۱-۱ ppm بوی خاصی در هوا داراست [۱۷].

فرمالدئید یک ماده خطرناک برای سیستم تنفسی، پوست و چشم‌ها محسوب می‌شود و سمیت آن از طریق استنشاقی، تماس پوستی و بلع ایجاد می‌شود. این ماده در ژوئن سال ۲۰۰۴ از سوی سازمان IARC در گروه مواد سرطان‌زای انسانی (گروه ۱) طبقه‌بندی شده است [۱۸]. مقررات کشور آلمان، استفاده از آنتی باکتری‌های بر پایه فرمالدئید، کلرواسیتامید^۱، فنل و مشتقات آن را محدود کرده است [۱۹]. آنتی باکتری‌ها و فرمالدئید در مایعات برای مقابله با رشد باکتری‌ها استفاده می‌شوند. از جمله آنتی باکتری‌های بر پایه فرمالدئید در مایعات فلزکاری با اثر بازدارندگی در باکتری‌ها می‌توان به ونساید^۲، تریس (هیدرو کسی) نیترومتان^۳، گروتان^۴ و بیوبان^۵ اشاره کرد [۲۰]. بخارهای فرمالدئید از طریق پوست، دهان و تنفسی جذب شده و به‌سرعت توسط فرمالدئید دهیدروژناز موجود در کبد و اریتروسیت‌ها متابولیزه می‌شود، متابولیت آن اسید فرمیک بوده که توسط جریان خون به اکثر نقاط بدن منتقل می‌شود. همچنین فرمالدئید یک عامل ایجاد کپیر تماسی آلرژیک است [۲۱].

۴-۳-۲. نیتروز آمین‌ها

تشکیل دی اتانول نیتروز آمین در مایعات برش‌کاری برای اولین بار توسط زینمارک و راپه در سوئد مطرح شد. نتایج فاینز در سال ۱۹۷۶ تأییدی بر نگرانی‌های مطرح شده از سوی این دو محقق بود، نتایج یافته‌های وی با توجه به میزان این ماده در مایعات برش‌کاری نشان‌دهنده مواجهه مداوم اپراتورهای دستگاه با نیتروز آمین‌ها بود، این ماده می‌تواند در مایعات محلول در آب استفاده شود.

N-نیتروز و دی متیل آمین^۶ با فرمول مولکولی $(CH_3)_2NNO$ به‌صورت مایع روغنی زرد با وزن مولکولی ۷۴/۱ و قابلیت انحلال‌پذیری است. این ماده به‌عنوان یک افزودنی در روغن‌های روان‌ساز کاربرد دارد [۲۲].

^۱ Chloroacetamide^۲ Vancide^۳ Tris hydroxy nitromethane^۴ Grotan^۵ Bioban^۶ N-Nitrosodimethylamine

۴-۴. عوارض ناشی از روغن‌های معدنی

منابع علمی فراوانی وجود دارد که نشان می‌دهد تماس با مایعات ماشین‌کاری منجر به انواع سرطان‌های دستگاه تنفسی و گوارشی و بیماری‌های غیر توموری (آسم شغلی) می‌گردند. مدیریت دولتی ایمنی بهداشت کشور آمریکا^۱ مدارکی مبنی بر کاهش سطح سلامتی حتی در شرایط تماس کمتر از حد با بخارات روغن در هوای تنفسی گزارش نموده است. لذا به منظور حفاظت کارکنان، تدوین استاندارد جدید برای مواجهه با بخارات روغن را پیشنهاد نموده است [۱۱]. در مطالعات بیماری‌هایی از قبیل درماتیت‌ها، جوش‌های پوستی، درمانیت‌های آلرژیک، تومورهای خوش‌خیم و بدخیم کیسه بیضه، علائم مربوط به بیماری‌های سیستم تنفسی، اختلالات بینی، اختلالات و تومورهای مخاط بینی، سرطان حنجره، برونشیت، فیبروز ریه، سرطان ریه و آسم در اثر تماس با بخارات روغن مشاهده شده و احتمال بروز برخی موارد دیگر از سرطان‌ها و ایجاد تغییرات کروموزومی نیز گزارش شده است. مدارک به دست آمده از مطالعات کلینیکی در مراکز خدماتی آمریکا و انگلیس، آسم شغلی ناشی از تماس با مایعات صنعتی را بیان می‌کند [۴].

تلاش‌های زیادی برای محافظت افراد در برابر میست روغن‌های روان کننده با قطر در حدود ۱ تا ۴ میکرون صورت گرفته است. این ذرات می‌توانند به حفره‌های دستگاه تنفسی و ریه‌ها رسوخ نمایند. روغن‌های سنگین تمایل به بستن راه منافذ پوست به‌ویژه پوست صورت، سینه، بازوها و ران‌ها را دارند، تورم منافذ در این حالت رخ می‌دهد و همچنین می‌تواند منجر به تشکیل جوش و آکنه شود. مطالعات اولیه در جهت آثار خطرناک روغن‌های معدنی بر روی پوست حیوانات در سال ۱۹۱۵ انجام شد که بیشتر آن‌ها بر روی قطران زغال‌سنگ و روغن‌های سیاه معدنی صورت گرفته است. روان کننده‌هایی که در صنعت پنبه‌پاک‌کنی انگلیس مورد استفاده قرار گرفتند، اغلب از روغن سیاه معدنی تهیه شده بودند و موارد سرطان در افراد مواجهه یافته با روغن گزارش شده است. مجاورت دائم با روغن‌های سنگین می‌تواند تولید زگیل‌هایی روی بازو، پشت دستان و بیضه نماید. گرچه این موارد زیاد مشاهده نشده است، اما آن‌ها پیش درآمدی برای سرطان بوده و در صورتی که درمان نشوند، می‌توانند به دیگر اعضای بدن سرایت کنند. در صورتی که روغن‌ها مورد تصفیه قرار بگیرند، از میزان ابتلا به سرطان پوست کاسته خواهد شد [۱۶].

پوست و سیستم تنفسی، دو مسیر اصلی مواجهه با عوامل شیمیایی خطرناک در محیط‌های کاری هستند، ترکیبات قابل انحلال در چربی عموماً نفوذ سریع‌تر و بیشتری در پوست نسبت به ترکیبات محلول در آب دارند، آکنه یک بیماری التهابی غدد چربی پوست است، در این بیماری فولیکول‌هایی که غدد چربی به آن‌ها متصل است، به واسطه کراتین مسدود شده و غدد چربی متورم می‌شوند. مواجهه و تماس با روغن‌های روان کننده و بخارهای آن با انسداد فولیکول‌ها و بروز آکنه روغنی در ارتباط است. این

^۱ Occupational Safety And Health Administration-OSHA

نوع آکنه در نواحی از پوست که در تماس با روغن‌های معدنی است مشاهده شده و مکانیسم آن کراتینه شدن فولیکول‌ها به دنبال انسداد کانال است [۱۷].

روغن‌های معدنی، در ابتدا روغن‌های تمیزی هستند که در شرایط کار، اکسایش و آلوده شده و به تدریج کارایی خود را از دست می‌دهند و پس از استفاده در فرایندهای صنعتی به دلایل اقتصادی به صورت روغن‌های کارکرده با تصفیه ضعیف دوباره بازیافت یا مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند، همچنین ترکیبات روغن کارکرده به مایعات فلزکاری افزوده می‌شوند. این اقدام در حالی صورت می‌گیرد که روغن‌های معدنی تصفیه نشده از سوی سازمان‌های IARC و ACGIH در دسته روغن‌های سرطان‌زا و مشکوک به سرطان‌زایی در انسان قرار گرفته‌اند [۶، ۲۳]. به طور کلی چندین مؤلفه مشکوک یا شناخته شده سرطان‌زا در ترکیبات مایعات فلزکاری وجود دارد که از جمله آن‌ها هیدروکربن‌های معطر چند حلقه‌ای PAHs و همچنین نیتروزآمین‌ها است [۲۴]. روغن‌های معدنی حاوی مقادیر کمی از PAH هستند، اما استفاده از روغن‌های معدنی باعث افزایش مقدار PAH موجود در آن می‌شود، ولی چون PAH در روغن باقی نمی‌ماند، خطر تماس با آن مشخصاً محدود به پوست می‌شود [۱۶]. در جدول ۲ مقادیر حدود مجاز مواجهه با میست‌های روغن توسط جوامع بین‌المللی ارائه شده است.

جدول ۲- : مقدار حد مجاز مواجهه با میست‌های روغن توسط سازمان‌های مختلف

سازمان	اقدامات
کنفرانس دولتی متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH)	در حال حاضر دو استاندارد حد تماس شغلی برای ارزشیابی مواجهه کارگران ارائه کرده است. این سازمان در ابتدا پیشنهاد کاهش حد مواجهه شغلی روغن‌های معدنی تا میزان 0.2 mg/m^3 (مبتنی بر اثرات تنفسی) را مطرح کرده بود، اما در سال ۲۰۱۰ مقدار 5 mg/m^3 را برای روغن‌های خالص و تصفیه شده ارائه داد و برای روغن‌های با تصفیه متوسط و ضعیف با توجه مظنون بودن آن‌ها به سرطان‌زایی عنوان کرد که میزان آن‌ها باید تا حد امکان کاهش یابد.
انستیتو ملی ایمنی و بهداشت آمریکا (NIOSH)	مقدار میانگین وزن یافته زمانی ^۱ (TWA) برای میست روغن و روغن‌های معدنی برابر 5 mg/m^3 و مقدار حد مواجهه کوتاه مدت ^۲ STEL برابر 10 mg/m^3 اعلام شده است. میزان حد مجاز تماس شغلی برای ذرات هوابرد توراسپیک برای تمام مایعات فلزکاری 0.4 mg/m^3 عنوان شده است.
اداره ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (OSHA)	حد مجاز ۸ ساعته برای میست روغن و روغن‌های معدنی برابر 5 mg/m^3 اعلام شده است. طی سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۶۴ مقدار حد مواجهه کوتاه مدت (STEL) به میزان 10 mg/m^3 اعلام شده بود. این سازمان در سال ۱۹۹۵ مدارکی مبنی بر کاهش

^۱ Time-Weighted Average-TWA

^۲ Short-Term Exposure Limit-STEL

سازمان	اقدامات
	سطح سلامتی در شرایط تماس کمتر از حد استاندارد مجاز شغلی با بخارهای روغن در هوای تنفسی گزارش نموده است.
کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای ایران	حد مواجهه برای روغن‌های معدنی به‌استثناء سیالات فلزکاری با تصفیه خوب مقدار میانگین وزن یافته زمانی 5 mg/m^3 با نماد A^4 بر مبنای تحریک قسمت فوقانی تنفسی تعیین شده است، این در حالی است که برای روغن‌های معدنی با تصفیه متوسط و ضعیف با نماد A^2 و بر مبنای تنفسی حد مجازی مشخص نشده است.

۵- اندازه‌گیری میست روغن‌های معدنی با روش ۵۰۲۶ NIOSH

یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها در آنالیز میست روغن‌های معدنی توسط سازمان NIOSH آمریکا به شماره ۵۰۲۶ مطرح شده است که اولین نسخه آن در آگوست سال ۱۹۸۷ و دومین نسخه آن از می سال ۱۹۹۶ تاکنون استفاده شده است. روش NIOSH ۵۰۲۶ به‌صورت اختصاصی برای آنالیز میست روغن معدنی استفاده می‌شود و امکان تعیین انواع میست روغن معدنی سفید یا مواد نفتی قابل حل در آب با پایه روغن، روغن برش، روغن کشش، روغن موتور، روغن‌های دافع گرما، روغن‌های هیدرولیک، روغن ماشین، روغن ترانسفورماتور و میست روغن معدنی حل شده در تری کلرو تری فلوئورواتان را فراهم می‌نماید. بر اساس روش ۵۰۲۶ NIOSH روغن‌های معدنی بر روی فیلتر غشایی توسط پمپ نمونه‌بردار با نرخ نمونه‌برداری ۱ تا ۳ لیتر در دقیقه جمع‌آوری و توسط کربن تترا کلرید استخراج می‌شود (جدول ۳).

پس از آن نمونه‌ها به‌صورت کمی با مقایسه جذب در دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز برای عدد موجی در دامنه $2700 - \text{cm}^{-1}$ و با یک سری نمونه‌های استاندارد تهیه شده از یک نمونه بالک آنالیز می‌شوند.

دامنه خطی غلظت مطرح شده توسط سازمان NIOSH برابر $11/7 - 2/5 \text{ mg/m}^3$ با حجم نمونه‌برداری حداقل ۲۰ لیتر و حداکثر ۵۰۰ لیتر می‌باشد. دقت و درصد خطای نسبی اعتباربخشی شده نیز به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۱۱/۸٪ اعلام شده است.

جدول ۳ - روش میست روغن معدنی NIOSH ۵۰۲۶

روش میست روغن معدنی ۵۰۲۶	
RTECS: PY۸۰۳۰۰۰۰ CAS= ۸۰۱۲-۹۵-۱ نامشخص $n \geq 16$ وزن مولکولی: C_nH_{2n+2} زمانی که $n \geq 16$	
متد: ۵۰۲۶، شماره ۲ ارزیابی: کامل شماره ۱: ۱۵ اوت ۱۹۸۷ شماره بازنگری ۱۵: ۲ مه ۱۹۹۶	
ویژگی: دانسیته مایع: ۰/۸ تا ۰/۹ گرم در میلی لیتر در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد؛ نقطه جوش: ۳۶۰ درجه سانتی گراد، فشار بخار: جزئی	mg/m^3 ۵ = OSHA mg/m^3 ۱۰ STEL, mg/m^3 ۵ = NIOSH mg/m^3 ۵ = ACGIH
اسامی مترادف: میست های هوابرد روغن های معدنی سفید، روغن های برش بر پایه مواد نفتی نامحلول در آب، روغن روان کننده، روغن برش، روغن کشش، روغن موتور، روغن تصفیه کننده حرارتی، روغن هیدرولیکی، روغن ماشین، روغن انتقال دهنده	
اندازه گیری	نمونه برداری
روش آنالیز: اسپکترو فتومتر مادون قرمز	نمونه بردار: فیلتر غشایی (با قطر ۳۷ میلی متری
ماده مورد تجزیه: روغن معدنی	MCE با خلل و فرج ۰/۸ میکرون، PVC با خلل و
استخراج نمونه: ۱۰ میلی متر لیتر تتراکلرید کربن	فرج ۵ میکرون، PTEF با خلل و فرج ۲ میکرون یا
محدوده عدد موجی IR: ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ cm^{-1} در مقابل کربن	فایبرگلاس)
تتراکلراید شاهد	دبی: ۱ تا ۳ لیتر در دقیقه
کالیبراسیون: محلول استاندارد روغن معدنی در تتراکلرید کربن	حداقل حجم نمونه برداری: ۲۰ لیتر در ۵ میلی گرم بر
میزان نمونه: ۰/۱ تا ۲/۵ میلی گرم در نمونه	مترمکعب
LOD تخمینی: ۰/۰۵ میلی گرم در نمونه	ماکزیمم حجم نمونه برداری: ۵۰۰ لیتر
دقت (S_r): ۰/۰۵	حمل و نگهداری: معمولی
	ثبات نمونه: ثابت
	نمونه شاهد: ۱۰-۲ نمونه شاهد در هر سری
	نمونه برداری
صحت	
رنج مطالعه شده: ۲/۵ تا ۱۱/۷ میلی گرم بر مترمکعب	
در ۱۰۰ لیتر نمونه	
تورش (بایاس): ۰/۸۴ - %	
دقت کلی (S_{RT}): ۰/۰۶۵	
دقت: ۱۱/۸ $\pm$ %	
کاربرد: رنج کاری ۱ تا ۲۰ میلی گرم بر مترمکعب به ازای ۱۰۰ لیتر نمونه هوا است. این روش برای تمام میست های روغنی محلول در تری کلرو فلوئوراتان به جز روغن های برش نیمه مصنوعی یا مصنوعی می باشد.	
تداخلات: هر آئروسلی که (مثل دود تنباکو) جذب مادون قرمز در محدوده عدد موجی ۲۹۵۰ در سانتی متر داشته باشد تداخل ایجاد می کند.	

روش میست روغن معدنی ۵۰۲۶

روش‌های دیگر: این متد روش P&CAM^{۲۸۳} را اصلاح کرده است. روش P&CAM^{۱۵۹} و S^{۲۷۲} به‌طور مشابهی برای اندازه‌گیری به‌وسیله اسپکتروفتومتر فلئورسانس استفاده می‌شود. این روش‌ها به دلیل کاربرد محدود موردبازنگری قرار نگرفته‌اند (مثلاً همه روغن‌های معدنی حاوی اجزای فلورسنت نیستند و سایر ترکیبات فلورسنت دخالت می‌کنند). آنالیز مادون قرمز بر این محدودیت‌ها غلبه می‌کند.

معرف‌ها	وسایل موردنیاز
۱. تتراکلرید کربن (CCL _۴)	۱) نمونه‌بردار: فیلتر غشایی ۳۷ میلی‌متری، MCE با خلل و فرج ۰/۸ میکرون، PVC با خلل و فرج ۵ میکرون، PTFE با خلل و فرج ۲ میکرون یا فیلتر فایبرگلاس، همراه با پد پشتیبان سلولزی در کاست فیلتر دو قطعه
۲. محلول استاندارد مادر روغن‌های معدنی ۲۰ mg/ml با ریختن ۱ گرم روغن جامد در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری و به حجم رساندن آن با تتراکلرید کربن تهیه می‌گردد.	نکته ۱- غلظت بالای میست روغن در محیط می‌تواند باعث مسدود شدن فیلترهای غشایی گردد. فیلتر فایبرگلاس از نظر ظرفیت و مقاومت بر فیلترهای غشایی ارجحیت دارد.
	نکته ۲- به‌منظور جلوگیری از آلودگی فیلترها با چربی پوست، فیلتر را با پنس بردارید.
	۲) پمپ نمونه‌برداری فردی با دبی ۱ تا ۳ لیتر در دقیقه همراه با لوله رابط قابل انعطاف.
	۳) اسپکتروفتومتر مادون قرمز دو پرتو با توانایی اسکن در cm ^{-۱} ۲۷۰۰-۳۲۰۰، با دو سل اسپکتروفتومتر ۱۰ میلی‌متری، کوارتز مادون قرمز با متوقف کننده PTFE در هولدرهای سل.
	نکته: به جای سل کوارتز مادون قرمز می‌توان از سل شیشه‌ای استاندارد استفاده کرد.
	۴) ظرف ویال ۲۰ میلی‌متر با ورقه فویل یا سرپوش PTFE
	۵) بالن ژوژه ۱۰، ۲۵، ۵۰ میلی‌لیتری
	۶) پی پت ۱۰ ملی لیتری
	۷) پی پت ۲ تا ۲۵۰ میکرو لیتری
	۸) پنس
	وسایل شیشه‌ای را با تتراکلرید کربن بشوید و خشک کنید.

احتیاط ویژه: تتراکلرید کربن مشکوک به سرطان‌زایی انسان است در زیر هود با آن کار شود.

روش نمونه‌برداری

۱) پمپ نمونه‌برداری فردی در شرایطی که نمونه‌گیر به آن متصل است کالیبره می‌گردد.

۲) نمونه‌برداری در دبی ۱ تا ۳ لیتر در دقیقه به‌منظور تهیه حجم هوایی بین ۲۰ تا ۵۰۰ لیتر انجام می‌گیرد.

نکته: غلظت بالای روغن می‌تواند باعث مسدود شدن فیلتر شود که در نتیجه آن افت فشار ایجاد می‌گردد. در صورتی که در نمونه‌برداری این مشکل به وجود آمد عمل نمونه‌برداری بایستی خاتمه یابد.

روش میست روغن معدنی ۵۰۲۶

۳) ۵ تا ۱۰ میلی‌لیتر روغن معدنی تصفیه‌شده رقیق نشده را در ویال جمع‌آوری نمایید و همراه با نمونه‌ها جهت آماده‌سازی استاندارد ارسال نمایید

۴) آماده‌سازی نمونه

۵) با پنس فیلترهای نمونه و شاهد را در ظرف ویال قرار داده و ۱۰ میلی‌لیتر تتراکلرید کربن به آن اضافه کرده، درب آن را پوشانده و خوب تکان دهید.

کالیبراسیون و کنترل کیفیت

۶) کالیبراسیون روزانه را با حداقل ۶ استاندارد کاری انجام دهید.

- a. با اضافه کردن مقادیر معین از محلول استاندارد مادر به چندین بالن ژوژه ۱۰ میلی‌لیتری و رساندن آن‌ها به حجم CCL₄ محلول‌های استاندارد کاربردی در رنج غلظتی ۵ تا ۲۵۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر تهیه گردد.
- b. نمونه‌های استاندارد و شاهد را آنالیز کنید (مرحله ۸).
- c. با توجه به مقادیر جذب، منحنی استاندارد رسم می‌گردد (میزان جذب نمونه در مقابل میکروگرم روغن معدنی ترسیم می‌گردد)

۷) مقدار بازیافت (R) را حداقل یک‌بار برای هر تعداد فیلتر استفاده‌شده در نمونه‌برداری برای محدوده‌ی موردنظر به دست آورید. سه فیلتر در هر پنج سطح به همراه سه نمونه شاهد آماده کنید.

- a. مقدار مشخصی از محلول استاندارد روغن معدنی را روی فیلتر بریزید و بگذارید تا حلال تبخیر شود.
 - b. نمونه‌ها شب در کاست فیلتر نگهداری شود.
 - c. استانداردهای کاری آماده‌سازی و آنالیز گردد.
 - d. منحنی بازیافت نمونه در مقابل میکروگرم روغن معدنی بازیافت شده رسم گردد.
- ۸) سه اسپایک نامشخص و سه اسپایکی که غلظت آن‌ها را می‌دانید آنالیز کنید. تا اطمینان حاصل کنید که منحنی کالیبراسیون و منحنی بازیافت در کنترل هستند.

اندازه‌گیری

۹) محلول‌های استاندارد، شاهد یا محلول‌های اصلی را در رنج جذبی Cm^{-1} ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ در وضعیت جذب اسکن کنید و میزان جذب در بزرگ‌ترین طول موج جذب و نزدیک به Cm^{-1} ۲۹۴۰ را ثبت کنید ($\pm 1/8\%$).

محاسبات

۱۰) جرم روغن‌های معدنی موجود در نمونه‌های اصلی و نمونه شاهد را برحسب میکروگرم با استفاده از معادله‌ی منحنی کالیبراسیون به دست آورید.

۱۱) غلظت روغن‌های معدنی را برحسب حجم هوای نمونه‌برداری شده به دست آورید.

W = مقدار روغن در نمونه اصلی برحسب میکروگرم

B = مقدار روغن در نمونه شاهد برحسب میکروگرم

C = غلظت روغن معدنی برحسب میلی‌گرم برحسب مترمکعب

V = حجم هوای نمونه‌برداری شده برحسب لیتر

$$C = \frac{W - B}{V} \text{ mg/m}^3$$

ارزیابی روش

روش میست روغن معدنی ۵۰۲۶

بخش نمونه‌برداری این روش در محدوده ۲/۵ تا ۱۱/۷ میلی‌گرم بر مترمکعب در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷۵۵ میلی‌متر جیوه با استفاده از نمونه‌های هوای ۱۰۰ لیتری از روغن برش دستگاه و اندازه‌گیری توسط اسپکتروفتومتری فلورسانس ارزیابی شد

از فیلترهای میکس سلولز استر با تخلخل ۰/۸ میکرومتر، برای نمونه‌گیری استفاده شد. دقت کلی ۰/۰۶۵ با متوسط بازیافت ۹۸٪ بود. روش اندازه‌گیری مادون‌قرمز متعاقباً توسط NIOSH ارزیابی شد. دقت و صحت تکنیک‌های اسپکتروفتومتری مادون‌قرمز و فلورسانس مشابه است. در شماره ۱ این روش (مورخ ۱۹۸۷/۸/۱۵) از فزون ۱۱۳ به‌عنوان حلال استفاده شده است. با این حال، از آنجاکه فزون‌ها به‌عنوان عامل کاهش‌دهنده ازن جوی شناخته شده‌اند، دوباره تتراکلرید کربن مورد استفاده قرار گرفت، اگرچه یک ماده مشکوک به سرطان‌زای انسانی است. فیلترهای PTFE همچنین می‌توانند برای نمونه‌برداری از میست‌های روغن استفاده شوند.

۵-۱. مراحل اندازه‌گیری میست روغن‌های معدنی با استفاده از دستگاه FT-IR

۵-۱-۱. مرحله‌ی اول: تهیه نمونه‌های بالک روغن معدنی

قبل از آنالیز نمونه‌ها، باید محلول‌های استاندارد از روغن‌های معدنی تهیه و منحنی خط کالیبراسیون برای نمونه‌های استاندارد رسم گردد. برای تهیه محلول‌ها به نمونه بالک از روغن‌های معدنی نیاز است. در مرحله اول ۱۰ میلی‌لیتر روغن معدنی از صنعت مدنظر تهیه می‌گردد و در ویال‌های شیشه‌ای تمیز برای تهیه استانداردهای موردنیاز به‌کاربرده می‌شود.

۵-۱-۲. مرحله‌ی دوم: بررسی دانسیته

دانسیته بیانگر جرم در واحد حجم ماده می‌باشد که واحد استاندارد آن برابر کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m^3) است، اما معمولاً به‌صورت گرم بر میلی‌لیتر g/ml گزارش می‌شود، با توجه به اینکه این مقدار برای هر نوع روغن معدنی متفاوت می‌باشد بنابراین لازم است مقدار دانسیته روغن معدنی به دست آید. جهت به دست آوردن دانسیته روغن معدنی ابتدا لازم است ذرات احتمالی موجود در روغن‌های معدنی توسط سانتریفیوژ (به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ rpm) ته‌نشین گردد. یک ویال پلاستیکی بر روی ترازوی حساس الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم گذاشته و وزن آن صفر شود. در مرحله‌ی بعد ۱ میلی‌لیتر از روغن معدنی درون ویال ریخته و توزین گردد. عدد خوانده‌شده بر روی ترازو برحسب میلی‌گرم همان چگالی روغن برحسب میلی‌گرم بر میلی‌لیتر می‌باشد.

۵-۱-۳. مرحله‌ی سوم: تهیه محلول استاندارد مادر

از آنجایی که استفاده از روغن‌های معدنی متنوع در صنعت مدنظر می‌باشد، برای رسم منحنی استاندارد در هر نمونه‌ی روغن، باید از همان روغن تصفیه‌شده در صنعت استفاده نمود. برای این منظور محلول استاندارد مادر با غلظت ۱۰ mg/ml و جهت ساخت محلول‌های استاندارد کاربردی مدنظر می‌باشد. اگر فرض کنیم دانسیته روغن ۰/۹۵۶ g/ml است، میزان حجم موردنیاز جهت ساخت محلول استاندارد مادر در یک بالن ژوژه ۱۰ میلی‌لیتری به شرح ذیل می‌باشد.

$$\text{حجم روغن معدنی} = 10 \text{ mg oil/ml CCl}_4 \times 10 \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ oil}}{0.956 \text{ g oil}} = 0.1 \text{ ml oil/ml CCl}_4$$

بنابراین جهت ساخت محلول استاندارد مادر با غلظت ۱۰ mg/ml ابتدا ۰/۱ میلی‌لیتر (۱۰۰ میکرو لیتر) روغن معدنی را در یک بالن ژوژه ۱۰ میلی‌لیتری ریخته، سپس با کربن تتراکلراید به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده می‌شود.

۵-۱-۴. مرحله ی چهارم: تهیه محلول های استاندارد کاربردی

قبل از تهیه محلول های استاندارد باید به نکات مربوط به نگهداری و ایمنی حلال های مورد استفاده در آزمایش و با دسترسی به برگه اطلاعات ایمنی مواد توجه نمود. در حالت ایده آل، حلال باید تمام نمونه را به سرعت و به طور کامل حل کند، شرایط انحلال نیز باید تا حد امکان به صورتی باشد تا اتلاف آنالیت رخ ندهد. کربن تتراکلراید حلالی فرار می باشد و به سرعت تبخیر می گردد. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد خطای ناشی از تبخیر حلال، مراحل آزمایش ها باید به سرعت انجام گردد.

مسائل عمده سم شناسی در مصرف کربن تتراکلراید به عنوان حلال مورد استفاده در این آزمایش ها استنشاق این ترکیب است. این ماده می تواند اثرات قابل ملاحظه ای را بر روی کبد، سیستم عصبی و دستگاه گوارشی داشته باشد، کربن تتراکلراید قابل اشتعال و انفجار نیست و نقطه جرقه و اشتعال ندارد، این ماده دارای بوی شیرین است و اغلب آن را نامطبوع نمی دانند، هر چند که عده زیادی در اثر مقدار کم آن نیز، حالت تهوع پیدا می کنند، احساس بوی آن نمی تواند نشانه وجود آن در حد زیاد باشد، حد احساس بوی آن تقریباً ۷۹ قسمت در میلیون است.

طبق روش NIOSH ۵۰۲۶ محلول های استاندارد کاربردی باید در محدوده ۰/۱ تا ۲/۵ میلی گرم در نمونه ساخته شود. با توجه به اینکه غلظت روغن معدنی در محلول مادر برابر ۱۰ mg/ml است، جرم هایی از روغن معدنی به میزان ۵۰ - ۱۰۰ - ۲۵۰ - ۷۵۰ - ۱۵۰۰ - ۲۲۵۰ میکروگرم مدنظر قرار داده می شود که با تقسیم این اعداد به عدد چگالی به ترتیب حجم های ۵، ۱۰، ۲۵، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ میکرو لیتر به دست می آید. با توجه به حجم های به دست آمده غلظت محلول های استاندارد کاربردی (C_۲) با توجه به فرمول زیر قابل محاسبه است.

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1)$$

$$C_1 = \text{غلظت محلول مادر (۱۰ mg/ml)}$$

$$V_1 = \text{حجم مورد نیاز از محلول مادر (۵، ۱۰، ۲۵، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ میکرو لیتر)}$$

$$C_2 = \text{غلظت محلول استاندارد کاربردی}$$

$$V_2 = \text{حجم محلول استاندارد کاربردی (۱۰ میلی لیتر)}$$

بنابراین با انجام این محاسبات، غلظت های محلول های کاربردی به ترتیب ۵، ۱۰، ۲۵، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ ppm به دست می آید. بهتر است جهت رسم منحنی کالیبراسیون میزان روغن معدنی در استانداردهای کاربردی برحسب میکروگرم در نظر گرفته شود.

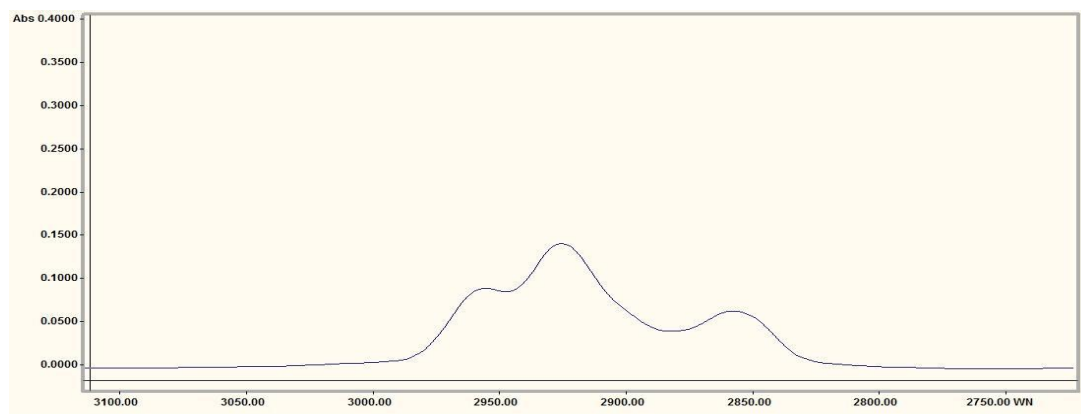
۵-۱-۵. مرحله ی پنجم: آنالیز نمونه‌های استاندارد کاری

پس از تهیه محلول‌های استاندارد کاربردی، این محلول‌ها به ترتیب درون سل دستگاه FT-IR با جنس پلیمری (سل مورد استفاده در دستگاه طیف‌سنج مری) ریخته می‌شود. توجه کنید که جنس سل از شیشه نباشد که در دستگاه مادون قرمز تداخل ایجاد کند. کیفیت اطلاعات به‌طور حساسی به نحوه استفاده از سل‌ها و طرز نگهداری آن‌ها بستگی دارد و مواردی نظیر اثر انگشت، چربی و سایر رسوبات روی دیواره‌های سلول به‌طور قابل توجهی خصوصیات نور عبوری آن را تغییر می‌دهد، بنابراین تمیز کردن کامل سل‌ها قبل و بعد از مصرف ضروری بوده و سطح بیرونی دیواره سلول هنگام حمل آن نباید به هیچ وجه لمس شود. همیشه سل‌ها را با چند حجم از حلال، قبل از انجام اندازه‌گیری شستشو دهید و قبل از قرار دادن در دستگاه آن را خشک نمایید و از لحاظ فقدان حباب‌های کوچک هوا روی دیواره‌های درونی بازرسی کنید.

در روش FT-IR دامنه عدد موج گزارش می‌شود. عدد موج جذب مادون قرمز انواع روغن‌های معدنی بر اساس روش NIOSH ۵۰۲۶ در دامنه $2700 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ قرار دارد. پیک مربوط به روغن‌های معدنی در تمامی نمونه‌ها در این روش در دامنه عدد موجی مناسب در این محدوده بررسی و از نظر کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۱-۶. دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز

دستگاه‌های طیف‌سنج را حداقل ۲۰ دقیقه قبل از انجام اندازه‌گیری روشن کنید. پس از تنظیم نرم‌افزار دستگاه طیف‌سنج قرائت‌ها را یادداشت کنید. شکل ۳ نمونه‌ای از طیف مادون قرمز برای نمونه‌ی روغن معدنی را برای محدوده‌ی عدد موجی مشخص $2700 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ ساخته است.



شکل ۳- طیف مربوط به یک نمونه استاندارد از روغن معدنی در روش FT-IR

به‌منظور تعیین غلظت نمونه‌های هوا در آزمایشگاه نیاز به تهیه منحنی خط کالیبراسیون ترکیب مورد سنجش می‌باشد، پس از ساخت محلول‌های استاندارد کاربردی مساحت سطح زیر پیک آن‌ها از نرم‌افزار دستگاه FT-IR به دست می‌آید و منحنی خط

کالیبراسیون توسط نرم‌افزار Excel ترسیم می‌شود، این منحنی نموداری از پاسخ دستگاه (سطح زیر پیک) در برابر مقدار روغن‌های معدنی در نمونه‌های استاندارد (میکروگرم) است. با استفاده از رابطه به‌دست آمده برای خط رگرسیون مقدار نمونه‌های مجهول (X) برحسب μg تعیین می‌گردد (معادله ۱).

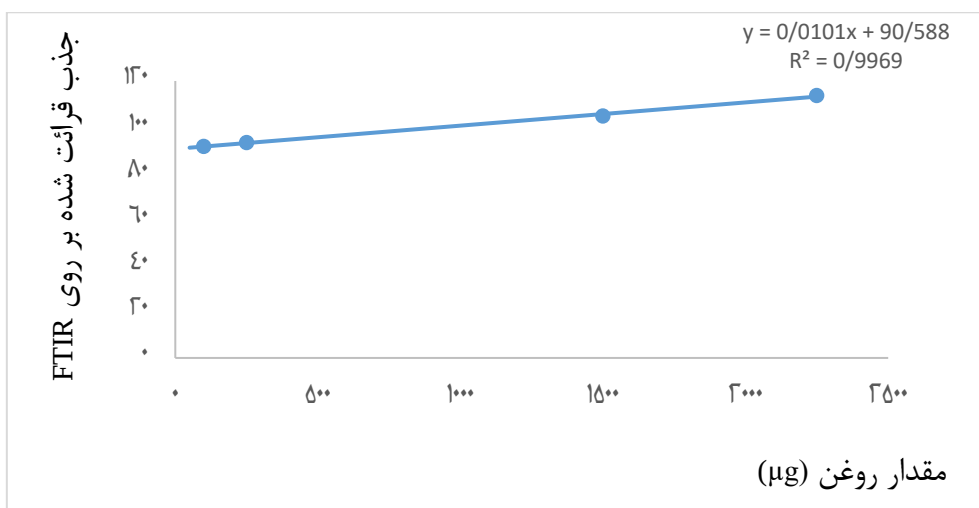
$$Y = ax + b \quad \text{معادله ۱}$$

در این رابطه Y برابر پاسخ دستگاه (متغیر وابسته) و X نشان‌دهنده مقدار ماده موردنظر (متغیر مستقل) است، a شیب خط کالیبراسیون می‌باشد که نشان‌دهنده پاسخ دستگاه به ازای تغییر در مقدار (حساسیت کالیبراسیون) است، b عدد ثابتی است که عرض از مبدأ نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این منحنی با اعداد به‌دست آمده از طیف‌سنج مادون قرمز به شرح ذیل می‌باشد.

جدول ۴- نتایج آنالیز غلظت‌های استاندارد با دستگاه FT-IR

جرم روغن‌های معدنی برحسب میکروگرم	سطح زیر پیک FT-IR
۱۰۰	۹۱/۷
۲۵۰	۹۳/۳
۱۵۰۰	۱۰۴/۸۶
۲۲۵۰	۱۱۳/۷۶

جدول ۴ نمونه‌ای از اعداد به‌دست آمده برای روغن معدنی در آزمایشگاه سم‌شناسی دانشکده‌ی بهداشت و ایمنی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی را نشان می‌دهد. با به‌کارگیری نرم‌افزار اکسل معادله‌ی خطی این اعداد ترسیم شده است (نمودار ۱). هر چه میزان رگرسیون (R^2) به‌دست آمده از منحنی کالیبراسیون به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد منحنی کالیبراسیون مناسب‌تر است. و وجود حداقل چهار نقطه برای ترسیم منحنی کالیبراسیون ضروری است (نمودار ۱). جهت تعیین غلظت نمونه‌ی مجهول، فیلتر تهیه شده از صنعت را با پنس در ظرف ویال قرار داده و ۱۰ میلی لیتر تتراکلرید کربن به آن اضافه کنید، درب آن را پوشانده و خوب تکان دهید. با کمک دستگاه FT-IR جذب نمونه‌ی مجهول را یادداشت کنید و در فرمول منحنی استاندارد به جای Y قرار دهید میزان X را محاسبه کنید و به عنوان میزان نمونه‌ی مجهول برحسب میکروگرم در نظر بگیرید.



نمودار ۲- نمونه‌ای از منحنی کالیبراسیون روغن‌های معدنی

۶- اعتبارسنجی روش در آزمایشگاه آنالیز کننده

برای اعتبارسنجی آزمایشگاه جهت اجرای روش میزان دقت، صحت، کمترین حد تعیین مقدار کمی و کمترین حد تشخیص طبق دستورالعمل NIOSH محاسبه می‌گردد [۲۵].

۶-۱. تعیین دقت

دقت یک روش آنالیز نزدیکی مقدار داده‌های تعیین شده به یکدیگر می‌باشد. برای تعیین دقت روش آنالیز از مقدار ضریب تغییرات استفاده می‌شود. ضریب تغییرات شاخص علمی است که به عنوان پارامتری در ارتباط با تکرارپذیری آنالیز نمونه‌های یکسان پذیرفته شده است. به منظور تعیین ضریب تغییرات، باید محلول‌های استاندارد کاربردی از میست روغن در گستره‌ی غلظتی ۵۰ تا ۲۲۵۰ میکروگرم تهیه گردد. هر غلظت سه بار در یک روز (برای محاسبه‌ی ضریب تغییرات درون روز) و سه بار در سه روز متوالی (برای محاسبه‌ی ضریب تغییرات برون روز) تهیه و سطح زیر طیف آن در محدوده‌ی $3200-2700 \text{ cm}^{-1}$ با دستگاه FT-IR تعیین شود. در نهایت ضریب تغییرات درون روز و ضریب تغییرات برون روز در هر غلظت با قرار دادن نتایج حاصل از آنالیز دستگاهی در فرمول معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

معادله ۲

CV = ضریب تغییرات (%)

σ = انحراف معیار

$\bar{X}$ = میانگین به عنوان مثال مقادیر سطح زیر طیف روغن معدنی در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم برای سه بار تکرار در یک روز و سه بار تکرار در سه روز متوالی به شرح جدول ۴ می باشد. با محاسبه انحراف معیار و میانگین از این مقادیر و استفاده از فرمول بالا ضریب تغییرات درون روز و برون روز برای این غلظت در جدول ۵ مشخص شده است. مقادیر ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ درصد به معنای دقت مناسب روش می باشد.

جدول ۵- ضریب تغییرات درون روز و برون روز

پارامتر	مقادیر سطح زیر طیف در یک روز (درون روز)	مقادیر سطح زیر طیف در سه روز متوالی (برون روز)
غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم	۱۰۶	۱۰۷
	۱۰۸	۱۰۸
	۱۰۹	۱۰۹
انحراف معیار	۱/۵	۱
میانگین	۱۰۷/۷	۱۰۸
%CV	۱/۴	۰/۹

۶-۲. تعیین صحت

نزدیکی نتیجه‌ی آزمایش به مقدار واقعی، صحت آزمایش را نشان می‌دهد. از آنجاکه هدف اندازه‌گیری برآورد مقدار واقعی متغیر موردنظر است، صحت نتایج به‌دست‌آمده از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای تعیین صحت آنالیز داده‌ها از شاخص بازیافت نمونه استفاده می‌گردد. برای تعیین صحت روش باید محلول‌های استاندارد در گستره‌ی غلظتی ۵۰ تا ۲۲۵۰ میکروگرم تهیه گردد. سپس محلول‌های استاندارد مورد آنالیز قرار گرفته و با استفاده از منحنی کالیبراسیون، غلظت محلول‌های استاندارد قرائت‌شده و میزان بازیافت با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردد.

$$\text{Recovery} = \frac{C_{\text{actual}}}{C_{\text{theoric}}} \times 100 \quad (\text{معادل ۳})$$

C_{actual} = غلظت واقعی برحسب میکروگرم

C_{theoric} = غلظت تئوری برحسب میکروگرم

به‌عنوان مثال در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم از روغن معدنی سطح زیر طیف ۱۰۷ می‌باشد. غلظت واقعی با استفاده از معادله‌ی خط کالیبراسیون به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد و با داشتن غلظت تئوری و غلظت واقعی میزان بازیافت با استفاده از رابطه‌ی بالا و به میزان ۱۰۱ درصد به دست می‌آید.

$$y = 0.0099x + 91/974$$

$$y=107 \rightarrow 107 = 0.0099x + 91/974 \rightarrow x=1517/8 \text{ غلظت واقعی}$$

$$\text{میزان بازیافت} = \frac{1517/8}{1500} \times 100 = 101$$

مقادیر مناسب بازیافت از ۹۰ تا ۱۱۰ درصد می‌باشد که این مقادیر می‌بایست برای تمامی غلظت‌ها به‌صورت ذکرشده محاسبه گردد.

۶-۳. تعیین حد تشخیص کیفی (LOD)

حد تشخیص کیفی پایین‌ترین غلظتی از آنالیت است که می‌توان آن را تشخیص داد و لزوماً تحت شرایط آزمایش قابلیت تعیین مقدار را ندارد. این مقدار با کمک رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\text{LOD} \cong \bar{X}_{bi} + 3 S_{bi} \quad (\text{معادله ۴})$$

$\bar{X}_{bi}$ = میانگین پاسخ نمونه شاهد

S_{bi} = انحراف معیار پاسخ در نمونه شاهد

جهت تعیین میانگین و انحراف استاندارد غلظت نمونه شاهد حداقل سه منحنی استاندارد ترسیم می‌شود و با قرار دادن عدد صفر در X برای سه معادله‌ی منحنی استاندارد میزان Y به‌عنوان سه عدد پاسخ در نقطه‌ی شاهد محاسبه می‌گردد که میانگین و انحراف معیار آن در فرمول‌های ۵ و ۶ قابل‌استفاده است.

۴-۶. تعیین حد تشخیص کمی (LOQ)

حد تشخیص کمی پایین‌ترین غلظتی از آنالیت است که می‌توان آن را تحت شرایط آزمایش با دقت و صحت قابل‌قبول تعیین مقدار نمود.

$$LOQ \cong \bar{X}_{bi} + 10 S_{bi} \quad (\text{معادله ۵})$$

$\bar{X}_{bi}$ = میانگین پاسخ نمونه شاهد

S_{bi} = انحراف معیار پاسخ در نمونه شاهد

۵-۶. آنالیز نمونه‌های واقعی

پس از محاسبه مقدار روغن‌های معدنی در نمونه‌های واقعی و نمونه‌ی شاهد برحسب میکروگرم، با استفاده از رابطه‌ی زیر غلظت مواجهه شغلی برحسب mg/m^3 به دست می‌آید.

$$C = \frac{W-B}{V} \text{ mg/m}^3 \quad (\text{معادله ۶})$$

W : مقدار روغن در نمونه اصلی برحسب میکروگرم

B : مقدار روغن در نمونه شاهد برحسب میکروگرم

C : مواجهه تنفسی با روغن معدنی برحسب میلی‌گرم برحسب مترمکعب

V : حجم هوای نمونه‌برداری تصحیح شده برحسب لیتر

منابع:

- [۱] D. Park, The Occupational Exposure Limit for Fluid Aerosol Generated in Metalworking Operations: Limitations and Recommendations, Saf. Health Work. ۳ (۲۰۱۲) ۱-۱۰. doi:۱۰,۵۴۹۱/SHAW.۲۰۱۲,۳,۱,۱.
- [۲] A.T. Simpson, J.A. Groves, J. Unwin, M. Piney, Mineral oil metal working fluids (MWFs)—development of practical criteria for mist sampling, Ann. Occup. Hyg. ۴۴ (۲۰۰۰) ۱۶۵-۱۷۲. doi:۱۰,۱۰۹۳/annhyg/۴۴,۳,۱۶۵.
- [۳] M. Azari, E. Tavakol, ... Z.Y.-P., undefined ۲۰۰۹, Developing and Validating A New Method in Analysis of Metal Working Fluids, Pajoohande.Sbmu.Ac.Ir. (n.d). <https://pajoohande.sbmu.ac.ir/article-۱-۷۲۰-en.html> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۴] H. Karube, Y. Aizawa, K. Nakamura, A. Maeda, K. Hashimoto, T. Takata, [Oil mist exposure in industrial health--a review]., Sangyo Eiseigaku Zasshi. ۳۷ (۱۹۹۵) ۱۱۳-۲۲. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/۷۷۴۹۹۹۰> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۵] A. m., c. a., occupational health monitoring of computer numeric controlled (cnc) lathe machinists exposed to metal aerosols, ۴ (۲۰۰۵) ۵۱-۵۶. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=۴۷۲۶۴> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۶] IARC, Chemical Agents and Related Occupations: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. ۱۰۰F, International Agency for Research on Cancer, Lyon, ۲۰۱۲. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK۳۰۴۴۱۶/> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۷] R.A. Glaser, S. Shulman, R. Kurimo, G. Piacitelli, An Evaluation of ASTM Method P-۴۲-۹۷ for Sampling and Analysis of Metalworking Fluids, Appl. Occup. Environ. Hyg. ۱۸ (۲۰۰۳) ۸۲۵-۸۲۷. doi:۱۰,۱۰۸۰/۱۰۴۷۳۲۲۰۳۹۰۲۳۷۳۲۲.
- [۸] NIOSH, Niosh Pocket Guide to Chemical Hazards: Oil mist (mineral), (۲۰۱۰). <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd۰۴۷۲.html>.
- [۹] H. Cohen, E.M. White, Metalworking Fluid Mist Occupational Exposure Limits: A Discussion of Alternative Methods, J. Occup. Environ. Hyg. ۳ (۲۰۰۶) ۵۰۱-۵۰۷. doi:۱۰,۱۰۸۰/۱۵۴۵۹۶۲۰۶۰۰۸۶۷۸۷۲.
- [۱۰] K.S. Galea, A. Searl, A. Sánchez-Jiménez, T. Woldbæk, K. Halgard, S. Thorud, K. Steinsvåg, K. Krüger, L. MacCalman, J.W. Cherrie, M. van Tongeren, Oil Mist and Vapour Concentrations from Drilling Fluids: Inter- and Intra-laboratory Comparison of Chemical Analyses, Ann. Occup. Hyg. ۵۶ (۲۰۱۱) ۶۱-۶۹. doi:۱۰,۱۰۹۳/annhyg/mer۰۷۸.

- [۱۱] OSHA, Metalworking Fluids: Safety and Health Best Practices Manual, (۱۹۹۹). https://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html.
- [۱۲] S.K. Misra, R.O. Sköld, Lubrication studies of aqueous mixtures of inversely soluble components, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* ۱۷۰ (۲۰۰۰) ۹۱-۱۰۶. doi:۱۰.۱۰۱۶/S۰۹۲۷-۷۷۵۷(۰۰)۰۰۵۴۷-۱.
- [۱۳] P. Wlaschitz, A new measuring method to detect the emissions of metal working fluid mist, *J. Hazard. Mater.* ۱۴۴ (۲۰۰۷) ۷۳۶-۷۴۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/J.JHAZMAT.۲۰۰۷.۰۱.۱۰۴.
- [۱۴] K. M., Z. V., A. J., M. Z., THE COMPARISON OF PRACTICAL EFFICIENCY OF FORMALDEHYDE AND NON FORMALDEHYDE BIOCIDES ON PREDOMINANT MICROBIAL POPULATION IN METAL WORKING FLUIDS, ۲۶ (۲۰۱۴) ۳۵۳-۳۶۴. <https://www.sid.ir/En/Journal/ViewPaper.aspx?ID=۴۱۲۷۷۶> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۱۵] H.-M. Liu, Y.-H. Lin, M.-Y. Tsai, W.-H. Lin, Occurrence and characterization of culturable bacteria and fungi in metalworking environments, *Aerobiologia (Bologna)*. ۲۶ (۲۰۱۰) ۳۳۹-۳۵۰. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۴۵۳-۰۱۰-۹۱۶۹-۸.
- [۱۶] ILO, Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, (۲۰۰۱). https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_۱۱۳۳۲۹/lang--en/index.htm (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۱۷] C. Winder, N. Stacey, Occupational toxicology., *Occup. Toxicol.* (۲۰۰۴). <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/۲۰۰۵۳۰۴۸۳۱۳> (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۱۸] V.J. Coglian, Y. Grosse, R.A. Baan, K. Straif, M.B. Secretan, F. El Ghissassi, the W.G. for V. Working Group for Volume ۸۸, Meeting report: summary of IARC monographs on formaldehyde, ۲-butoxyethanol, and ۱-tert-butoxy-۲-propanol., *Environ. Health Perspect.* ۱۱۳ (۲۰۰۵) ۱۲۰۵-۸. doi:۱۰.۱۲۸۹/ehp.۷۵۴۲.
- [۱۹] M. Balulescu, J.M. Herdan, Ecological and health aspects of metalworking fluids' manufacture and use, *J. Synth. Lubr.* ۱۴ (۱۹۹۷) ۳۵-۴۵. doi:۱۰.۱۰۰۲/jsl.۳۰۰۰۱۴۰۱۰۴.
- [۲۰] S.B. Selvaraju, I.U.H. Khan, J.S. Yadav, Biocidal activity of formaldehyde and nonformaldehyde biocides toward *Mycobacterium immunogenum* and *Pseudomonas fluorescens* in pure and mixed suspensions in synthetic metalworking fluid and saline., *Appl. Environ. Microbiol.* ۷۱ (۲۰۰۵) ۵۴۲-۶. doi:۱۰.۱۱۲۸/AEM.۷۱.۱.۵۴۲-۵۴۶,۲۰۰۵.
- [۲۱] E. Nasiri, M. Soltani, R. Gazor, F. Mohammad-Ghasemi, F. Houseni, Effect of Formaldehyde Gas on Gonadotropins and Apoptosis of Testicular Germ Cells in Adult

- Rats, J. Guilan Univ. Med. Sci. ۲۳ (۲۰۱۴) ۱-۷.
http://journal.gums.ac.ir/browse.php?a_id=۵۶۲&sid=۱&slc_lang=en&ppup= (accessed September ۹, ۲۰۱۹).
- [۲۲] H. Koren, Illustrated Dictionary and Resource Directory of Environmental and Occupational Health, Second Edition, CRC Press, ۲۰۰۶. doi:۱۰,۱۲۰,۱/b۱۲۴۴۹.
- [۲۳] ACGIH, TLVs and BEIs: Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices, Cincinnati, ۲۰۱۲.
- [۲۴] M.C. Friesen, S. Costello, E.A. Eisen, Quantitative Exposure to Metalworking Fluids and Bladder Cancer Incidence in a Cohort of Autoworkers, Am. J. Epidemiol. ۱۶۹ (۲۰۰۹) ۱۴۷۱-۱۴۷۸. doi:۱۰,۱۰۹۳/aje/kwp۰۷۳.
- [۲۵] Kennedy ER (۱۹۹۵): Guidelines for air sampling and analytical method development and evaluation. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Center

فصل سوم

راهنمای تعیین مواجهه تنفسی با سیلیس کریستالی

دستورالعمل کاربردی و رهنمودهای آزمایشگاهی -
تخصصی در اجرای روش NIOSH ۷۶۰۲

۱. مقدمه

سیلیس (SiO_2) ترکیبی معدنی است که از یک اتم سیلیسیم و دو اتم اکسیژن تشکیل شده و دارای نقطه ذوب ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این ترکیب جامدی بی‌رنگ، بی‌بو و غیرقابل احتراق است. سیلیس به دو شکل الف: سیلیس کریستالی یا بلوری و ب: سیلیس غیر کریستالی یا بی‌شکل (آمورف) وجود دارد. در طبیعت سیلیس ابتدا به شکل کریستالی یا کریپتوکریستالین و بعدها به شکل آمورفوس پیدا شد. در سیلیس کریستالی اتم‌ها و مولکول‌ها در یک الگوی تکراری سه‌بعدی مرتب‌شده‌اند و در نوع آمورف اتم‌ها و مولکول‌ها به‌طور تصادفی و بدون هیچ الگوی مرتبی قرار گرفته‌اند. سیلیس کریستالی ماده‌ای جامد است که نوع خالص آن شفاف و بی‌رنگ بوده و در آب و حلال‌ها غیرقابل حل است. این ترکیب یک ماده معدنی فراوان در پوسته زمین است. فراوانی سیلیس در طبیعت و خواص فیزیکی و شیمیایی آن باعث شده تا در صنایع به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرد و در مقادیر مختلف تقریباً در تمام سنگ‌ها، خاک رس و شن وجود دارد و اغلب در محتوای گردوغبارهایی است که از فرایندهای برش کاری، سوراخ کاری و خرد کردن بر روی مواد معدنی یا سنگی به وجود می‌آید.

آنچه از نظر پزشکی مهم است شکل آزاد سیلیس کریستالی است که مهم‌ترین انواع آن کوارتز، کریستوبالیت و تری‌دیمیت است. سیلیس کریستالی در دماهای مختلف سه شکل بلوری با عنوان‌های کوارتز، کریستوبالیت و تری‌دیمیت به وجود می‌آورد به‌طوری‌که اشکال بلوری مختلف تحت درجه حرارت و فشار معین به یکدیگر تبدیل می‌شوند بدین جهت در فرآیندهای مختلف با توجه به دما و فشار اشکال مختلف بلوری کوارتز، کریستوبالیت و تری‌دیمیت مشاهده می‌شود. رایج‌ترین شکل سیلیس کریستالی، کوارتز است. کارگران شاغل در صنایع مختلف از قبیل تونل سازی، سند بلاست، ریخته‌گری، ساخت شیشه، سرامیک و فراورده‌های مواد نسوز و محصولات ساینده، ساختمان سازی و کارگرانی با وظیفه خرد کردن و سنگ‌زنی و حفاری سنگ و مصالح ساختمانی در معادن، از طریق هوای تنفسی مواجهه زیادی با گردوغبار سیلیس دارند. حداقل ۱/۷ میلیون کارگر آمریکایی و بیش از سه میلیون کارگر اروپایی و بیش از ۱۰ میلیون کارگر چینی در صنایع و مشاغل مختلف با سیلیس کریستالی قابل تنفس مواجهه دارند. مواجهه بلندمدت با سیلیس کریستالی می‌تواند باعث بیماری مزمن انسداد ریوی گردد. مواجهات شغلی از طریق استنشاق سیلیس کریستالی با ایجاد بیماری سیلیکوزیس و سرطان ریه همراه است که یک بیماری ریوی غیرقابل برگشت بوده اما قابل پیشگیری است. هر سال بیش از ۲۵۰ نفر از میان کارگران یادشده در آمریکا به دلیل ابتلا به بیماری سیلیکوزیس فوت می‌کنند. سیلیکوزیس یکی از بیماری‌های شایع در بین معدن کاران است. این بیماری شایع‌ترین پنوموکونیوز در جهان بوده که حذف کامل آن تا سال ۲۰۳۰ میلادی جزء اهداف مشترک سازمان بین‌المللی کار^۱ و سازمان جهانی بهداشت^۲ است. در سال

^۱ International Labour Organization

^۲ World Health Organization

۱۹۹۷ آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان^۱ سیلیس را در گروه یک سرطان‌ها برای انسان طبقه‌بندی کرده و انجمن مهندسين بهداشت صنعتی آمریکا^۲ سیلیس را در گروه A^۲ یعنی سرطان‌زای احتمالی طبقه‌بندی کرده است. در سال ۲۰۱۰ انجمن مهندسين بهداشت صنعتی آمریکا حد مجاز مواجهه شغلی ۸ ساعته برای سیلیس کریستالی را ۰/۰۲۵ میلی‌گرم بر مترمکعب پیشنهاد داد و این در صورتی است که سازمان دولتی ایمنی و بهداشت شغلی کشور آمریکا^۳ حد مجاز مواجهه شغلی ۸ ساعته را ۰/۰۱ میلی‌گرم بر مترمکعب الزام کرده است.

با توجه به کاربرد گسترده مواد کانی حاوی سیلیس کریستالی در صنایع، ارزشیابی مواجهه شغلی کارگران از اهمیت خاصی در موضوع کنترل مواجهه سیلیس کریستالی و تأمین سلامت آنان برخوردار است. روش‌های مختلفی توسط جوامع علمی و اجرایی برای نمونه‌برداری و آنالیز سیلیس هوای محیطی ارائه شده است. موسسه ملی بهداشت و ایمنی کشور آمریکا^۴ روش طیف سنجی مرئی به شماره ۷۶۰۱ و روش طیف سنجی مادون قرمز به شماره ۷۶۰۲ را برای آنالیز سیلیس ارائه نموده است. سازمان دولتی ایمنی و بهداشت شغلی کشور آمریکا نیز روش پراکنش اشعه X^۵ به شماره ID ۱۴۲ را برای آنالیز سیلیس ارائه نموده است.

۱. اهداف

هدف از تدوین راهنمای پیش رو، ارائه دستورالعمل اجرایی و معیارهای مربوط به آنالیز سیلیس به کمک دستگاه اسپکتروسکوپی مادون قرمز با تبدیل فوری^۶ می‌باشد.

۲. اصطلاحات و تعاریف

سیلیس: سیلیس یا دی‌اکسید سیلیس فراوان‌ترین ماده معدنی در پوسته زمین است. سیلیس یکی از بی‌واکنش‌ترین و حل‌نشده‌ترین مواد شیمیایی در طبیعت است و معمولاً بی‌رنگ و سفید می‌باشد.

اشکال غیر کریستالی: اپال، سیلیس بیوژنیک، دیاتوماسیون زمینی، فیبرهای سیلیس (بیوژنیک) ویتریوس سیلیس، پیروژنیک یا فیوم های سیلیس، سیلیس کلوئیدی، ژل سیلیس از انواع ملکولی سیلیس غیر کریستالی است.

کوارتز: کوارتز یکی از شکل‌های مولکولی سیلیس کریستالی است و در فشار و درجه حرارت معمولی پایدار و از سختی بسیار بالایی نیز برخوردار است.

^۱ International Agency For Research On Cancer-IARC

^۲ American Conference Of Governmental Industrial Hygienists-ACGIH

^۳ Occupational Safety And Health Administration-OSHA

^۴ National Institute For Occupational Safety & Health-NIOSH

^۵ X-Ray Power Diffraction-XRD

^۶ Fourier –Transform Infrared-FTIR

مواجهه تنفسی: میزان گردوغباری که از طریق تنفس و در طی یک نوبت کاری (۸ ساعت کار در روز) وارد ریه‌های فرد می‌شود.

سیلیکوزیس: یک بیماری در ریه‌هاست که علت آن استنشاق غبارهای سیلیسی متبلور می‌باشد. نشانه‌های آن به شکل زخم و لخته در بالای شش‌ها می‌باشد.

حد آستانه مجاز^۱: مقداری است که توسط انجمن متخصصان دولتی بهداشت حرفه‌ای امریکا تعیین شده‌اند. باور بر این است در صورت مواجهه روزانه کارگر با این مقادیر از مواد شیمیایی در طول عمر کاری هیچ‌گونه اثر زیان‌آور قابل تشخیصی بر سلامت شخص ایجاد نخواهد شد. در حال حاضر مقدار مواجهه مجاز روزانه با گردوغبار سیلیس کریستالی ۰/۰۲۵ میلی گرم بر مترمکعب می‌باشد.

اسپکتروسکوپی مادون قرمز با تبدیل فوریه: یک روش آنالیز آزمایشگاهی مواد شیمیایی است که از طیف‌سنجی مادون قرمز استفاده می‌شود.

گردوغبار قابل استنشاق^۲: ذرات گردوغباری که به اندازه کافی کوچک بوده (با نقطه‌ی برش ۴ میکرومتر) که به عمق شش‌ها نفوذ می‌یابد.

صحت^۳: نزدیکی نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر واقعی ماده‌ی مدنظر است.

دقت^۴: نزدیکی نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های تکراری برای یک ماده است.

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان: یک تشکل وابسته به سازمان بهداشت جهانی و مهم‌ترین سازمانی که به بررسی و مطالعه بر روی سرطان‌ها می‌پردازد، این سازمان مواد شیمیایی و مشاغل را از لحاظ سرطان‌زایی به پنج گروه طبقه‌بندی کرده است که به صورت زیر می‌باشد.

گروه ۱: سرطان‌زای انسانی

گروه ۲A: سرطان‌زای احتمالی برای انسان

گروه ۲B: ممکن است برای انسان سرطان‌زا باشد.

گروه ۳: به عنوان سرطان‌زا برای انسان طبقه‌بندی نشده است.

گروه ۴: برای انسان ممکن نیست که سرطان‌زا باشد.

^۱ Threshold Limit Value -TLV

^۲ Respirable Dust

^۳ Accuracy

^۴ Precision

۳. سیلیس کریستالی

سیلیسیوم یکی از فراوان‌ترین عناصر روی زمین است که به شکل خالص در طبیعت یافت نمی‌شود و به رنگ سفید یا بی‌رنگ است. سیلیکا نام کلی مواد معدنی با ترکیب شیمیایی سیلیسیوم و اکسیژن بوده که به صورت اکسید سیلیسیوم است و $27/72\%$ از لایه خاک را تشکیل می‌دهد. سیلیکا بدون بو، بدون رنگ و دارای حلالیت کمی در آب می‌باشد که البته حلالیت آن با افزایش دما و رطوبت افزایش می‌یابد. سیلیکا به شکل کریستالی (پلی مورف) و غیر کریستالی (آمورف) وجود دارد. سیلیکای آمورف زمانی به وجود می‌آید که مولکول‌های سیلیکون دی‌اکسید به طور تصادفی در ساختار مولکولی قرار گیرند. خاکستر، سیلیکاژل و خاک‌های دیاتومه (88%) حاوی سیلیکای آمورف هستند. سیلیکای آمورف تحت دمای بسیار بالا و سرد شدن آهسته می‌تواند به سیلیکای کریستالی تبدیل شود.

۴-۱. سیلیکای کریستالی (پلی مورف) و انواع آن

در سیلیس کریستالی اتم‌ها و مولکول‌ها در یک الگوی تکراری سه‌بعدی مرتب شده‌اند. سیلیس کریستالی یک ماده معدنی فراوان در پوسته زمین است و در مقادیر مختلف تقریباً در تمام سنگ‌ها، خاک رس و شن وجود دارد. سیلیکای کریستالی شامل اشکال طبیعی و سنتزی است. انواع طبیعی شامل کوارتز (α و β)، تری‌دیمیت (α ، β و γ)، کریستوبالیت (α و β)، کووسیت^۱، استیشوووت^۲ و موگانیت^۳ می‌باشد. سیلیکای سنتتیک شامل کیتیت^۴ و پوروسیل^۵ ها می‌باشد. در طبیعت کوارتز معمول‌ترین و پایدارترین شکل سیلیکای کریستالی است و 12% از ساختار سنگ‌ها را تشکیل می‌دهد. علاوه بر سنگ و خاک در شن و ماسه، ملات (ساروج)، بتون، گدازه‌ها، خرده‌سنگ‌های ساختمانی، چینی، آجر و رنگ‌ها وجود دارد. کریستوبالیت و تری‌دیمیت در سنگ‌ها و خاک‌های آتشفشانی یافت می‌شوند. کریستوبالیت در بعضی از عملیات صنعتی از قبیل ریخته‌گری، خشک کردن خاک‌های دیاتومه و سوزاندن فاضلاب کشاورزی یا پوسته‌ی برنج تولید می‌شود. سایر پلی مورف‌های کریستالی بسیار نادر بوده و فقط تحت فشار بسیار بالا تولید می‌شوند. آژانس بین‌المللی تحقیقات بر روی سرطان (IARC) در سال ۱۹۹۷ بر اساس مطالعات اپیدمیولوژیک دو شکل کریستالی سیلیس یعنی کوارتز و کریستوبالیت را در گروه ۱ سرطان‌زاهای انسانی طبقه‌بندی کرده است، همچنین انجمن متخصصین بهداشت حرفه‌ای آمریکا کوارتز و کریستوبالیت را در گروه A₂ (مشکوک به سرطان زایی در انسان) قرار داده است. سیلیکای کریستالی بسیار پایدار است، درحالی‌که اشکال مختلف سیلیکای

^۱ Coesite

^۲ Stishovite

^۳ Moganite

^۴ Keatite

^۵ Porosils

کریستالی تحت دماهای مختلف می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. ترتیب حالات اشکال مختلف سیلیکای کریستالی در اسید HF به صورت زیر است:

کریستوبالیت و تریدیمیت > کوارتز > کووسیت > استیشوویت

۴-۲. خصوصیات فیزیکی اشکال عمده سیلیس کریستالی

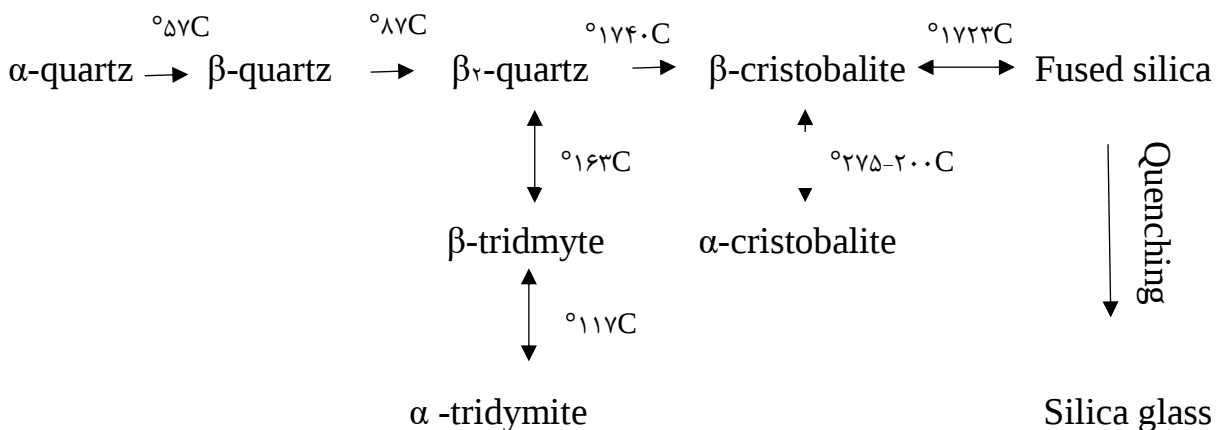
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مهم‌ترین اشکال سیلیس کریستالی در جدول ۶ مشخص شده است.

جدول ۶- خصوصیات انواع سیلیس کریستالی

نوع سیلیس	شکل ساختاری	وزن مولکولی	نقطه جوش
کوارتز	شش ضلعی	۶۰/۰۸	۱۶۱۰
کریستوبالیت	مکعبی یا چهارضلعی	۶۰/۰۸	۱۷۲۳
تریدیمیت	لوزی	۶۰/۰۸	۱۷۰۳

در برخی شرایط، برای مثال در درجه حرارت بالای کوره‌های صنعتی و آجرپزی کوارتز ممکن است به یکی دیگر از اشکال سیلیس کریستالی شناخته شده به نام کریستوبالیت تبدیل شود. کوارتز تقریباً در تمام انواع سنگ‌ها، شن، ماسه و خاک رس در مقادیر مختلفی یافت می‌شود. به عنوان مثال ماسه سنگ تقریباً کوارتز خالص است در حالی که سنگ گرانیست ممکن است بین ۳۰ - ۱۵٪ کوارتز داشته باشد. در شکل ۴ چگونگی تبدیل انواع سیلیس کریستالی به یکدیگر در دماهای مختلف نشان داده شده است.

شکل ۴- دمای تبدیل انواع سیلیس کریستالی



۴-۳. مواجهه با سیلیس در صنایع مختلف

در بین برگه‌های مختلف سیلیس، نوع سیلیس کریستالی دارای سمیت بوده و به‌عنوان یک ماده سمی شناخته شده است. مواجهه با سیلیس در صنایع به شکل گردوغبار رخ می‌دهد که به سه شکل توراسیک، قابل استنشاق و قابل تنفس طرح می‌شود. ذرات توراسیک به آن دسته از ذراتی اطلاق می‌گردد که اگر در هر نقطه از راه‌های هوایی (نای و نایژه) و ناحیه کیسه‌های هوایی ته‌نشین گردند مخاطره‌آمیز خواهند بود. از جنبه نمونه‌برداری ذرات توراسیک^۱ نفوذپذیری خود را به مجاری هوایی (برونش و برونشیول) ادامه می‌دهند. قطر آئرودینامیکی این ذرات به‌طور متوسط 10 ± 0.1 میکرومتر است. ذرات قابل استنشاق^۲ بنا به تعریف به آن دسته از ذراتی اطلاق می‌گردد که در صورت نفوذ و ته‌نشینی در ناحیه تبادل گازهای تنفسی (کیسه‌های هوایی) مخاطره‌آمیز خواهند بود. ذرات قابل استنشاق^۳ با قطر آئرودینامیکی حدود ۴ میکرومتر می‌توانند وارد پارانشیم ریه (آلوئول‌ها و برونشیول‌های سیستم تنفسی) شوند. این ذرات تنها از طریق سلول‌های ماکروفاژ (سلول‌های بیگانه‌خوار) برداشته می‌شوند. ذرات قابل تنفس به آن دسته از ذراتی اطلاق می‌گردد که اگر در هر نقطه از دستگاه تنفسی اعم از راه‌های تنفسی فوقانی، میانی و تحتانی ته‌نشین شوند مخاطره‌آمیز خواهند بود. ذرات قابل تنفس دارای قطر آئرودینامیکی از صفر تا ۱۰۰ می‌باشند. مهم‌ترین فعالیت‌های شغلی که در آن کارگران ممکن است با سیلیکای کریستالی مواجهه داشته باشند شامل صنایع و مشاغل ذیل است:

- ✓ کشاورزی
- ✓ معدن کاری و استخراج سنگ معدن (خرد کردن سنگ، برش سنگ و...)
- ✓ صنایع ساختمانی (تخریب بناها و ساختمان‌سازی، ساخت تونل و بزرگراه، حفاری و خاک‌برداری)
- ✓ صنایع شیشه
- ✓ صنایع سیمان
- ✓ صنایع تولید سرامیک (عملیات قالب‌گیری، لعاب‌کاری و تکمیل)
- ✓ صنایع سیلیکون و فروسیلیکون (ریخته‌گری و ...)
- ✓ صنایع نورد آهن و فولاد (آماده‌سازی مواد نسوز و تعمیرات کوره‌ها)
- ✓ صنایع کشتی‌سازی
- ✓ صنایع نقاشی

^۱ Thoracic

^۲ Respirable

^۳ Inhalable

- ✓ صنایع تولید صابون و لوازم آرایشی
- ✓ صنایع تولید آسفالت و قیر
- ✓ صنایع تولید مواد شیمیایی کشاورزی
- ✓ صنایع جواهرسازی (برش، تراشکاری، صیقل کاری و براق کردن)
- ✓ صنایع تولید دیگهای بخار و ...

بیشترین حالت مواجهه با سیلیس کریستالی که عمومیت دارد نوع کوارتز آن است. تماس با اشکال دیگر از قبیل کریستوبالیت و تردیمیت معمولاً تحت دماهای بالا (بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) و حرارت دادن کوارتز، کائولین یا سیلیس آمورف (بی شکل) مانند خاکهای دیاتومه و سیلیسی صورت می پذیرد. مواجهه با کریستوبالیت ممکن است در صنایع تولید مواد پاک کننده، سرامیک، بدلیجات، رنگها و کاتالیست های صنایع شیمیایی، آفت کش ها و کوره ها اتفاق بیفتد.

۴-۴. حدود مجاز مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی

سازمان های مربوطه مقادیر مختلفی را به عنوان حد مجاز مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی تعیین کرده اند که در ذیل مشخص شده است.

- مرکز سلامت محیط و کار وزارت بهداشت ایران در ویرایش پنجم میزان حد مجاز وزن یافته ی زمانی به میزان ۰/۰۲۵ میلی گرم بر مترمکعب را برای آلفا کوارتز و کریستوبالیت پیشنهاد نموده است.
- موسسه ایمنی و بهداشت شغلی حد مجاز شغلی را برای مواجهه تنفسی با کوارتز ۱۰ میلی گرم بر مترمکعب و برای کریستوبالیت و تردیمیت نصف مقدار فوق اعلام کرده است.
- موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا حد تماس شغلی را برای انواع سیلیکای کریستالی ۰/۱ میلی گرم بر مترمکعب تعیین کرده است.
- کنفرانس متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH) حد تماس شغلی را برای مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی ۰/۰۲۵ میلی گرم بر مترمکعب تعیین کرده است.

۴-۵. بیماری های ناشی از مواجهه با سیلیس کریستالی

خارج شدن ذرات کریستال استنشاق شده یک مکانیسم دفاعی بدن به هنگام مواجهه با ذرات کریستالی سیلیس می باشد. مقدار ذرات باقی مانده در سیستم تنفسی بر اساس میزان پاک سازی ذرات ته نشین شده در سیستم تنفسی تعیین می شود.

مکانیسم‌های پاک‌سازی در قسمت‌های مختلف سیستم تنفسی متفاوت است، به‌طوری‌که ذرات ته‌نشین شده در قسمت فوقانی بینی از طریق راه‌های مکانیکی مانند دمیدن یا عطسه کردن برداشته می‌شود. البته باید توجه داشت که ذرات حل‌شدنی می‌توانند به سرعت جذب شوند. پاک‌سازی ذرات در بخش‌های خلفی بینی شامل قسمت مخروطی، به‌وسیله مکانیسم‌های موکوسی یا مخاط مژگانی صورت می‌پذیرد که باعث حرکت ذرات ته‌نشین شده به قسمت نازوفارنکس شده و ذرات پاک‌سازی می‌شوند.

در ناحیه قفسه سینه مژک‌های پلکانی متحرک در سراسر نای تا انتهای برونشیول‌های وجود داشته و باعث حرکت ذرات سیلیس به سمت جلو و پاک‌سازی آن‌ها در این ناحیه می‌شود. باقی ماندن ذرات در راه‌های هوایی در رابطه با سرطان زایی راه‌های هوایی می‌تواند مهم باشد. مطالعات بر روی بیماران مبتلا به سرطان ریه نشان می‌دهد که اغلب تومورها به دلیل ماندن مقادیر خیلی زیادی از ذرات سیلیس کریستالی در راه‌های هوایی تشکیل شده است.

مدت‌هاست که سیلیس کریستالی در محیط‌های کاری برای سلامتی انسان مضر شناخته شده است. تنفس طولانی مدت ذرات کوچک سیلیس منجر به بیماری سیلیکوزیس می‌شود. همچنین مواجهه با سیلیس یکی از فاکتورهای اتیولوژیکی پنوموکونیوز کارگران معادن زغال سنگ است. سیلیس کریستالی می‌تواند در افزایش سرعت بیماری‌های تنفسی از قبیل برونشیت مزمن، آمفیژم ریوی و آسیب‌های ایمونولوژیکی و اختلالات عملکردی کلیه نقش داشته باشد. همچنین مواجهه با سیلیس کریستالی باعث افزایش ریسک ابتلا به سرطان به‌ویژه سرطان ریه می‌شود. ویژگی‌های بیماری‌های ناشی از مواجهه با سیلیس کریستالی می‌تواند با متغیرهایی از قبیل سن و جنس و سابقه‌ی مواجهه تغییر کند. در ادامه به شرح بیماری‌های ناشی از مواجهه با سیلیس کریستالی می‌پردازیم.

• سیلیکوزیس

سیلیکوزیس یک بیماری شغلی غیرقابل درمان است که ابتلای کارگران به آن از طریق استنشاق ذرات هوا برد سیلیکای کریستالی صورت می‌گیرد. بیماران مبتلا به سیلیکوزیس از کوتاه شدن نفس، سخت شدن تنفس، درد در ناحیه‌ی قفسه‌ی سینه، تب و سیانوز رنج می‌برند. در آمریکا (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴) ۱۸۲۷ نفر و با میانگین ۱۸۲/۷ مرگ در سال به علت سیلیکوزیس جان باختند. بیشترین مرگ‌ومیر در آمریکا مربوط به اپراتورهای ماشین‌آلات معدن کاری بوده است. به لحاظ مواجهه، مؤثرترین فاکتور در بروز بیماری سیلیکوزیس، میزان دز دریافتی حاصل از استنشاق گردوغبار سیلیس کریستالی قابل تنفس در محیط کار اعلام گردیده است. پس از ابتلا به سیلیکوزیس فعالیت ماکروفاژهای ریوی افزایش می‌یابد. معمولاً با فیروز ریوی ندولار حادث می‌شود و به نظر می‌رسد پیشرفت سیلیکوزیس به علت بلعیده شدن ذرات سیلیکا توسط

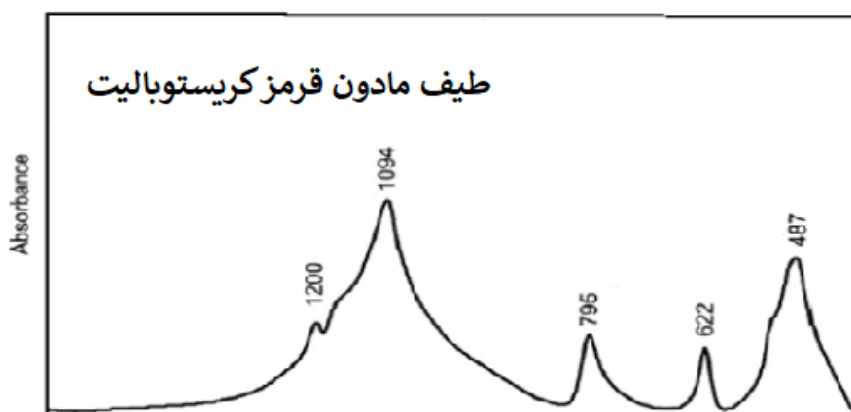
ماکروفاژهای آلوئولی می‌باشد و از آنجاکه ذرات سیلیکا توسط آنزیم‌های لیزوزومی تجزیه نمی‌شوند موجب تخریب ماکروفاژها و شروع فعالیت ایمنی و بروز فیبروز می‌شوند. سیلیکوزیس به شکل حاد، تحت حاد، مزمن و توده‌ای ظاهر می‌شود. سیلیکوزیس حاد در نتیجه مواجهه با مقادیر نسبتاً بالای ذرات سیلیکای تازه شکل گرفته حادث می‌شود. هایپوکسی مزمن علت معمول در مرگ ناشی از سیلیکوزیس حاد است. بیماری از لحاظ مورفولوژیکی از طریق آدم ریوی و افزایش مایع آلوئولی مشخص می‌شود. در تصاویر رادیوگرافی قفسه‌ی سینه توسط اشعه‌ی ایکس زخم‌هایی در لب‌های میانی و پایینی ریه دیده می‌شود.

سیلیکوزیس تحت حاد بیماری تسریع شده است که در اثر مواجهه بسیار زیاد با ذرات سیلیکا در عملیاتی مثل آسیاب، سندبلاست و برش سنگ اتفاق افتاده و به گرانولومای فیبروتیک شامل کلاژن، رتیکیلین و ذرات سیلیکا مربوط می‌شود. سیلیکوزیس مزمن بر اثر استنشاق طولانی‌مدت سیلیکای کریستالی و با شکل‌گیری ندول‌های فیبروتیک کلاسیک حادث می‌شود. این ندول‌ها اغلب در قسمت‌های فوقانی بافت ریه و نواحی ساب پلورال دیده می‌شود. سیلیکوزیس توده‌ای از پیوستگی و انباشتگی چندین ندول کوچک ناشی می‌شود. علاوه بر بزرگ شدن ندول‌ها، زخم‌های ندولی افزایش یافته و منجر به فیبروز بزرگ پیشرفته می‌شود.

• سرطان ریه

رابطه بین مواجهه با سیلیس، سیلیکوزیس و سرطان ریه برای چندین سال مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۷ بعد از بررسی یک تحقیق انتشار یافته، آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان به ارزشیابی مواجهه شغلی و پایش بیولوژیکی کارگران معادن به این نتیجه رسید که شواهد کافی در انسان برای ابتلا به سرطان ریه ناشی از استنشاق سیلیس کریستالی (در قالب کوارتز) از منابع شغلی وجود دارد. در نتیجه سیلیس کریستالی (کوارتز) به عنوان ماده سرطانزای گروه ۱ طبقه‌بندی شد. با این حال ارزیابی نهایی آن‌ها اشاره کرد که سرطانزایی در تمام صنایع مورد مطالعه آن‌ها یافت نشد و در نتیجه آن‌ها بر این باور قرار گرفتند که "سرطانزایی ممکن است وابسته به ویژگی‌های ذاتی سیلیس کریستالی یا فعالیت بیولوژیکی عوامل خارجی مؤثر همراه آن و یا تعمیم پلی مورف‌های سیلیس باشد".

۴. تشخیص کمی و کیفی سیلیس کریستالی با طیف‌سنجی FT-IR



شکل ۵- طیف مادون قرمز سیلیس کریستالی

طیف

مادون قرمز مواد شیمیایی همانند اثرانگشت آن ترکیب محسوب می شود و به همین دلیل برای تشخیص کیفی مواد شیمیایی طیف مادون قرمز قابل استفاده است. در طیف هر ماده گروه های عاملی در ساختار مولکولی مواد شیمیایی تشخیص داده شده و ساختار مولکولی آن ماده تأیید می شود. به عنوان مثال اسپکتروگرام ترکیبات کوارتز و کریستوبالیت در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای تشخیص کمی هر ماده شیمیایی با طیف سنج مادون قرمز یک دامنه عدد موجی یا یک عدد موجی مشخص مدنظر قرار داده می شود و با تعیین سطح زیر پیک در آن عدد موجی مقدار ماده تشخیص داده می شود. موسسه ملی بهداشت و ایمنی کشور آمریکا در روش شماره ۷۶۰۲ تعیین مقدار کمی کوارتز را در عدد موجی 800 cm^{-1} یا دامنه $670\text{--}820\text{ cm}^{-1}$ اعلام نموده است. همچنین برای تعیین مقدار کمی کریستوبالیت ارتفاع پیک در ناحیه عدد موجی 652 cm^{-1} پیشنهاد گردیده است.

۶. اندازه‌گیری سیلیس کریستالی با روش NIOSH ۷۶۰۲

روش NIOSH به شماره‌ی ۷۶۰۲ برای نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌های هوای محیط‌های شغلی حاوی گردوغبار سیلیس کریستالی به کار می‌رود. در این روش نمونه‌برداری با سیکلون و روش آنالیز با دستگاه اسپکتروفتومتری مادون قرمز پیشنهاد گردیده است.

۶-۱. نمونه‌برداری از سیلیس کریستالی

در روش NIOSH ۷۶۰۲، نمونه‌برداری از هوای محیط کار جهت تعیین ذرات قابل استنشاق سیلیس کریستالی و با استفاده از پمپ نمونه‌بردار فردی پیشنهاد شده است. وسایل موردنیاز جهت نمونه‌برداری به شرح ذیل می‌باشد:

- پمپ نمونه‌بردار فردی
- پیستون بدون اصطکاک (حباب صابون) و روتامتر جهت کالیبراسیون پمپ
- سیکلون جهت نمونه‌برداری فردی (شکل ۶) حاوی فیلتر پلی وینیل کلراید (PVC) با خلل و فرج ۵ میکرون و قطر ۳۷ میلی‌متر



شکل ۶- سیکلون جهت نمونه‌برداری از ذرات قابل استنشاق

طبق روش NIOSH ۷۶۰۲ سیکلون نایلونی با استفاده از پمپ نمونه‌برداری فردی با دبی ۱/۷ لیتر بر دقیقه یا سیکلون HD با دبی ۲/۲ لیتر بر دقیقه استفاده می‌شود. سیکلون با استفاده از گیره مخصوص به یقه لباس کارگر و پمپ به کمربند کارگر وصل می‌گردد. حجم نمونه‌برداری نیز بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ لیتر توصیه شده است.

پیستون بدون اصطکاک به عنوان یک استاندارد اولیه جهت کالیبراسیون پمپ نمونه‌بردار فردی استفاده می‌شود. حباب صابون به عنوان نوعی پیستون بدون اصطکاک یک شیشه مدرج شفاف است و محلول صابون در انتهای سیلندر فلومتر برای ایجاد

دستورالعمل کاربردی و رهنمودهای آزمایشگاهی - تخصصی در تعیین مواجهه تنفسی با سیلیس کریستالی

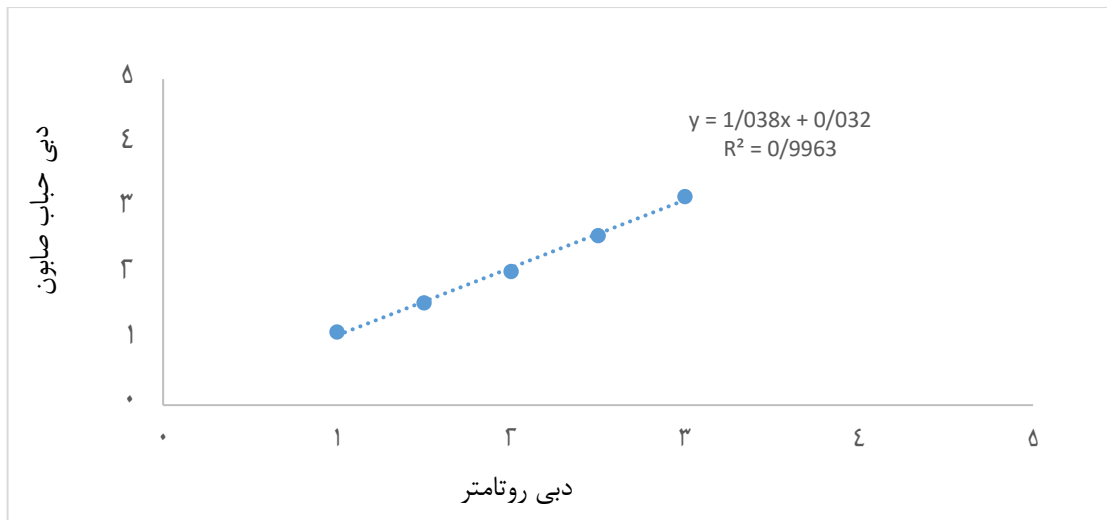
حباب صابون استفاده می شود. روتامتر از جمله وسایل کالیبراسیون ثانویه محسوب می شود که جریان هوای ورودی از قسمت پایینی روتامتر منجر به حرکت شناور آن به سمت بالا می شود. ارتفاع شناور فلوی جریان هوا را نشان می دهد. از آنجایی که حمل و نقل روتامتر به صنعت امکان پذیرتر است ابتدا روتامتر توسط حباب صابون کالیبره می گردد و سپس کالیبراسیون پمپ نمونه برداری با کمک حباب صابون کالیبره شده انجام می یابد. مراحل کالیبراسیون روتامتر با کمک فلومتر حباب صابون به شرح زیر می باشد:

- ورودی فلومتر حباب صابون را به روتامتر و خروجی آن را به پمپ نمونه برداری متصل کنید.
- با کمک پمپ نمونه بردار فردی فلوی روتامتر را به ترتیب بر روی ۵ دبی مختلف (۵ l/min - ۵/۳ - ۲ - ۱/۲ - ۱) تنظیم کنید و برای هر دبی (دبی ظاهری) یک دبی از فلومتر حباب صابون را به عنوان دبی واقعی قرائت کنید.
- با ترسیم دبی واقعی بر حسب دبی ظاهری یک منحنی کالیبراسیون تهیه کنید. به عنوان مثال دبی واقعی را بر روی محور Y و دبی ظاهری را به عنوان داده های محور X در نظر بگیرید و معادله ی خط کالیبراسیون را تعیین نمایید. فرض کنید داده های حاصل از کالیبراسیون روتامتر به شرح جدول ۷ می باشد.

جدول ۷ - کالیبراسیون روتامتر با فلومتر حباب صابون الکترونیکی

دبی حباب صابون l/min	دبی روتامتر l/min
۱/۱۲	۱
۱/۵۷	۱/۵
۲/۲۵	۲
۲/۶	۲/۵
۳/۲	۳

در این صورت معادله منحنی کالیبراسیون $Y = 1,006X + 0,152$ تعیین می شود (نمودار ۳).



نمودار ۴- منحنی استاندارد جهت کالیبراسیون روتامتر

- در معادله‌ی تعیین‌شده فلوی موردنظر جهت نمونه‌برداری (انتخاب‌شده بر اساس روش نمونه‌برداری) را به جای Y قرار دهید و میزان دبی روتامتر را تعیین نمایید.
- با استفاده از دبی تعیین‌شده برای روتامتر، نمونه‌برداری را انجام دهید. به‌عنوان مثال اگر هدف نمونه‌برداری با فلوی ۲ لیتر بر دقیقه می‌باشد با کمک معادله‌ی به‌دست‌آمده از نمودار ۵ میزان دبی روتامتر باید بر روی ۱/۸ لیتر بر دقیقه تنظیم گردد.

۶-۲. روش آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد سیلیس کریستالی

نمونه استاندارد کوارتز جهت تعیین مواجهه تنفسی با سیلیس کریستالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به جهت تهیه‌ی نمونه‌های استاندارد سیلیس، محدوده‌ی غلظتی استانداردها باید تقریباً مطابق با غلظت‌های محیط کار باشد. بنابراین طبق پیشنهاد روش NIOSH۷۶۰۲ لازم است ترازویی فراهم شود که جرمی در حول و حوش ۰/۰۰۱ میلی‌گرم را توزین نماید. از آنجایی که تأمین ترازویی با دقت یک میلیونیم گرم در همه‌ی آزمایشگاه‌های کشور فراهم نمی‌گردد یک روش تجربه‌شده و اعتباربخشی گردیده در آزمایشگاه‌های دانشکده‌ی بهداشت و ایمنی شهید بهشتی پیشنهاد می‌شود.

وسایل و مواد مورد نیاز

- پتاسیم بروماید، استون، پودر کوارتز با درصد خلوص ۹۹/۹٪
- فیلتر پلی وینیل کلراید (PVC) با خلل و فرج ۵ میکرون و قطر ۳۷ میلی‌متر
- پنس فلزی جهت نگهداری فیلتر، بوته چینی و بشقابک چینی (شکل ۷)
- ترازوی حساس ۰/۰۰۰۱ گرم، همزن مغناطیسی، مگنت، کوره باقابلیت ایجاد دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷- بوته چینی و بشقابک چینی

مراحل آماده سازی نمونه های استاندارد به شرح ذیل می باشد:

۱. پودر کوارتز را با کمک هاون به ذرات کاملاً ریز تبدیل کنید (شکل ۸).



شکل ۸- ساییدن پودر کوارتز

۲. چهار میلی گرم کوارتز ساییده شده را توزین کنید.
۳. در یک ویال درپوش دار مگنتی وارد کنید. ۸ میلی لیتر استون و کوارتز توزین شده را به داخل ویال اضافه نمایید.
۴. با استفاده از همزن مغناطیسی ۴ تا ۵ دقیقه و با قدرت بالای همزن محلول داخل ویال را به هم بزنید تا سوسپانسیون تولید گردد، تمامی ذرات سیلیس معلق شود و هیچ ذره ای در کف ظرف وجود نداشته باشد.
۵. رسم منحنی کالیبراسیون در ۶ مقدار جرمی تهیه می شود. فرض کنید این مقادیر با توجه به محدوده ی پیشنهادی روش NIOSH ۷۶۰۲ با مقادیر ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ میکروگرم در نظر گرفته شود. مقدار حجم مورد نیاز از سوسپانسیون کوارتز در جدول ۸ مشخص گردیده است.

دستورالعمل کاربردی و رهنمودهای آزمایشگاهی - تخصصی در تعیین مواجهه تنفسی با سیلیس کریستالی

جدول ۸- میزان حجم موردنیاز از سوسپانسیون سیلیس جهت تهیه منحنی استاندارد

جرم سیلیس (میکروگرم)	حجم سوسپانسیون (میکرو لیتر)
۱۰	۲۰
۳۰	۶۰
۶۰	۱۲۰
۸۰	۱۶۰
۱۰۰	۲۰۰
۱۶۰	۳۲۰

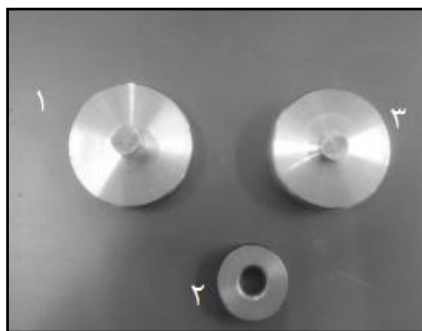
۶. شش بوته چینی را شماره گذاری کنید و در هر بوته چینی حجم موردنیاز برای تهیه یک غلظت استاندارد را وارد نمایید و اجازه دهید تا استون در دمای اتاق تبخیر شود.
۷. ۲۰۰ میلی گرم پتاسیم بروماید و یک فیلتر پلی وینیل کلراید در هر بوته چینی قرار دهید.
۸. بر روی هر بوته بشقابک چینی قرار دهید.
۹. دمای کوره را بر روی ۶۰۰ درجه سانتی گراد تنظیم کنید.
۱۰. بوته های چینی حاوی استاندارد را به مدت ۲ ساعت در داخل کوره حرارت دهید.
۱۱. پس از ۳ ساعت بوته چینی را از کوره خارج نمایید.

۳-۶. تهیه منحنی کالیبراسیون

تهیه منحنی کالیبراسیون از نمونه های استاندارد برای تعیین نمونه های مجهول یک ضرورت می باشد. برای تهیه منحنی استاندارد باید قرصی از نمونه های استاندارد تهیه و با کمک دستگاه مادون قرمز با تبدیل فوریه آنالیز گردد. مراحل تهیه منحنی کالیبراسیون به شرح ذیل می باشد:

۱. نمونه های استاندارد تهیه شده را با دقت به هاون انتقال دهید (شکل ۸) به طوری که تمامی پودر موجود در بوته چینی به هاون انتقال داده شود.
۲. پودر نمونه های استاندارد را در هاون به خوبی پودر نمایید (شکل ۸).
۳. نمونه های پودر شده را بر روی قالب سه بخشی (۱۳ میلی متری) از دستگاه FT-IR انتقال دهید (شکل ۸). این قالب بسته به برند دستگاه ممکن است شکل های مختلفی دارا باشد. همان طوری که در قالب مذکور مشاهده می شود بخش

۲ بر روی بخش ۱ قرار داده می‌شود سپس نمونه‌ی استاندارد در وسط بخش ۲ ریخته می‌شود و بخش ۳ بر روی این مجموعه قرار می‌گیرد تا قالب شکل ۹ فراهم شود.



شکل ۹- قالب سه‌بخشی

توجه کنید هنگام انتقال پودر از هاون به داخل حفره‌ی قالب دقت شود که پودر به بیرون از قالب ریخته نشود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰ - قالب تهیه قرص در دستگاه FT-IR

۴. پودر نمونه‌های استاندارد را در داخل حفره قالب صاف و یکنواخت کنید.

۵. قالب تهیه قرص را به زیر پرس از دستگاه FT-IR انتقال دهید (شکل ۱۱).



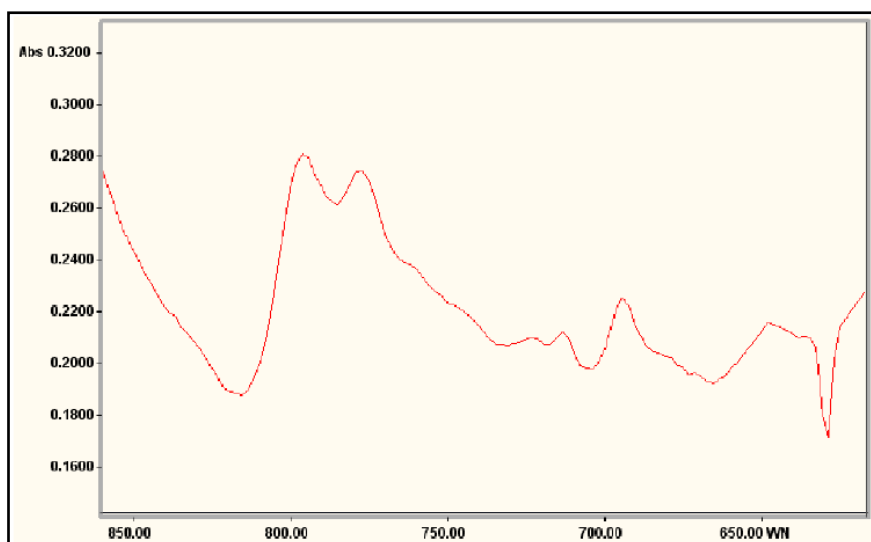
شکل ۱۱- دستگاه پرس در دستگاه FT-IR

۶. از طریق چرخاندن دسته‌ای در بالای پرس، بخش بالای پرس را، بر روی قالب سه‌بخشی محکم کنید.
۷. با دسته‌ی سمت راست دستگاه پرس، فشار را تا ۲۰ مگا پاسکال افزایش دهید.
۸. پس از ۲ دقیقه با پیچ موجود در قسمت جلو و پایین دستگاه پرس، قالب سه‌تکه‌ای را آزاد کنید تا در بخش میانی از قالب سه‌تکه‌ای قرصی شفاف ایجاد گردد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- قرص تهیه‌شده در قالب دستگاه FT-IR

۹. قرص‌های تهیه‌شده از نمونه‌های استاندارد را در داخل دستگاه FT-IR قرار دهید.
۱۰. طیف FT-IR در ناحیه $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ تهیه کنید.
۱۱. در اسپکتروگرام تهیه‌شده، با کمک نرم‌افزار دستگاه سطح زیر پیک در دامنه‌ی $820 - 670 \text{ cm}^{-1}$ را تعیین نمایید (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ - اسپکتروگرام سیلیس در نمونه استاندارد

۱۲. سطح زیر پیک را به عنوان پاسخ دستگاه در هر غلظت جرمی از نمونه‌ی استاندارد ثبت کنید.

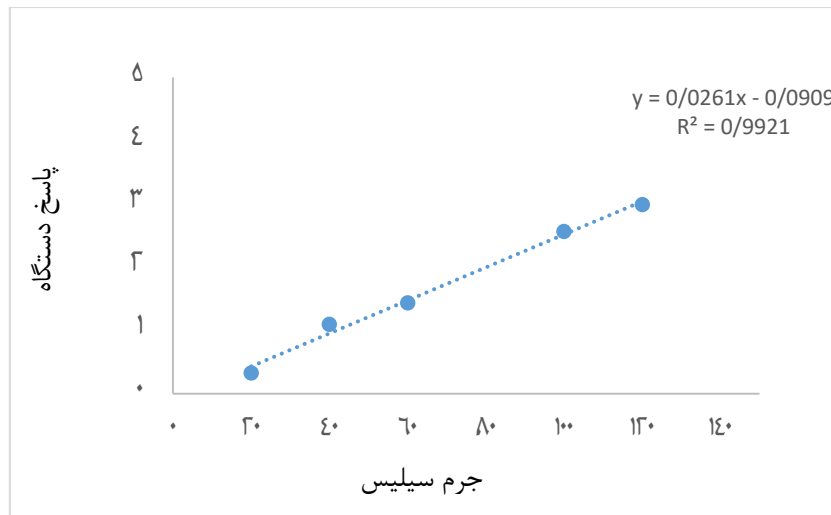
۱۳. با کمک نرم افزار اکسل منحنی کالیبراسیون را ترسیم کنید میزان جرم سیلیس در جدول ۴ در محور X و پاسخ دستگاه به عنوان داده‌های محور Y قرار داده شود.

برای مثال غلظت استانداردها و سطح زیر پیک هر نمونه‌ی استاندارد با اعداد جدول ۹ در نظر گرفته شده است.

جدول ۹- میزان حجم موردنیاز از سوسپانسیون سیلیس جهت تهیه منحنی استاندارد

پاسخ دستگاه	جرم سیلیس (میکروگرم)
۰/۳۲۹	۲۰
۱/۰۹۷	۴۰
۱/۴۳۷	۶۰
۲/۵۶۶	۱۰۰
۲/۹۸۹	۱۲۰

منحنی استاندارد با ضریب رگرسیون ۰/۹۹۲۱ ایجاد می گردد (نمودار ۳).



نمودار ۶ - منحنی استاندارد جهت تعیین سیلیس کریستالی

۴-۶. تعیین نمونه‌های هوا

همان‌طوری که قبلاً نیز تأکید شد در روش NIOSH ۷۶۰۲، نمونه‌برداری از هوای محیط کار جهت تعیین ذرات قابل استنشاق سیلیس بلوره‌ای پیشنهاد شده است. اگر هدف تعیین ذرات قابل تنفس می‌باشد می‌توان طبق روش NIOSH ۰۵۰۰ نمونه‌برداری را انجام نمود و آنالیز را با دستگاه FT-IR انجام داد. قبل از تهیه‌ی نمونه‌ی هوا جهت حذف رطوبت، فیلترهای پلی وینیل کلرید به مدت یک روز در دسیکاتور قرار داده شوند و با خروج فیلترها از دسیکاتور توسط ترازوی ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شوند. بعد از نمونه‌برداری نیز، فیلترها شامل نمونه اصلی و شاهد به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور قرار گرفته و توزین می‌گردند. تعیین میزان گردوغبار کل طبق روش NIOSH ۰۵۰۰ با فرمول زیر فراهم می‌شود.

وزن فیلتر نمونه قبل از نمونه‌برداری - وزن فیلتر نمونه بعد از نمونه‌برداری = A

وزن فیلتر شاهد قبل از نمونه‌برداری - وزن فیلتر شاهد بعد از نمونه‌برداری = B

(m^3) حجم هوای نمونه‌برداری / $(A-B)$ = مقدار گردوغبار کل

طبق روش NIOSH ۰۵۰۰ میزان گردوغبار کل برای ۱۰۰ لیتر هوای نمونه‌برداری شده باید در رنج ۱ تا ۲۰ میلی گرم بر مترمکعب قرار گیرد.

اگر نمونه‌ی تهیه‌شده در این محدوده تعیین مقدار شود، در مرحله بعد فیلترهای نمونه و شاهد بر اساس مراحل زیر تعیین مقدار می‌گردد:

۱. ۲۰۰ میلی گرم برمید پتاسیم را در یک بوته چینی بریزید.
۲. فیلتر نمونه‌برداری شده را درون بوته چینی قرار دهید (شکل ۱۴).
۳. بشقابک بوته چینی را بر روی آن گذاشته و به مدت ۴ ساعت در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دهید.



شکل ۱۴- نمونه‌ی هوا از سیلیس

۴. سه ساعت پس از خاموش بودن کوره محتویات بوتله چینی را به هاون دستگاه FT-IR انتقال دهید.
۵. پودرهای داخل هاون را به خوبی بسایید.
۶. با محتویات داخل هاون قرص FT-IR تهیه کنید.
۷. قرص‌های تهیه‌شده از نمونه‌های هوا را در داخل دستگاه FT-IR قرار دهید.
۸. طیف FT-IR در ناحیه $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ تهیه کنید.
۹. در اسپکتروگرام تهیه‌شده، با کمک نرم‌افزار دستگاه سطح زیر پیک در دامنه‌ی $820 - 670 \text{ cm}^{-1}$ را تعیین نمایید.
۱۰. پاسخ دستگاه را به‌عنوان عدد Y در معادله‌ی منحنی کالیبراسیون قرار دهید و مقدار X را به‌عنوان جرم نمونه مجهول گزارش کنید.
۱۱. تفاوت جرم نمونه و شاهد را بر حجم هوای نمونه‌برداری (m^3) تقسیم نموده و به‌عنوان میزان مواجهه تنفسی اعلام کنید.

۸. منابع

۱. Boussaa S, Kheloufi A, Zaourar NB, Kerkar F. Valorization of Algerian Sand for Photovoltaic Application. *Acta Physica Polonica, A.* ۲۰۱۶ Jul ۱;۱۳۰(۱).
۲. Parks CG, Conrad K, Cooper GS. Occupational exposure to crystalline silica and autoimmune disease. *Environmental health perspectives.* ۱۹۹۹ Oct;۱۰۷(suppl ۵):۷۹۳-۸۰۲.
۳. Weeks JL, Rose C. Metal and non-metal miners' exposure to crystalline silica, ۱۹۹۸-۲۰۰۲. *American journal of industrial medicine.* ۲۰۰۶ Jul;۴۹(۷):۵۲۳-۳۴.
۴. Bang KM, Mazurek JM, Wood JM, White GE, Hendricks SA, Weston A. Silicosis mortality trends and new exposures to respirable crystalline silica—United States, ۲۰۰۱-۲۰۱۰. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report.* ۲۰۱۵ Feb ۱۳;۶۴(۵):۱۱۷.
۵. Meldrum M, Howden P. Crystalline silica: variability in fibrogenic potency. *Annals of Occupational Hygiene.* ۲۰۰۲ Jan ۱;۴۶(suppl_۱):۲۷-۳۰.
۶. Mankar P, Mandal BB, Chatterjee D. Monitoring and Assessment of Airborne Respirable Limestone Dust and Free Silica Content in an Indian Mine. *Journal of health & pollution.* ۲۰۱۹ Sep;۹(۲۳).
۷. Guénel P, Breum NO, Lynge E. Exposure to silica dust in the Danish stone industry. *Scandinavian journal of work, environment & health.* ۱۹۸۹ Apr ۱:۱۴۷-۵۳.
۸. Shinohara Y, Kohyama N. Quantitative analysis of tridymite and cristobalite crystallized in rice husk ash by heating. *Industrial health.* ۲۰۰۴;۴۲(۲):۲۷۷-۸۵.
۹. Hoy RF, Chambers DC. Silica-related diseases in the modern world. *Allergy.* ۲۰۲۰ Nov;۷۵(۱۱):۲۸۰۵-۱۷.
۱۰. Cherrie JW, Gorman Ng M, Shafrir A, Van Tongeren M, Mistry R, Sobey M, Corden C, Rushton L, Hutchings S. Health, socio-economic and environmental aspects of possible amendments to the EU Directive on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens and mutagens at work. *Edinburg: Institute for Occupational Medicine.* ۲۰۱۱ May.
۱۱. Muhle H, Kittel B, Ernst H, Mohr U, Mermelstein R. Neoplastic lung lesions in rat after chronic exposure to crystalline silica. *Scandinavian journal of work, environment & health.* ۱۹۹۵ Jan ۱:۲۷-۹.
۱۲. Saffiotti U, Daniel LN, Mao Y, Shi X, Williams AO, Kaighn ME. Mechanisms of carcinogenesis by crystalline silica in relation to oxygen radicals. *Environmental health perspectives.* ۱۹۹۴ Dec;۱۰۲(suppl ۱۰):۱۵۹-۶۳.

۱۳. Cullinan P, Reid P. Pneumoconiosis. Primary Care Respiratory Journal. ۲۰۱۳ Jun;۲۲(۲):۲۴۹-۵۲.
۱۴. Steenland K, Mannetje A, Boffetta P, Stayner L, Attfield M, Chen J, Dosemeci M, DeKlerk N, Hnizdo E, Koskela R, Checkoway H. Pooled exposure-response analyses and risk assessment for lung cancer in ۱۰ cohorts of silica-exposed workers: an IARC multicentre study. Cancer Causes & Control. ۲۰۰۱ Nov;۱۲(۹):۷۷۳-۸۴.
۱۵. Jalali M, Sakhvid MJ, Bahrami A, Berijani N, Mahjub H. Oxidative stress biomarkers in exhaled breath of workers exposed to crystalline silica dust by SPME-GC-MS. Journal of research in health sciences. ۲۰۱۶;۱۶(۳):۱۵۳.



**FTIR device application in
determining occupational exposure to
crystalline silica and mineral oil**