

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی

امکان‌سنجی مهار آلاینده‌های اتوبوس‌های پایانه‌های داخل شهری در حالت کار درجا

اساتید راهنما

دکتر بازارگان

دکتر موسوی نائینیان

حسین خدادادی    علیرضا دشتی اردکانی

## چکیده

امروزه یکی از مسائل روز جهان و به تبع آن کشور بحث آلودگی هوا است و از میان منابع آلوده کننده هوا، سهم عمده از آن خودروها می‌باشد. یکی از منابع آلودگی هوا کارکردن درجای خودروها و به‌خصوص اتوبوس‌های مسافربری است. در این پروژه به مسئله کارکرد درجایی اتوبوس‌ها و پیشنهاد روشی برای مهار آلاینده‌های آنها پرداخته‌ایم. برای این کار در بخش ۱ به معرفی علل کار درجای اتوبوس‌ها و ضرورت آن پرداخته‌ایم و بیان شده است که اگرچه بسیاری از کارکرد درجای خودروها غیرضروری و قابل جلوگیری است، مقداری از این کار درجا چه به لحاظ زیست محیطی و چه به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. سپس به این مطلب پرداخته‌ایم که در میان انواع کار درجای خودروها، آنچه که در پایانه‌های اتوبوس‌رانی اتفاق می‌افتد دارای وضعیت ویژه‌ای است. این‌گونه که در پایانه‌های اتوبوس‌رانی تعداد زیادی اتوبوس در حال درجا کارکردن هستند و میزان قابل توجهی آلاینده وارد هوا می‌کنند و چون همگی به صورت ایستا و در یک مکان مشخص قرار دارند با این خودروهای داخل پایانه می‌توان همچون یک منبع غیر متحرک تولید آلاینده برخورد کرد. پس از آن که در بخش ۲ به معرفی انواع آلاینده‌ها پرداخته‌ایم، در بخش‌های ۳ و ۴ دو روش مهم مهار منابع ایستای تولید آلاینده‌های هوا، یعنی زیست‌پالایش و کاتالیست کانورتور، را معرفی کردیم. در بخش ۵ به پایانه‌ی آزادی پرداختیم و برآوردی از میزان غلظت و دبی بخش اتوبوس‌های عادی پایانه آزادی ارائه کردیم. در نهایت طرح‌هایی برای مهار آلاینده‌های تولیدی ارائه کرده و دو سیستم زیست‌پالایش و کاتالیست کانورتور را برای این مسئله‌ی خاص با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

## فهرست

۱	مقدمه
۳	۱. شرح مسئله
۳	۱.۱. دلایل درجاکار کردن اتوبوسهای دیزلی
۵	۲. عمده‌ترین آلاینده‌های دود آگزوز اتوبوس‌ها
۵	۱.۲. کربن مونواکسید
۵	۱.۱.۲. منابع کربن مونواکسید
۷	۲.۱.۲. فرآیند شیمیایی تشکیل کربن مونواکسید
۸	۳.۱.۲. غلظت و توزیع کربن مونواکسید
۹	۴.۱.۲. طرق از بین رفتن کربن مونواکسید اتمسفری
۹	۵.۱.۲. اثرات کربن مونواکسید بر روی انسان
۱۱	۲.۲. اکسیدهای نیتروژن
۱۱	۱.۲.۲. منابع اکسیدهای نیتروژن
۱۲	۲.۲.۲. اکسیدهای نیتروژن به عنوان آلاینده
۱۳	۳.۲.۲. شیمی تشکیل اکسیدهای نیتروژن
۱۵	۴.۲.۲. چرخه نوری نیتروژن دی‌اکسید
۱۷	۵.۲.۲. طرق از بین رفتن $NOx$ اتمسفری
۱۷	۶.۲.۲. تأثیرات $NOx$ بر روی انسان
۱۸	۳.۲. اکسیدهای سولفور
۱۸	۱.۳.۲. منابع سولفور اکسیدها
۲۰	۲.۳.۲. شیمی تشکیل $SOx$
۲۱	۳.۳.۲. طرق از بین رفتن $SOx$ اتمسفری
۲۳	۴.۳.۲. تأثیرات $SOx$ بر روی انسان
۲۵	۴.۲. ذرات معلق
۲۶	۱.۴.۲. منابع ذرات معلق
۲۸	۲.۴.۲. ترکیب شیمیایی ذرات معلق
۲۹	۳.۴.۲. اندازه ذرات معلق
۳۰	۴.۴.۲. سرنوشت ذرات معلق اتمسفری
۳۰	۵.۴.۲. غلظت‌های ذرات معلق
۳۱	۶.۴.۲. اثرات ذرات معلق بر روی انسان
۳۲	۷.۴.۲. اثرات ذرات معلق بر روی بینایی و مقدار تابش اشعه خورشید به سطح زمین
۳۳	۸.۴.۲. ذرات معلق آلی
۳۴	۵.۲. هیدروکربن‌ها
۳۵	۱.۵.۲. منابع هیدروکربن‌ها
۳۶	۲.۵.۲. تأثیر هیدروکربن‌ها بر روی انسان‌ها
۳۸	۳. کاتالیست کانورتورها
۳۸	۱.۳. تئوری اکسیداسیون کاتالیتیک (تحریک شونده)

۴۰	۲.۳ کارکرد سیستم‌های اکسیداسیون تحریک شونده
۴۱	۳.۳ بازدهی حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs)
۴۲	۴.۳ درباره طراحی سیستم‌های اکسیداسیون تحریک‌شونده
۴۳	۵.۳ کاربردهای صنعتی متداول
۴۳	۶.۳ بار آلاینده
۴۴	۷.۳ اقدامات پیش تصفیه‌ی مورد نیاز، بر روی گاز پسماند
۴۴	۸.۳ مزیت‌های فن‌آوری کاتالیتیک و معایب آن
۴۶	۹.۳ اکسیداسیون فوتوکاتالیتیک
۵۰	۴. سیستم‌های زیست‌پالاینده
۵۰	۱.۴ معرفی زیست‌پالایش
۵۱	۲.۴ فرآیندهای واقع در بستر یک زیست‌پالاینده
۵۲	۳.۴ درباره‌ی ریزجانداران
۵۴	۱.۳.۴ تثوری
۵۶	۲.۳.۴ دسته بندی میکروبی
۵۷	۱.۲.۳.۴ ریخت‌شناسی
۵۸	۲.۲.۳.۴ نیاز به اکسیژن
۵۹	۳.۲.۳.۴ مواد شبکه‌ای و منبع انرژی
۶۱	۴.۲.۳.۴ دما
۶۲	۳.۳.۴ مواد مورد نیاز برای رشد و عملکرد بهینه ریزجانداران
۶۳	۱.۳.۳.۴ عناصر اصلی
۶۴	۲.۳.۳.۴ مواد غذایی فرعی
۶۴	۳.۳.۳.۴ آنزیم‌ها
۶۵	۴.۳.۳.۴ فاکتورهای رشد
۶۵	۴.۴ عوامل موثر بر کیفیت عملکرد بستر زیست‌پالاینده
۶۶	۱.۴.۴ مقدار رطوبت
۶۸	۲.۴.۴ دما
۶۸	۳.۴.۴ مقدار pH بستر زیست‌پالاینده
۶۹	۴.۴.۴ افت فشار
۶۹	۵.۴ سیستم‌های متداول تصفیه زیستی
۷۰	۱.۵.۴ بیوفیلتر
۷۱	۱.۱.۵.۴ مزایای بیوفیلتر
۷۱	۲.۱.۵.۴ معایب بیوفیلتر
۷۱	۲.۵.۴ بیوتریکلینگ فیلتر
۷۲	۱.۲.۵.۴ مزایای بیوتریکلینگ فیلتر
۷۳	۲.۲.۵.۴ معایب بیوتریکلینگ فیلتر
۷۳	۳.۵.۴ بیواسکرابر
۷۴	۱.۳.۵.۴ مزایای بیواسکرابر
۷۴	۲.۳.۵.۴ معایب بیواسکرابر
۷۵	۴.۵.۴ زیست‌پالاینده چندفازی
۷۷	۱.۴.۵.۴ مزایای زیست‌پالاینده‌های چندفازی
۷۸	۶.۴ بررسی حذف آلاینده‌های خودروها توسط فن‌آوری زیست‌پالایش
۷۹	۱.۶.۴ بررسی حذف اکسیدهای نیتروژن و گوگرد توسط زیست‌پالاینده‌ها

۷۹	۲.۶.۴ بررسی حذف کربن مونواکسید توسط زیست‌پالاینده‌ها
۸۰	۳.۶.۴ بررسی حذف ذرات معلق توسط زیست‌پالاینده‌ها
۸۱	۴.۶.۴ بررسی حذف هیدروکربن‌ها توسط زیست‌پالاینده‌ها
۸۱	۷.۴ اقدامات قبل از طراحی
۸۲	۸.۴ طراحی
۸۷	۵. امکان‌سنجی
۸۷	۱.۵ برآوردی از غلظت آلاینده‌های یک اتوبوس داخل شهری
۹۳	۲.۵ برآورد دبی جریان آلوده برای اتوبوس‌های پایانه آزادی
۹۶	۳.۵ پیشنهاد چند طرح و مقایسه فن‌آوری‌های زیست‌پالایش و کاتالیست کانورتور
۹۷	۱.۳.۵ تحلیل مصرف مواد اولیه
۹۸	۲.۳.۵ مقایسه هزینه فن‌آوری‌های پالاینده
۱۰۲	۳.۳.۵ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی
۱۰۳	منابع

## مقدمه

موضوع محیط زیست در سال های اخیر جزء مباحث مهم جوامع انسانی می باشد. امروزه با پیشرفت صنایع خطرانی برای پاکیزگی محیط زیست به وجود آمده و آلودگی های خاک و آب و هوا، زندگی موجودات زنده را تحت تأثیر قرار داده است. از مسائل عمده ای که ساکنین شهرها دست به گریبان آن هستند آلودگی هواست که مشکلات بهداشتی و روانی متعددی را باعث شده است. سالهاست که در جوامع مختلف جهت کاهش آلودگی هوای شهرها قوانینی مبنی بر دور بودن کارخانجات از حریم مناطق مسکونی وضع شده است. اما جدا از این که این قوانین تا چه حد رعایت می شوند بخش عظیمی از تولیدکنندگان آلاینده ها یعنی خودروها در قلب شهرها در تردداند. لذا امروزه اصلی ترین چالش کسانی که به سلامت انسان ها توجه دارند مهار آلودگی خودروهای داخل شهری است.

در میان خودروهای درحال تردد کلان شهرهایی همچون تهران، تعداد قابل توجهی اتوبوس وجود دارد. اگرچه بر روی بسیاری از این اتوبوس ها علامت EURO II درج شده است، افرادی که هر روز با این اتوبوس ها سر و کار دارند به خوبی می دانند که بسیاری از آن ها دارای آلاینده گی قابل توجهی هستند. تجربه ی مشاهده ی خروج دود قابل رویت از اگزوز این خودروها و دچار سردرد و حالت تهوع شدن برای بسیاری از کسانی که معمولاً پایانه های اتوبوس رانی محل تردد روزانه ی آن هاست امری طبیعی است. اگرچه اخیراً بسیاری از این اتوبوس ها CNG سوز شده اند و این امید وجود داشت که میزان آلاینده های اتوبوس ها کاهش یابد اما این نکته که شرکت ایران خودرو (تولید کننده ی اصلی بسیاری از اتوبوس های داخل شهری) استاندارد زیست محیطی اتوبوس های CNG سوز و گازوئیل سوز را مانند هم و EURO II اعلام کرده است (رجوع کنید به فصل ۵) نشان دهنده ی این است که توفیق چندانی حاصل نشده است.

در این میان هرچند همواره امید اصلی برای کاهش آلودگی خودروها به روش های بهینه سازی کارکرد موتور و بهتر کردن کیفیت سوخت بوده و هست، در اوضاع و احوالی خاص روش های مهار آلودگی پس از تولید

آلاینده، نیز مفید است. در این پایان‌نامه به یکی از همین روش‌های مهار آلودگی هوا پس از تولید آن پرداخته‌ایم. وضعیت خاص پایانه‌های اتوبوس‌رانی با ده‌ها اتوبوس در هر کدام و صدها مسافری که روزانه به این پایانه‌ها رفت و آمد می‌کنند یکی از موارد با اهمیت است. هم از این رو که تعداد زیادی اتوبوس - که به دلایل مختلف باید دست کم چندین دقیقه درجا کار کنند - هوای مورد تنفس تعداد زیادی انسان که در نزدیکی آن‌ها قرار دارند را آلوده می‌کنند و هم از آن رو که اگرچه خودروها منابع متحرک آلودگی هوا قلمداد می‌شوند، اما اتوبوس‌های داخل پایانه‌ها را می‌توان منابع ایستای آلودگی هوا به شمار آورد و از روش‌های مهار آلودگی منابع ایستا استفاده کرد.

در این پایان‌نامه ابتدا به علل کار درجای اتوبوس‌ها، سپس به معرفی آلاینده‌های آن‌ها و بعد از آن به دو روش اصلی مهار منابع ایستای آلاینده‌ها پرداخته‌ایم. در نهایت طرح‌هایی اولیه و بحثی مبنی بر مزایا و معایب آن دو روش برای مسئله‌ی مورد نظر آورده شده است.

## ۱. شرح مسئله

در شهرهای بزرگ که بخش قابل توجهی از حمل و نقل عمومی بر عهده‌ی اتوبوس‌هاست با این پدیده مواجه‌ایم که این خودروها زمان‌های قابل توجهی درجا کار می‌کنند. اگر به شمار فزاینده‌ی اتوبوس‌ها نیز دقت کنیم متوجه می‌شویم که این کار درجا منبع مهمی در تولید آلاینده‌هاست. شکی نیست که در بسیاری مواقع کار کردن درجای یک وسیله‌ی نقلیه ضرورتی ندارد و باید با تغییر عادت رانندگان آن‌ها را به جلوگیری از کار درجای بیهوده تشویق کرد. اما دلایلی هم برای کار درجای مختصر خودروها وجود دارد. پس باید بدنبال راهی برای مهار آلاینده‌ی این خودروها بود. مسئله وقتی امیدوار کننده تر می‌شود که می‌بینیم مجموعه‌ای از خودروهایی که درجا کار می‌کنند همچون یک منبع ثابت تولید کننده‌ی آلاینده‌های هوا هستند و در نتیجه می‌توان از روش‌های مهار آلودگی منابع ثابت همچون کارخانجات نیز برای این مسئله استفاده کرد.

در ادامه به دلایل درجا کار کردن اتوبوس‌ها می‌پردازیم.

### ۱.۱ دلایل درجا کار کردن اتوبوس‌های دیزلی

۱. سیستم باز و بسته شدن درهای اتوبوس‌های حمل و نقل عمومی با فشار باد کار می‌کند که این فشار از طریق یک کمپرسور تأمین می‌شود. به طور میانگین اگر این کمپرسور بیش تر از ۲۰ دقیقه خاموش باشد، به طور اتوماتیک هوای درون کمپرسور تخلیه می‌شود و برای راه اندازی آن باید چند دقیقه‌ای قبل از مورد استفاده قرار گرفتن، روشن باشد.



۲. یکی دیگر از دلایل روشن گذاشتن موتور های دیزلی، استهلاک حرارتی قابل توجهی است که هنگام خاموش و روشن کردن پیاپی این موتورها به وجود می آید. از این رو رانندگان به خود این اجازه را می دهند که در فواصل زمانی بین کار خودرو موتور را خاموش نکنند.

۳. در ابتدای روشن کردن خودرو به دلیل سرد بودن موتور احتراق خوب صورت نمی گیرد و در نتیجه آلاینده‌ی قابل توجهی وارد هوا می شود.

۴. تجهیزات جانبی اتوبوس به کمک موتور کار می کنند؛ از جمله سیستم های سرمایش و گرمایش. طی مشاهدات میدانی ما که در فصل تابستان انجام شد بسیاری از رانندگان در فواصلی که اتوبوس ها را در پایانه ها نگهداری می کنند، سیستم تهویه اتوبوس را روشن کرده و در درون اتوبوس به استراحت می پردازند.

## ۲. عمده‌ترین آلاینده‌های دود اگزوز اتوبوس‌ها

### ۱.۲ کربن مونواکسید

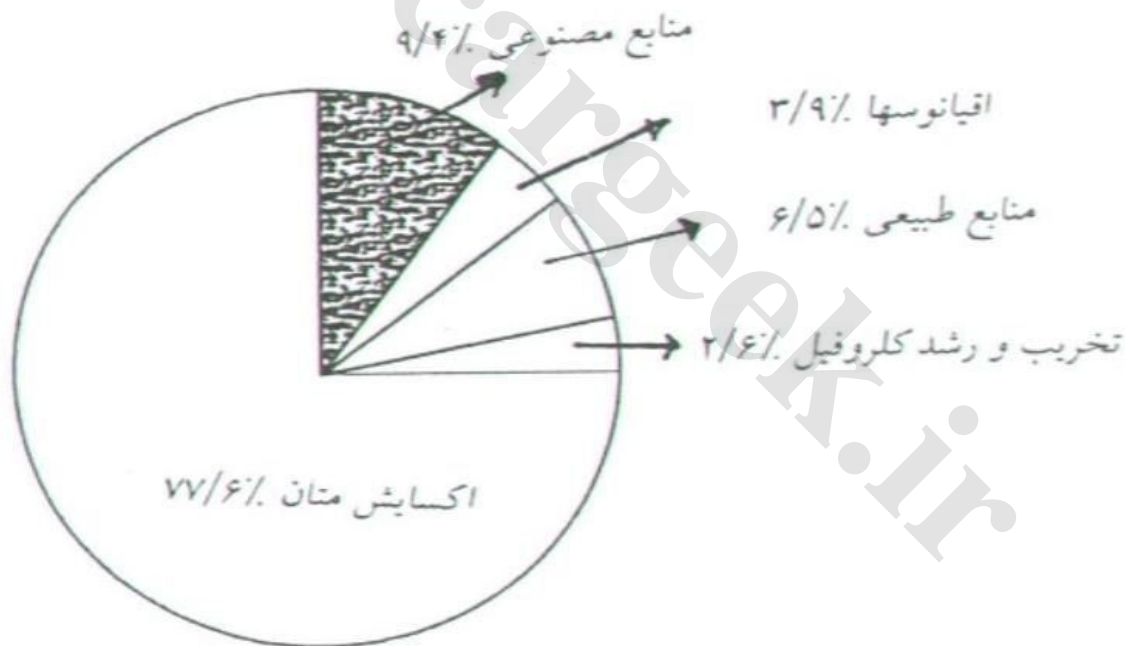
کربن مونواکسید ( $CO$ ) یکی از فراوان‌ترین و گسترده‌ترین آلاینده‌ها است که در اتمسفر یافت می‌شود. کربن مونواکسید گازی است که در دماهای بالاتر از نقطه جوشش ( $-192^{\circ}C$ ) بی‌رنگ، بی‌بو و بی‌مزه است. چگالی آن  $96/5$  درصد هوا است و به طور قابل ملاحظه‌ای غیر قابل حل در آب می‌باشد. این گاز قابل اشتعال است و با شعله آبی می‌سوزد.

### ۱.۱.۲ منابع کربن مونواکسید

منابع طبیعی و انسانی هر دو در تشکیل  $CO$  اتمسفر سهیم هستند. وجود  $CO$  در اگزوز اتومبیلها که نتیجه سوخت ضعیف و ناقص می‌باشد، کاملاً شناخته شده است. اولین بار در سال ۱۹۴۹ مشخص شد که  $CO$  سازنده بخش بسیار کوچکی از اتمسفر است. این تشخیص زمانی بود که خطوط جذبی در سیستم طیف نوری کشف شد. در نهایت، این مشاهدات به تحقیقات مختصری در مورد منابع طبیعی  $CO$  قبل از سال ۱۹۷۲ انجامید. ابتدا تصور می‌شد که سهم این منابع در مقایسه با نتایجی که از فعالیت‌های انسانی بدست آمده، بسیار جزئی است. ولی مطالعات بعد از ۱۹۷۲ خلاف این مسئله را نشان داد. منابع طبیعی در تولید  $CO$  نسبت به منابع انسانی سهم بیشتری دارند. مقدار کربن مونواکسیدی که از منابع طبیعی وارد اتمسفر می‌شود ۱۰ برابر مقدار  $CO$  تولیدی از منابع انسانی است. مقدار برآورد شده از انتشار  $CO$  توسط منابع طبیعی ۳۸۵۰ میلیون تن

در سال است. حداقل ۳۳۰۰ میلیون تن از اکسایش اتمسفری متان ( $CH_4$ ) بدست می‌آید که از پوسیدگی مواد آلی تولید می‌شود. رشد و پوسیدگی کلروفیل در گیاهان ۱۱۰ میلیون تن تولید می‌کنند و ۱۶۵ میلیون تن هم توسط اقیانوس‌ها آزاد می‌شود. متان منبع بیش از ۷۷ درصد  $CO$  اتمسفری طبیعی است که در نتیجه تجزیه مواد آلی فرو رفته در باتلاق‌ها، کشتزارهای برنج و مناطق گرمسیری جهان حاصل می‌شود. انتشار جهانی متان به مقدار حداقل ۱.۶ بلیون تن در سال تخمین زده شده است [۱].

اقیانوس‌ها دومین منبع تولید  $CO$  اتمسفری می‌باشند. گیاهان پست دریایی و سایر منابع بیولوژیکی، سهم قابل ملاحظه‌ای در تولید  $CO$  موجود در آبها را دارند. این  $CO$  متعاقباً در اتمسفر آزاد می‌شود. از آنجا که سطح آبها در تماس با اتمسفر می‌باشد، انتظار می‌رود که شامل  $CO$  جذب شده و حل شده از اتمسفر باشند (شکل ۱.۲).



شکل ۱.۲

## ۲.۱.۲ فرآیند شیمیایی تشکیل کربن مونواکسید

تشکیل کربن مونواکسید از منابع مصنوعی از یکی از فرآیندهای شیمیایی زیر ناشی می‌شود:

۱. سوخت ناقص کربن یا محصولات حاوی کربن؛ زمانی که اکسیژن کافی جهت سوخت وجود نداشته باشد به وقوع می‌پیوندد و به جای کربن دی‌اکسید،  $CO$  تولید می‌گردد.
۲. یک واکنش در حرارت بالا که بین  $CO_2$  و مواد حاوی کربن صورت پذیرد.
۳. در حرارت بالا  $CO_2$  به  $CO$  و  $O$  تجزیه می‌گردد.

فرآیند ۱: تشکیل اکسیدهای کربن، وقتی که کربن و اکسیژن خالص با هم ترکیب می‌گردند، فرآیند ساده‌ای است. اما در محیط‌هایی که سایر مواد حضور دارند و/یا غلظت مواد برای احتراق کامل مناسب نیست فرآیندها پیچیده‌تر اند. علیرغم پیچیدگی، پاره‌ای اصول کلی در خصوص این واکنش‌ها شناخته شده است. سوختن کربن در مواد سوختنی به شکل زیر انجام می‌شود:

واکنش اول تقریباً ده بار سریعتر از دومی انجام می‌شود.  $CO$  یک واسط است و اگر مواد سوختی و هوا به خوبی مخلوط نشده باشند اکسیژن به اندازه کافی موجود نخواهد بود و  $CO$  محصول نهایی می‌شود.

فرآیند ۲: واکنش مورد نظر در این فرآیند به صورت زیر می‌باشد:

این واکنش به آسانی در دماهای بالا، معمولاً در کوره‌های صنعتی رخ می‌دهد. CO تولید شده از این طریق در برخی موارد سودمند می‌باشد، مثلاً در کوره‌ها که به عنوان احیا کننده در تولید آهن از سنگ اکسید آهن عمل می‌کند.

فرآیند ۳: تحت شرایطی که اکسیژن کافی برای سوختن کامل وجود داشته باشد، هنوز ممکن است CO تولید شود. در دمای بالا  $CO_2$  مطابق واکنش تعادلی زیر تجزیه می‌شود:

افزایش حرارت به تولید CO و O کمک می‌کند. برای مثال، در دمای ۱۷۵۶ درجه سانتی گراد، ۱ درصد  $CO_2$  تجزیه می‌شود و در دمای ۱۹۴۰ درجه ۵ درصد آن تجزیه می‌شود. اگر یک مخلوط در حال تعادل در دمای بالا، ناگهان سرد شود CO موجود در ظرف باقی می‌ماند.

### ۳.۱.۲ غلظت و توزیع کربن مونواکسید

از آنجا که اتومبیل‌ها بزرگترین منبع مصنوعی انتشار CO هستند (۶۵.۶٪) [۱] مناطق پر جمعیت شهری غلظت بالایی از این آلاینده را نشان می‌دهند. غلظت روزانه بستگی به میزان ترافیک دارد. غلظت CO در هر منطقه، با سرعت ورود آن به اتمسفر، سرعت پراکندگی و از بین رفتن آن، مشخص می‌گردد. در مناطق شهری سرعت از بین رفتن خیلی پایین تر است، لذا سرعت پراکندگی مستقیماً به جهت و سرعت باد، تلاطم هوا و پایداری اتمسفر بستگی دارد. در شهرهای بزرگ اگرچه تلاطم به وسیله حرکت اتومبیل‌ها و جریان هوا در بالا و اطراف ساختمانها ایجاد می‌گردد، اما به طور موضعی دوره‌های طولانی از سکون هوا پیش می‌آید که منجر به پراکندگی ناکافی و در نتیجه افزایش تراکم CO در هوا می‌شود.

## ۴.۱.۲ طرق از بین رفتن کربن مونواکسید اتمسفری

فرآیندهای طبیعی کمک مؤثری در میزان پایین آوردن CO در اتمسفر می‌نمایند. در این فرآیندها، حقایق زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

۱. فعل و انفعالات اتمسفری جهت خارج نمودن CO بسیار کند صورت می‌گیرد. سرعت واکنش

$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$  در سطح پایین اتمسفر فقط ۰.۱ درصد CO موجود را در هر ساعت آفتابی

از بین می‌برد. (نور آفتاب برای این واکنش لازم است)

۲. اقیانوس‌ها بیشتر منابع تولید این گاز هستند تا جذب کننده آن

۳. درختان نمی‌توانند CO را از اتمسفر جمع آوری کنند.

۴. محدوده وسیعی از انواع خاک‌ها قادرند CO را از اتمسفر جمع آوری کنند. این فرآیند به شکل

بیولوژیکی در طبیعت به وجود می‌آید و ۱۴ نوع قارچ به عنوان عوامل مؤثر در این فرآیند شناخته

شده‌اند. سرعت زائل شدن CO بستگی به درجه حرارت و نوع خاک دارد. مثلاً خاک‌های زراعی به علت

عدم وجود مواد آلی در آن، کمتر از خاک‌های پوشیده از سبزی طبیعی CO جذب می‌کنند. خاک

مناطق گرمسیر بیشتر از همه و خاک صحراها کمتر از همه CO جذب می‌نمایند. مشخص شده است

که سرعت جذب، بین ۷.۵ تا ۱۰۹ میلی گرم در ساعت در متر مربع می‌باشد. این سرعت می‌تواند خاک

را به عنوان منبع مهم جذب CO تبدیل کند.

## ۵.۱.۲ اثرات کربن مونواکسید بر روی انسان

در گذشته می‌دانستند که اگر شخص در معرض CO با غلظت زیاد قرار بگیرد، خواهد مرد. ولی تأثیر CO با

میزان کم (۱۰۰ppm و یا کمتر) از حدود دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی کشف شده است. این حد غلظت از آن نظر

اهمیت دارد که معمولاً میزان CO هوای آلوده کمتر از ۱۰۰ppm می‌باشد.

کربن مونواکسید از آن نظر خطرناک است که قادر است با هموگلوبین خون (Hb) ترکیب شود. هموگلوبین به عنوان انتقال دهنده در خون عمل می‌کند و اکسیژن را به شکل  $O_2Hb$  (اکسی هموگلوبین) از شش‌ها به سلول‌های بدن و  $CO_2$  را از سلول‌ها به شش به صورت  $CO_2Hb$  می‌رساند. علاوه بر این، هموگلوبین می‌تواند ترکیبی با CO به شکل COHb به وجود آورد. هنگامی که چنین ترکیبی به وجود آمد، قدرت خون جهت انتقال اکسیژن کم می‌شود. میل ترکیبی CO با هموگلوبین ۲۰۰ برابر  $O_2$  است. در نتیجه اگر هر دو امکان وجود داشته باشند، COHb بیشتر از  $O_2Hb$  تشکیل می‌شود. اثرات CO بر روی موجودات زنده عموماً از نسبت درصد COHb در خون تعیین می‌شود. هنگامی که غلظت COHb پایین تر از ۲ درصد باشد، اثر چندانی بر روی سلامتی ندارد. برخی شواهد گواه بر آن است که غلظت COHb به میزان ۲ تا ۵ درصد تأثیر مخربی بر روی سلامتی دارد. شواهد مسلمی وجود دارد دال بر اینکه اشخاصی که مبتلا به امراض قلبی کرونرو آسم هستند، مخصوصاً در مقابل COHb با غلظت بیش از ۵ درصد، آسیب‌پذیر می‌باشند. میزان COHb خون مستقیماً با غلظت CO در هوایی که استنشاق می‌گردد، مربوط می‌شود. در مورد هوایی با غلظت مشخصی از CO میزان COHb خون در یک زمان مناسب، به حالت تعادل می‌رسد. این میزان تعادل COHb در خون تا زمانی که غلظت CO در هوای مورد استنشاق بدون تغییر است، ثابت می‌ماند. فرآیند سوخت و ساز، معادل ۰.۵ درصد COHb در افراد معمولی تولید می‌کند. مقادیر بیش از نیم درصد، دال بر وجود CO در هوا می‌باشد. درصد متعادل COHb در خون اشخاصی که پیوسته هوای آلوده به CO را با غلظت کمتر از ۱۰۰ppm استنشاق می‌کنند، از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$COHb\% = 0.16 \times (\text{ppm به هوا}) + 0.5$$

زمان لازم برای رسیدن COHb به حالت تعادل، با فرض ثابت بودن غلظت CO در هوا، بستگی به فعالیت شخصی دارد. مثلاً حالت تعادل در مورد شخصی که فعالیت شدید بدنی دارد، سریع‌تر حاصل می‌شود.

## ۲.۲ اکسیدهای نیتروژن

هشت نوع متفاوت اکسید ازت شناخته شده است ولی معمولاً فقط سه نوع آنها در اتمسفر یافت می‌شود. این سه نوع عبارت از: نیتروس اکسید ( $N_2O$ )، نیتریک اکسید ( $NO$ )، نیتروژن دی اکسید ( $NO_2$ ).

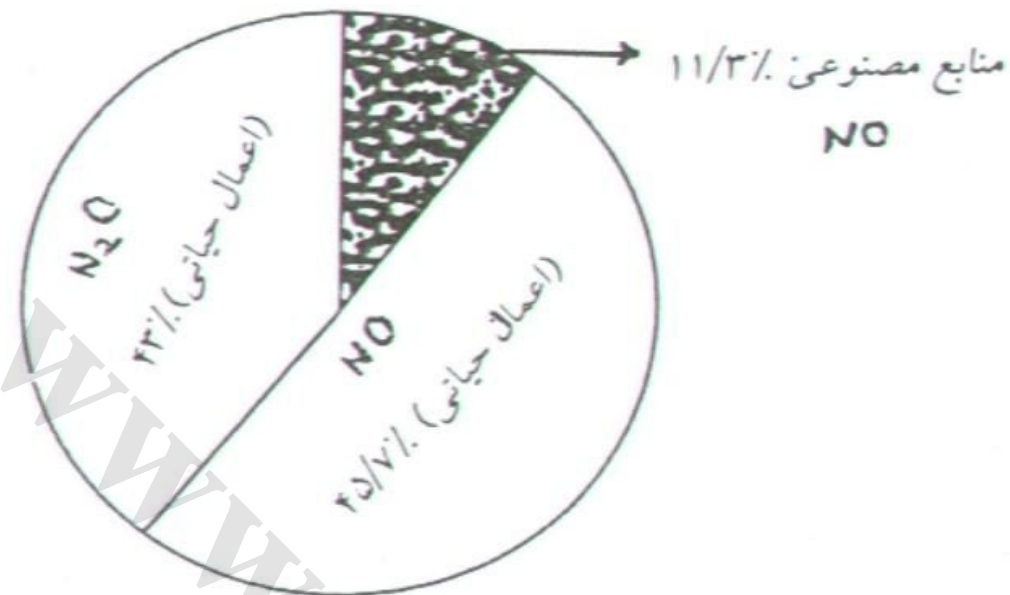
نیتروس اکسید، گازی بی‌رنگ، غیر قابل اشتعال و غیر سمی با مزه و بوی نسبتاً خوب است. نیتریک اکسید نیز بی‌رنگ و غیر قابل اشتعال ولی بی بو و سمی است. نیتروژن دی اکسید، گازی است با رنگ قرمز - قهوه ای، غیر قابل اشتعال و بی بو و شدیداً خفکان زا می‌باشد.

### ۱.۲.۲ منابع اکسیدهای نیتروژن

عمدتاً منابع طبیعی از منابع انسانی سهم بیشتری در انتشار این گازها دارند.  $NO$  اتمسفری به وسیله هر دو منبع طبیعی (۸۰٪) و انسانی تولید می‌شود، در حالی که تقریباً تمام  $N_2O$  منتشر شده در اتمسفر از یک منبع انسانی به وجود می‌آید. عمل تخمیر به وسیله باکتری‌ها در خاک به منظور تجزیه ترکیبات تشکیل دهنده ازت، منبع اصلی  $N_2O$  را تشکیل می‌دهد و این فرآیند سهم عمده‌ای در انتشار سالانه که ۵۹۲ میلیون تن  $N_2O$  برآورد شده است، دارد. عمل تخمیر باکتری‌ها همچنین مسئول تولید ۴۳۰ میلیون تن  $NO$  می‌باشد. اشعه‌های نوری باعث می‌شوند که ازت و اکسیژن اتمسفر، به روش‌های گوناگونی ترکیب شوند. احتراق منبع اصلی تولید مصنوعی (انسانی) اکسید نیتروژن است. در طی احتراق با دمای بالا، ازت و اکسیژن هوا با هم واکنش می‌دهند که هم  $NO_2$  و هم  $NO$  تشکیل می‌شود. مقدار نسبی  $NO_2$  و  $NO$  تولید شده به دمای احتراق و نسبت ازت به اکسیژن بستگی دارد. به هر حال مقدار  $NO_2$  حاصل از احتراق نسبت به  $NO$  بسیار کمتر است. از قراین موجود چنین بر می‌آید که تقریباً ۹ برابر اکسید ازت ( بر اساس حجم ) از منابع طبیعی وارد اتمسفر می‌شوند. یک چنین موقعیت مشابهی در مورد  $CO$  نیز وجود دارد. منابع طبیعی در سرتاسر زمین گسترده هستند، در حالی که منابع انسانی، در فضای کوچکی متمرکز هستند.



شکل ۲.۲ منابع اکسیدهای نیتروژن به همراه میزان آلاینده‌گی شان را نشان می‌دهد. (درصد حجمی)



شکل ۲.۲

### ۲.۲.۲ اکسیدهای نیتروژن به عنوان آلاینده

آلودگی هوا توسط اکسیدهای نیتروژن، بدون در نظر گرفتن مقادیر N<sub>2</sub>O موجود در اتمسفر، معمولاً بر حسب NO و NO<sub>2</sub> در نظر گرفته می‌شود. دلایل چنین عملی عبارت است از:

۱. NO و NO<sub>2</sub> سمی هستند، در حالیکه N<sub>2</sub>O چنین نیست.
۲. NO و NO<sub>2</sub> در واکنش‌های فتوشیمیایی اتمسفر سهمیه هستند ولی N<sub>2</sub>O نیست.
۳. NO و NO<sub>2</sub> منابع عمده مصنوعی دارند، در حالی که N<sub>2</sub>O ندارد. علامت NO<sub>x</sub> اغلب برای مجموعه‌ای از NO و NO<sub>2</sub> دخیل در آلودگی، بکار می‌رود.

## ۳.۲.۲ شیمی تشکیل اکسیدهای نیتروژن

تقریباً تمام  $NO$  و  $NO_2$  ناشی از منابع مصنوعی، توسط اکسایش ازت در طی احتراق در دمای بالا تولید می‌شود. ازت و اکسیژن هوا  $NO$  را به وجود می‌آورد و واکنش‌های بعدی  $NO$  با اکسیژن،  $NO_2$  را تولید می‌کند. هوا تقریباً از ۷۸ درصد ازت و ۲۱ درصد حجمی اکسیژن تشکیل شده است. در دمای معمولی، این دو گاز تمایل خیلی کمی به واکنش با یکدیگر دارند، زیرا واکنش  $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$  بسیار گرماگیر است. انرژی مطلوب فقط در دماهای بالا، مثل فرآیندهای احتراق داخل سیلندر ( ۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد )، قابل دسترس است. حتی در این دماها فقط مقدار کمی  $NO$  تولید می‌شود ولی این مقدار از لحاظ تغلیظ آلودگی هوا، دارای اهمیت است. جدول ۱.۲ میزان غلظت تعادلی و سرعت واکنش بر حسب تولید  $NO$  را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. این داده‌ها برای مخلوط گازهایی است که حاوی ۷۵ درصد  $N_2$  و ۳ درصد  $O_2$  می‌باشد که می‌تواند در دمای مشخص شده به تعادل برسد.

زمان برای تشکیل 500ppm $NO$ (ثانیه)	غلظت $NO$ در معادله (ppm)	درجه حرارت ( $^{\circ}C$ )
-	۱	۲۷
-	۰/۷۷	۵۲۷
۱۳۷۰	۵۵۰	۱۳۱۶
۱۶۲	۱۳۸۰	۱۵۳۸
۱/۱	۲۶۰۰	۱۷۶۰
۰/۱۱۷	۴۱۵۰	۱۹۸۰

جدول ۱.۲ غلظت تعادلی و سرعت تشکیل  $NO$  در دماهای مختلف

در طی احتراق، گازهای در حال واکنش برای مدت بسیار کوتاهی در دمای شعله هستند. از این رو اگر قرار است مقادیر زیادی NO تولید شود، سرعت واکنش باید زیاد شود. طبق جدول ۱.۲، سرعت واکنش در دمای پایین تر از ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، به طور نسبی پایین است ولی در دماهای بالاتر، به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین، زمان اقامت گازها در منطقه احتراق و همچنین دمای شعله، مقدار NO را که عملاً تشکیل می‌شود، مشخص می‌سازند. اگر مایعات دفعی احتراق همین که خارج می‌شوند، به آرامی سرد شوند، NO به O<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> برمی‌گردد. به هر حال در اغلب وسایل احتراقی، بخش عمده ای از انرژی حرارتی تولیدات گاز سریعاً به کار مفید برگردانده می‌شود و گازها سرد می‌شوند. تحت چنین شرایطی NO در دمای پایین تر در خروجی باقی می‌ماند، چرا که فرصت تجزیه شدن را ندارد. واکنش NO با اکسیژن، برای تشکیل NO<sub>2</sub> تحت شرایط احتراق صورت نمی‌گیرد. این مخالف حالتی است که CO فوراً واکنش می‌دهد تا تبدیل CO<sub>2</sub> شود. دلیل این موضوع، ناپایداری NO<sub>2</sub> در دماهای بالا است. در دمای ۱۵۰°C، NO<sub>2</sub> شروع به تجزیه شدن به NO و O<sub>2</sub> و در دمای ۶۰۰°C به طور کامل تجزیه می‌شود. نتیجه این که مقدار بسیار کمی NO<sub>2</sub> در مخلوط گازی، در دمای احتراق یافت می‌شود. NO و آب حاصل از احتراق هنگام ترک محفظه احتراق، در مخلوط شدن با هوا به سرعت سرد می‌شوند. هنگامی که دما به زیر ۶۰۰°C رسید مقدار کمی NO<sub>2</sub> تشکیل می‌شود. بنابراین عمده NO<sub>x</sub> منتشر شده، به صورت NO می‌باشد. در حدود ۱۰ درصد از NO<sub>x</sub> منتشر شده از کارخانجات و فقط ۲ تا ۳ درصد NO<sub>x</sub> تولیدی اتومبیل‌ها، به شکل NO<sub>2</sub> است.

جدول ۲.۲، زمان مطلوب برای اکسایش NO به NO<sub>2</sub> در دمای ۲۰°C را نشان می‌دهد. اگر چه ممکن است غلظت NO در محفظه احتراق، از ۱۰۰ppm بیشتر باشد، این غلظت در اثر رقیق شدن گازهای احتراقی با ترکیب شدن هوا، به سرعت کاهش می‌یابد.

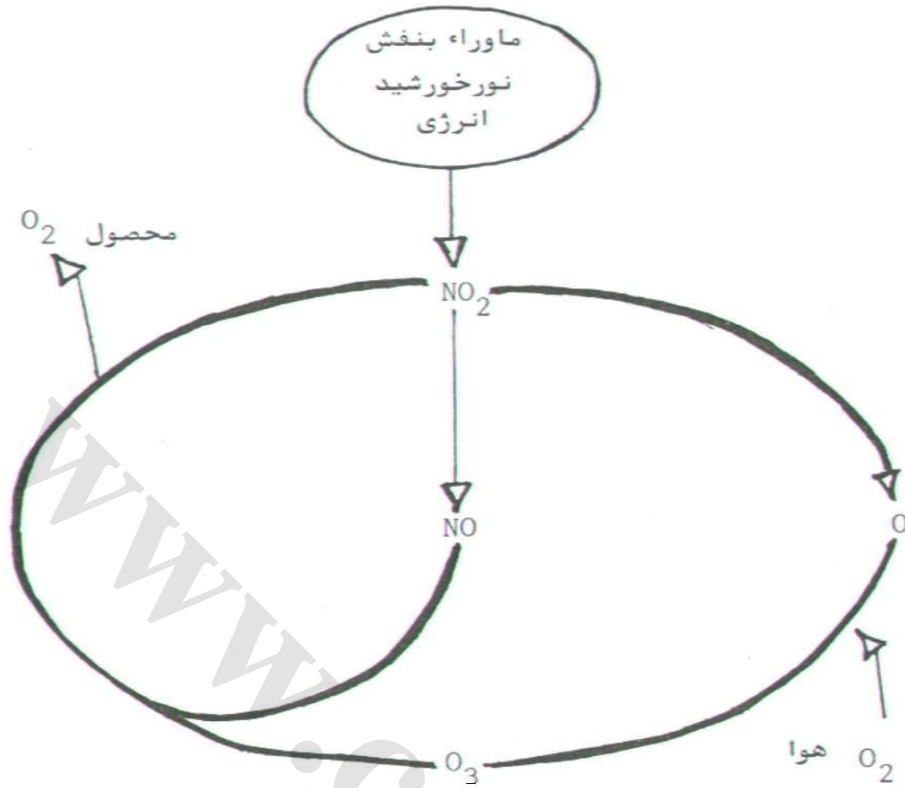
زمان اکسایش			غلظت NO (PPM)
٪۹۰	٪۵۰	٪۲۵	
۳/۶ دقیقه	۲۴ ثانیه	۸/۴ ثانیه	۱۰۰۰۰
۳۶ دقیقه	۴ دقیقه	۱/۴ دقیقه	۱۰۰۰
۶ ساعت	۴۰ دقیقه	۱۴ دقیقه	۱۰۰
۶۳ ساعت	۷ ساعت	۲/۳ ساعت	۱۰
۶۴۸ ساعت	۷۲ ساعت	۲۴ ساعت	۱

جدول ۲.۲ سرعت اکسایش نیتریک اکسید در هوا

#### ۴.۲.۲ چرخه نوری نیتروژن دی اکسید

در اتمسفر  $NO$  و  $NO_2$  هر دو درگیر یکسری واکنش‌های فتوشیمیایی که به طور طبیعی اتفاق می‌افتد، هستند. این واکنش‌ها که به عنوان چرخه نوری شناخته شده است به ترتیب شامل فرآیندهای زیر است:

۱.  $NO_2$  انرژی را از نور فرابنفش خورشید جذب می‌کند.
۲. انرژی جذب شده مولکول‌های  $NO_2$  را به مولکول‌های  $NO$  و اتم‌های اکسیژن  $O$  می‌شکند. اکسیژن اتمی تولید شده، بسیار فعال است.
۳. اتم‌های اکسیژن با اکسیژن اتمسفری ( $O_2$ ) واکنش می‌دهند و مولکول ازن ( $O_3$ )، یک آلاینده فرعی، تشکیل می‌شود.
۴. ازن با  $NO$  واکنش می‌دهد و در نتیجه  $NO_2$  و  $O_2$  به وجود می‌آید (شکل ۳.۲).



شکل ۳.۲ چرخه نوری  $\text{NO}_2$

اثر ویژه این چرخه، گردش سریع  $\text{NO}_2$  است. غلظت‌های محدود  $\text{NO}_2$  و  $\text{NO}$  تا زمانی که  $\text{O}_3$  و  $\text{NO}$  در کمیت‌های مساوی، تشکیل و نابود می‌شوند، تغییر نخواهد یافت.

## ۵.۲.۲ طرق از بین رفتن $\text{NO}_x$ اتمسفری

روند کاملاً مؤثر از بین رفتن  $\text{NO}_x$  در اتمسفر، تبدیل اکسیدها به نیتریک اسید ( $\text{HNO}_3$ ) است.  $\text{HNO}_3$  سپس به صورت نمک‌های نیتراتی در باران یا ذرات گرد از اتمسفر خارج می‌شود. واکنش مستقیم  $\text{NO}_2$  با آب ( $\text{H}_2\text{O}$ )، طبق رابطه زیر، تولید نیتریک اسید می‌نماید.

تجربیات مقدماتی نشان می‌دهد که خاک، ظرفیت حذف  $\text{NO}_2$  از هوا را دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که احتمالاً یک فرآیند حذف طبیعی بایستی وجود داشته باشد.

## ۶.۲.۲ تأثیرات $\text{NO}_x$ بر روی انسان

هر دو اکسید مورد بحث نیتروژن،  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$ ، می‌توانند بالقوه برای سلامتی انسان مضر باشند.

مطالعه روی مرگ و میر حیوانات نشان داده است که  $\text{NO}_2$  تقریباً ۴ برابر بیشتر از  $\text{NO}$  سمی است. هیچ موردی از مرگ انسان ناشی از  $\text{NO}$  گزارش نشده است [۱]. با توجه به غلظت‌هایی که در طبیعت یافت شده،  $\text{NO}$  به عنوان تهدید کننده سلامتی در نظر گرفته نمی‌شود. بزرگترین خطری که دارد، توانایی اکسایش و تبدیل شدن آن به  $\text{NO}_2$  می‌باشد. اثرات ثابت شده  $\text{NO}_2$  بر روی انسان، به مشکلات تنفسی محدود می‌شود. شدت مسمویت بستگی به زمان در معرض قرار گرفتن و غلظت  $\text{NO}_2$  دارد. افزایش در غلظت، سبب پیامدهایی نظیر اختلال در قوه بویایی، ناراحتی‌های حفره بینی، اشکالات تنفسی، ناراحتی‌های اعصاب، تجمع مایعات و سرانجام مرگ می‌شود. حتی ملایم‌ترین اثرات مانند ناراحتی‌های پوشش مخاطی بینی، در غلظت معمولی  $\text{NO}_2$  اتمسفری رخ نمی‌دهد. دامنه آستانه تحریک  $\text{NO}_2$  در انسان ۱ تا ۳ ppm گزارش شده است. غلظت‌هایی تا حد ۱۳ ppm، باعث شکایت‌هایی در مورد ناراحتی‌های بینایی و تنفسی شده است. غلظت بیش از ۱۰۰ ppm برای بیشتر گونه‌های حیوانات مرگ آور بوده است.

## ۳.۲ اکسیدهای سولفور

سولفور اکسیدی که به بیشترین مقدار در اتمسفر انتشار می‌یابد، سولفور دی‌اکسید  $SO_2$  می‌باشد. معمولاً مقدار کمی از سولفور تری‌اکسید  $SO_3$  همراه سولفور دی‌اکسید است. ولی مقادیری بیشتر از حدود ۱ تا ۲ درصد  $SO_2$  نمی‌باشد. مجموعه این دو نوع اکسید با  $SO_x$  نشان داده می‌شود. سولفور دی‌اکسید گازی بی‌رنگ و غیر قابل اشتعال، با نقطه ذوب و جوش به ترتیب  $75.5^\circ C$  و  $10^\circ C$  است. در غلظت‌های نزدیک به ۳ppm بوی زننده‌ای دارد. سولفور تری‌اکسید گازی فوق‌العاده فعال، بی‌رنگ و به آسانی به صورت مایع متراکم می‌گردد ( $bp=44.8^\circ C$ ). تحت شرایط معمولی هیچ  $SO_3$  در اتمسفر یافت نمی‌شود چرا که سریعاً با رطوبت واکنش می‌دهد و سولفوریک اسید به وجود می‌آورد. ( $H_2SO_4$ ).

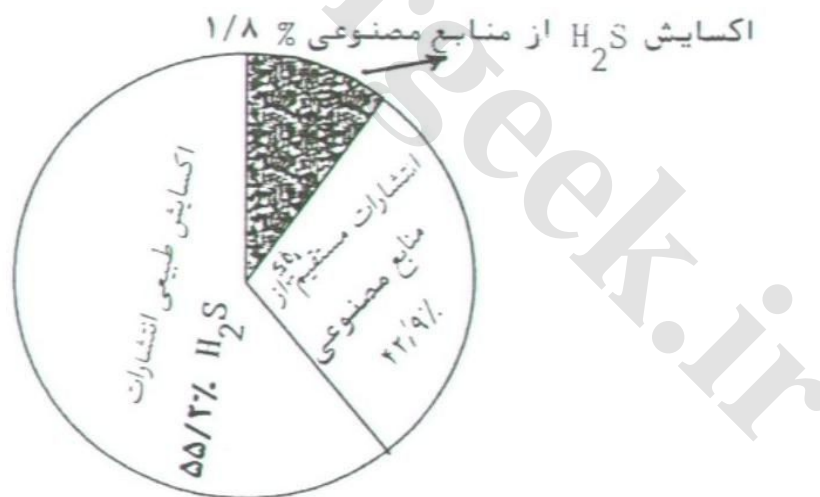
## ۱.۳.۲ منابع سولفور اکسیدها

برآورد شده که در سراسر کره‌ی زمین سالانه ۱۴۶ میلیون تن  $SO_2$  مستقیماً وارد اتمسفر می‌گردد. به علاوه سالانه نزدیک به ۱۹۴ میلیون تن  $SO_2$  در نتیجه اکسایش هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) در اتمسفر تولید می‌شود. بنابراین یک فرآیند فرعی اکسایش  $H_2S$ ، بیشتر از انتشار مستقیم  $SO_2$  اتمسفری می‌باشد. منشأ  $SO_2$  اتمسفری، فساد مواد آلی است. باتلاق‌ها، لجنزارها و جلگه‌ها مهمترین مولد آنها هستند. اقیانوس‌ها منشأ سالانه ۳۰ میلیون تن  $SO_2$  می‌باشند، در حالی که منابع بیولوژیکی ۷۰ میلیون تن تولید می‌کنند. فعالیت‌های آتشفشانی، کمی  $H_2S$  تولید می‌کنند ولی این مقدار در مقایسه با مقدار تولید شده از فرآیندهای بیولوژیکی، قابل چشم‌پوشی است. مقدار کمی  $H_2S$ ، ۳ میلیون تن در سال، در نتیجه فعالیت‌های صنعتی وارد اتمسفر می‌گردد و کل انتشار جهانی را تا ۱۰۳ میلیون تن در هر سال می‌رساند. سرنوشت این مقدار عظیم  $H_2S$  آزاد شده در اتمسفر زمین، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. تا اواخر نیمه دوم ۱۹۶۰، در مورد چگونگی حذف

H<sub>2</sub>S، جز این که این ماده نهایتاً به سولفات اکسیده می‌شود، اطلاعات دیگری وجود نداشت. اکنون پژوهش‌گران متوجه شده‌اند که واکنش

گام مهمی در این فرآیند می‌باشد. آزمایشات نشان می‌دهد که واکنش بالا وقتی که غلظت‌های مواد ترکیب شونده مساوی مقادیر اتمسفریشان باشد، خیلی سریع انجام می‌گیرد.

ازن (O<sub>3</sub>) جزء ناچیز اتمسفر است و مقادیر اضافی آن از چرخه نوری NO<sub>2</sub> به وجود می‌آید. اکسایش کامل ۱۰۳ میلیون تن H<sub>2</sub>S، باعث تولید سالانه ۱۹۴ میلیون تن SO<sub>4</sub> می‌شود. انتشار سولفوراکسید غیر طبیعی، (سالانه ۱۴۶ میلیون تن) عمدتاً از احتراق ذغال سنگ به وجود می‌آید. احتراق سوخت نفتی و ذوب سنگ معدن سولفید، سهم کوچک ولی مهمی در انتشار سولفور دی اکسید، در اتمسفر دارد. هیچ منبع عمده طبیعی SO<sub>2</sub> شناخته نشده است اگرچه مقدار کمی از این گاز در فعالیت‌های آتشفشانی دیده شده است (شکل ۴.۲).



شکل ۴.۲ منابع اکسیدهای سولفور اتمسفری



گوگرد محدوده ای بین ۰/۲ تا ۷ درصد از وزن ذغال سنگ را تشکیل می‌دهد. این گوگرد در گیاهان و موجودات دریایی که زمانی زنده بوده اند وجود دارد. گوگرد پروتئینی در فرآیند کربنی شدن، باقی می‌ماند و بخشی از ذغال سنگ را تشکیل می‌دهد. سایر سوخت‌های فسیلی ( نفت خام و گاز طبیعی ) که از راه‌هایی شبیه به این به وجود می‌آیند، حاوی گوگرد می‌باشند. با این حال این سوخت‌ها مشکلات انتشار  $SO_x$  را که ذغال سنگ تولید می‌کنند، ندارند زیرا بیشتر گوگرد آزار رساننده طی مراحل مختلف گاز طبیعی و تصفیه نفت از بین می‌روند. فن‌آوری موجود برای حذف گوگرد به حالت گازی یا مایع بودن سوخت بستگی دارد و به سادگی به جامد تبدیل نمی‌شود. نگاهی دقیق‌تر به پسماندهای فرآیندهای صنعتی، دومین منشأ بزرگ  $SO_x$ ، این موضوع را آشکار می‌سازد که سه چهارم انتشار این گازها، به عملیات ذوب کننده مربوط می‌شود. آلودگی ناشی از سولفور اکسید، غالباً از فعالیت‌های ذوب کننده است، چرا که بسیاری از عناصر مفید به طور طبیعی در سولفیدها وجود دارد. برای مثال، کانی‌های سولفید منبع مهمی از مس (  $CuS_2$  ,  $CuFeS_2$  )، روی (  $ZnS$  )، جیوه (  $HgS$  ) و سرب (  $PbS$  ) می‌باشند. عملیات ذوب کننده معمولی، به طور مرتب  $SO_2$  را به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌کند و مقداری از این گاز وارد اتمسفر می‌شود.

### ۲.۳.۲ شیمی تشکیل $SO_x$

احتراق هر ماده حاوی گوگرد، هم  $SO_2$  و هم  $SO_3$  تولید می‌کند. مقدار نسبی اکسید تشکیل شده، بستگی به مقدار حضور اکسیژن ندارد. کمیت  $SO_3$  تولید شده، به شرایط واکنش، مخصوصاً به دما بستگی دارد و بین ۱ تا ۱۰ درصد کل  $SO_x$ ، نوسان دارد. چگونگی تشکیل  $SO_x$  را می‌توان یک فرآیند دو مرحله نشان داد:

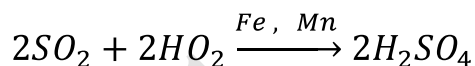
در نتیجه دو عامل،  $SO_3$  در واکنش بالا، خیلی کم تولید می‌شود: ۱- ناپایداری  $SO_3$  در دمای بالا ۲- کم بودن سرعت واکنش در دماهای بالا

در دمای  $1200^\circ C$ ،  $SO_3$  به سرعت تجزیه می‌شود (برعکس واکنش بالا). با حضور کاتالیزور، تجزیه در دماهای خیلی پایین‌تر صورت می‌گیرد. بعضی از ذرات فلزی که در تمام ذغال سنگ‌ها پیدا می‌شود، تأثیر کاتالیتیکی نیز دارند و از جمع شدن  $SO_3$  در گازهای دفعی احتراق، جلوگیری می‌کنند. به هنگام ترک محفظه احتراق، گازهای دفعی به سرعت سرد می‌شوند. با این حال با وجود پایداری کامل، در دماهای پایین‌تر اصلاً  $SO_3$  تولید نمی‌شود. در این حالت، سرعت واکنش از تشکیل چنین گازی جلوگیری می‌کند. واکنش تولید  $SO_3$  در دمای اتمسفری، خیلی آرام صورت می‌گیرد و در نتیجه،  $SO_x$  عمدتاً به شکل  $SO_2$  می‌باشد.

### ۳.۳.۲ طرق از بین رفتن $SO_x$ اتمسفری

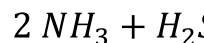
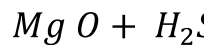
بخش عظیمی از  $SO_2$  اتمسفری به  $SO_3$  اکسید می‌شود و سپس با بخار آب واکنش داده و اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ ) تولید می‌شود. این اسید با سایر مواد موجود واکنش داده و سولفات‌ها را به وجود می‌آورد. برای مثال آمونیوم سولفات،  $(NH_4)_2SO_4$ ، وقتی به وجود می‌آید که این اسید، با آمونیاک واکنش دهد. نمک‌های سولفات، سرانجام در اتمسفر مستقر می‌شوند یا این که باران آنها را می‌شوید. سرعت پایین اکسایش  $SO_2$  به  $SO_3$  در دمای طبیعی اتمسفر، ما را به این نتیجه می‌رساند که روزهای متعددی لازم خواهد بود تا اکسایش اتمسفری  $SO_2$ ، کامل شود. اما تحقیقات نشان می‌دهند که این طور نیست. برعکس، به نظر می‌رسد که این اکسایش در عرض چند ساعت صورت می‌گیرد. این حقیقت، نتیجه دو فرآیند اکسایش کاتالیتیکی و اکسایش فتوشیمیایی می‌باشد.

بیشتر اکسایش کاتالیتیکی  $SO_2$ ، از طریق انحلال صورت می‌گیرد (در قطرات آب). به هر حال، این واکنش، بعد از اینکه گاز  $SO_2$  بر روی سطح جامد ذرات معلق جذب می‌شود، انجام می‌شود. اکسایش کاتالیتیکی این گاز در قطرات آب، اکسیژن معمولی را به عنوان عامل اکسیدان و نمک‌های آهن و منگنز را به عنوان کاتالیزور، درگیر می‌سازد.



واکنش بالا، بیشتر با  $SO_3$  آغاز می‌شود تا با  $SO_2$ . سولفورتری‌اکسید، میل ترکیبی زیادی با آب دارد و به خوبی در آن حل می‌شود. قطرات سولفوریک اسید با مولکول‌های آب برخورد کرده و بزرگ‌تر می‌شود. این مه، به صورت محیط واسطه‌ای عمل می‌کند، به طوری که  $SO_2$  و  $O_2$  می‌توانند در آن حل شوند. مه تولید شده، می‌تواند مقدار زیادی گاز  $SO_2$  را که قابلیت انحلال در آب را دارد، به وجود آورد. این قابلیت انحلال، بسیار بیشتر از آلاینده‌های  $CO$  و  $NO$  می‌باشد. یک نمونه‌ی ۱۰۰ میلی‌لیتری آب، در دمای  $20^\circ C$ ، می‌تواند  $SO_2$  ۱۱/۳g را در خود حل کند ولی همین مقدار آب تنها ۰/۰۰۶g از  $NO$  و فقط ۰/۰۰۳g از  $CO$  را می‌تواند حل نماید.

نمک‌های منگنز و آهن برای کاتالیزور کردن واکنش‌هایی که معمولاً در دود ذغال‌سنگ سوخته رخ می‌دهند، لازم است. ذرات دود در اتمسفر غالباً به عنوان مواضع هسته‌زایی برای تشکیل قطرات آب عمل می‌کنند. بنابراین، ذغال سنگی که در حال سوختن است نه تنها  $SO_2$  تولید می‌کند، بلکه کاتالیزور و مواضع لازم برای اکسایش  $SO_2$  به  $SO_3$  را نیز فراهم می‌کند. غلظت اسید در یک قطره، در فرآیندهای اکسایش کاتالیتیکی، نقش مهمی را ایفا می‌کند. مطالعات نشان داده است وقتی که غلظت  $H_2SO_4$  نزدیک به یک مولار (یک واحد غلظت) می‌رسد، اکسایش متوقف می‌شود. این تأثیر تا اندازه‌ای به دلیل پایداری کم  $SO_2$  در محلول‌های قوی اسید می‌باشد. خنثی کردن اسید با اکسیدهای فلزی یا آمونیاک، قابلیت انحلال  $SO_2$  در قطرات آب و سرعت اکسایش را افزایش می‌دهد. برخی واکنش‌های خنثی کننده عبارت است از:



آمونیاک، مخصوصاً در کنترل سرعت اکسایش  $SO_2$  با اهمیت است، چراکه این ماده به طور طبیعی در اتمسفر موجود و قابلیت انحلال زیادی در آب دارد. این قابلیت از انحلال  $SO_2$  بیشتر است و با کاهش دما، افزایش می‌یابد. بنابراین، آمونیاک می‌تواند تأثیر خود را در ارتفاعات بالا، جایی که دما نسبتاً پایین است، اعمال کند. شاید سریع‌ترین فرآیند برای اکسایش  $SO_2$ ، تداخل  $SO_2$  با اکسیدان‌های فتوشیمیایی موجود در مه‌دود فتوشیمیایی است. گسترش مه‌دود در یک شهر مقدار  $SO_2$  را کاهش می‌دهد و با اختلال در بینایی انسان همراه است.

### ۴.۳.۲ تأثیرات $SO_x$ بر روی انسان

اغلب تأثیرات  $SO_2$  بر روی سلامتی انسان به ناراحتی‌های مستقیم تنفسی محدود می‌شود. جدول زیر برخی تأثیرات  $SO_2$  را بر حسب غلظت نشان داده است.

غلظت $SO_2$ (ppm)	اثر
۰/۲	موجب اختلالاتی در تنفس می‌شود
۰/۳	حد آستانه برای شناسایی مزه
۰/۵	حد آستانه برای شناسایی بو
۱/۶	حد آستانه برای انقباض نایچه‌ها
۸ - ۱۲	تحریکات فوری گلو
۱۰	تحریکات چشم
۲۰	سرفه‌های شدید و سریع

جدول ۳.۲ تأثیرات  $SO_2$  بر روی انسان

سطوح لازم برای تولید عکس‌العمل‌های قابل مشاهده در انسان، خیلی بیشتر از سطوحی است که باعث صدمه به گیاهان می‌شود. در غلظت پایین‌تر از ۲۵ ppm تأثیر آزار دهنده  $SO_x$  به قسمت فوقانی دستگاه تنفسی و چشم‌ها محدود می‌شود. تأثیرات تنفسی به دلیل قابلیت انحلال  $SO_2$  می‌باشد. بیشتر گازها در پوشش مخاطی مرطوب سطح فوقانی تنفسی قابل حل هستند و مقدار بسیار کمی به عمق شش‌ها نفوذ می‌کنند.

در غلظت‌های بالای  $SO_2$ ، ۹۵ درصد از این گاز در حفره بینی جذب می‌شود. این مقدار در غلظت‌های پایین مثل ۰/۱ ppm به ۵۰ درصد تقلیل می‌یابد. به هر حال در چنین غلظت‌های پایینی مقدار قطعی که به شش‌ها می‌رسد کمتر از آن است که واکنش ایجاد کند. مطالعات انجام شده تحت برنامه‌های سلامت اجتماع مربوط به EPA، همبستگی قطعی را بین شیوع عفونت تنفسی در کودکان و سطح آلودگی  $SO_2$  در محیط زندگی آنها نشان می‌دهد. عفونت و آسیب به شش‌ها با افزایش مدت اقامت یک کودک در ناحیه آلوده، بیشتر می‌شود. مشخص شده  $SO_2$  استنشاق شده از راه دهان، تأثیر بیشتری نسبت به استنشاق از راه بینی دارد. بیشتر نگرانی، مربوط به خطر ناشی از غلظت  $SO_2$  بر روی افراد مسن و افرادی با مشکلات تنفسی می‌باشد. آئروسول‌های سولفات ۳ تا ۴ برابر قدرت تحریک‌کنندگی بیشتری نسبت به  $SO_2$  دارند. این ذرات کوچک در شش‌ها نفوذ کرده و در آنجا ته‌نشین می‌شوند. اگرچه سولفور به شکل سولفات نباشد اما محیط مرطوب شش‌ها شرایط را برای اکسایش فراهم می‌کند. غلظت‌های خیلی پایین سولفات ( $8 \frac{\mu g}{m^3}$ ) تأثیرات مضر بر روی افراد مبتلا به آسم می‌گذارد. بحران این مسئله وقتی آشکار می‌شود که مشخص شده حدود ۱۸ درصد جمعیت جهان دارای مشکلات مزمن تنفسی هستند. در سال ۱۹۷۵، دانشمندان پی بردند که منابع اصلی تولید سولفات رو به افزایش است و این به خاطر استفاده روزافزون از اتومبیل‌ها می‌باشد. گازوئیل، اگرچه نفت خام تصفیه شده می‌باشد، ولی باز هم حاوی مقادیر جزئی سولفور (۰/۰۴ تا ۰/۰۸ درصد) می‌باشد که در محفظه احتراق به  $SO_x$  تبدیل می‌شود.

## ۴.۲ ذرات معلق

به طور کلی به ذرات جامد کوچک و قطرات مایع ذرات معلق می‌گویند که در حال حاضر، به شدت در آلودگی‌ها و مسائل و مشکلات مربوط به آن سهیم می‌باشند. آب خالص به صورت قطره‌ای، تنها مایعی است که از این طبقه بندی استثنا می‌باشد. اصطلاحات ذرات معلق و ائروسول ( ذرات پراکنده ) اغلب به جای یکدیگر به کار می‌روند. ائروسول‌ها، به ذراتی اطلاق می‌شوند که به صورت پراکنده (جامد یا مایع) در واسطه گازی قرار گرفته باشند. مه دود، غبار، دود سیگار، دود اتومبیل و گرد و خاک به عنوان منبع اصلی ذرات معلق، شناخته شده‌اند.

مه دود یا غبار، ترکیبی از قطرات معلق مایع، دودها معمولاً شامل ذرات دوده‌ی حاصل از احتراق، دوده‌ی حاصل از اتومبیل و کارخانجات، بخارهای متراکم شده فلزی و یا ترکیبات آلی و گرد و غبارهای منتج از تجزیه ترکیبات موجود در خاک می‌باشند.

ذرات معلق، بعضی مواقع به صورت ذرات زنده نظیر باکتری‌ها، جلبک‌ها، کپک‌ها و هاگ‌ها هستند و یا به صورت ترکیبات آلی، فلزات، گرد و غبار و نمک‌های دریایی می‌باشند.

ذرات معلق آلوده کننده هوا، به دلایل زیر مورد توجه خاصی قرار گرفته اند:

۱. بسیاری از ذرات معلق در مقایسه با آلاینده‌های دیگر بیشتر موجب اختلال مجاری تنفسی می‌شوند.
۲. بعضی از ذرات معلق اثرات سمی دیگر آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند.
۳. ذرات معلق آلودگی اتمسفر را افزایش داده و باعث کاهش افق دید می‌شوند.
۴. گروهی از ذرات معلق از بعضی آلاینده‌های گازی موجود در اتمسفر به وجود می‌آیند.

## ۱.۴.۲ منابع ذرات معلق

ذرات معلق به دو طریق تشکیل می‌شوند: (۱) تجزیه و از هم پاشی تکه‌های بزرگ مواد (۲) از تراکم و تجمع ذرات کوچکتر (در حد مولکول‌ها). در طی عمل تجزیه و تقسیم نمکهای دریایی، ائروسول به وجود می‌آیند. با تخمین می‌توان گفت که سالانه در حدود ۱۰۰۰ میلیون تن از این ائروسول‌ها وارد اتمسفر می‌شوند. سازوکار آن به دین گونه است که حباب‌هایی که در بستر اقیانوس‌ها تشکیل می‌شوند و خود شامل ذرات معلق هستند به سطح آب آمده و می‌ترکند و در نتیجه ذرات معلق‌شان وارد اتمسفر می‌شود.

مراحل طبیعی دیگری که مستقیماً ذرات معلق را وارد اتمسفر می‌کند عبارت است از: پراکنده شدن گرد و غبار خاک بیابان‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی و آتش سوزی در جنگل‌ها.

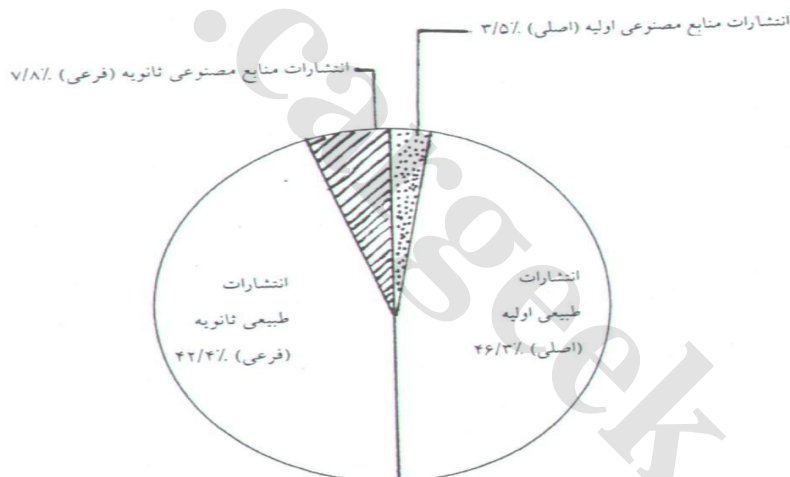
ذرات معلق که به این صورت، مستقیماً وارد اتمسفر می‌شوند، خواه از منابع طبیعی و یا از منابع انسانی ذرات معلق اصلی نامیده می‌شوند. همان طور که در جدول زیر آمده، گرد و غبار حاصل از وزش باد و طوفان، یکی از سه عاملی است که سهم زیادی در تشکیل ذرات معلق آلوده کننده دارد.

منابع مصنوعی	تولید (میلیون تن در سال)	منبع طبیعی	تولید (میلیون تن در سال)
مواد معلق آلوده	۹۲	گرد و غبار جامد	۲۰۰
سولفات از $SO_2$	۱۴۷	سولفات از $H_2S$	۲۰۴
نیترات از $NO_x$	۳۰	نیترات از $NO_x$	۴۳۲
واکنش‌های فتوشیمیایی هیدرو کربن‌ها	۲۷	آمونیم از $NH_3$	۲۶۹

جدول ۴.۲ انتشار ذرات معلق از منابع مصنوعی و طبیعی

بعضی از گازها که به طور طبیعی آزاد می‌شوند، در اتمسفر واکنش داده و ذرات معلق ثانوی (فرعی) تشکیل می‌شوند. فرآیندهایی که تولید  $NO_x$ ،  $H_2S$ ،  $NH_3$  و ترپن‌ها را به همراه دارند مسئول سالیانه ۱۱۰۵ میلیون تن از ذرات معلق می‌باشند.

منبع اصلی ذرات معلق منتشر شده از منابع انسانی، که شامل تولید و تشکیل ائروسول‌های فرعی است از آلاینده‌های گازی اصلی می‌باشند. تقریباً ۲۰۴ میلیون تن از ذرات معلق از چنین تبدیلاتی بدست می‌آیند. این میزان، حدود ۲۰ درصد از مقدار ذرات معلق طبیعی است که طی فرآیند مشابهی، تولید می‌گردند. ورود مستقیم ذرات معلق اصلی حاصل از منابع مصنوعی به اتمسفر، در حدود ۹۲ میلیون تن در سال می‌باشد. کل ذرات معلق منتشر شدن شامل ۵۰/۲ درصد ذرات معلق ثانوی (فرعی) و ۴۹/۸ درصد اصلی می‌باشند (شکل ۵.۲).



شکل ۵.۲ انتشارات جهانی ذرات معلق

بنابراین، منابع طبیعی بر منابع مصنوعی در زمینه انتشار ذرات معلق غالب هستند. (۸۸/۶٪ در مقابل ۱۱/۴٪)



## ۲.۴.۲ ترکیب شیمیایی ذرات معلق

ترکیب شیمیایی ذرات آلاینده، بسیار متغیر است. عملاً اگر حجم‌های زیادی از هوا را نمونه برداری کرده و از روش‌های تجزیه ای کاملاً حساس استفاده کنیم، ترکیبات معدنی را به خوبی ترکیبات آلی، می‌توانیم در ذرات معلق بیابیم. ترکیبات واقعی ذرات معلق، کاملاً وابسته به منبع‌شان می‌باشند. ذرات خاکی و آلوده که شامل کلسیم، آلومینیوم و سیلیس هستند در بین خاک‌ها و مواد معدنی مشترک می‌باشند. دود حاصل از سوختن ذغال سنگ، روغن چوب و زباله، شامل ترکیبات آلی زیادی می‌باشد. ترکیبات آلی همچنین در گرد حشره‌کش‌ها و بعضی از محصولات صنایع غذایی و کارخانجات شیمیایی نیز یافت می‌شود. ذرات معلق فرعی موجود در اتمسفر، اغلب حاوی نمک‌های معدنی آمونیم، سولفات و یا نیترات هستند. هنگامی که توده عظیمی از ذغال سنگ سوزانده شود، بیشتر مواد معدنی که بعد از احتراق باقی می‌مانند، به شکل خاکستر هستند. ترکیب پایه و اصلی این خاکستر، آلومینیم سیلیکات است که مانند خاک چینی می‌باشد. در کارخانجات موتوریزه، بیشتر از تکه‌های نرم و خرد شده ذغال سنگ استفاده می‌شود تا توده‌های حجیم آن. ذغال سنگ علاوه بر اجزای اصلی، حاوی مقدار کمی عناصر کمیاب یا نادر می‌باشد. عناصر نادر، به طور کلی، به عناصری اطلاق می‌شود که در محدوده ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ppm) یا کمتر، در پوسته زمین یافت می‌شوند. در اثر احتراق، عناصر نادر از ذغال سنگ آزاد شده و به صورت ذرات معلق گازی و اکسید شده، در می‌آیند. علاوه بر غلظت کم عناصر کمیاب در ذغال سنگ، مقادیر نسبتاً زیادی از آنها در ذرات معلق یافت می‌شود. بسیاری از این عناصر سمی هستند و اگر غلظت آنها در اتمسفر افزایش یابد، خطرات جدی به سلامتی انسان خواهد رساند.

## ۳.۴.۲ اندازه ذرات معلق

قطر ذرات معلق، بر حسب میکرومتر ( $\mu\text{m}$ ) بیان می‌شود. دامنه تغییرات اندازه آنها، بین  $0.002$  تا  $5000$  میکرومتر می‌باشد. رابطه ای بین اندازه ذرات معلق آلوده کننده و منابع آنها وجود دارد. ذراتی با قطر بیشتر از  $10$  میکرومتر، در نتیجه فرآیندهای مکانیکی، از قبیل فرسایش بادی، اسپری کردن یا خرد شدن مواد توسط وسایل نقلیه و عابرین پیاده ایجاد می‌شود. ذراتی با قطر بین  $1$  تا  $10$  میکرومتر، حاصل از خاک مناطق محصولات احتراق مواد در صنایع، گرد و غبار و خاک محل مربوط به صنایع و همچنین در بعضی مناطق نمک‌های دریا می‌باشند. ذراتی با قطر بین  $0.1$  تا  $1$  میکرومتر به طور عمده در نتیجه احتراق و یا ذرات پراکنده فتوشیمیایی می‌باشد. ماهیت ذراتی با قطر کمتر از  $0.1 \mu\text{m}$  کاملاً از نظر شیمیایی مشخص نشده است. ذرات کوچکتر از  $0.1 \mu\text{m}$  در اتمسفر، رفتاری مشابه رفتار مولکول‌ها از خود نشان می‌دهند. حرکت آنها در اثر برخورد دائمی با مولکول‌های گازی به صورت تصادفی و زیگزاگی در می‌آید. علاوه بر این، آنها اغلب با یکدیگر برخورد کرده، به یکدیگر می‌چسبند و در طی عمل انعقاد، تشکیل مجموعه بزرگتری می‌دهند. ذرات بزرگتر از  $1 \mu\text{m}$  رفتار کاملاً متفاوتی دارند. زیرا ذرات بزرگی بوده و به دلیل جاذبه زیاد، ته‌نشین می‌شوند. میزان انعقاد (لخته شدن) چنین ذراتی کم است. ذرات بزرگتر از  $10 \mu\text{m}$  به دلیل جاذبه شدید بین ذرات، مدت کوتاهی در هوا معلق می‌مانند. عمل تحریک و جابه جایی ذرات در اثر جاذبه زیاد مابین آنها، رسوبی شدن نامیده می‌شود. در نتیجه فرآیند لخته شدن و رسوب کردن، ذراتی که به صورت معلق در اتمسفر باقی می‌مانند، اغلب اندازه ای بین  $0.1$  تا  $10$  میکرومتر دارند. اندازه ذرات معلق، عامل مهمی در تشخیص اثرات آلوده کننده ذرات است.

## ۴.۴.۲ سرنوشت ذرات معلق اتمسفری

تمامی ذرات معلق سرانجام بر روی زمین ته‌نشین می‌شوند. فرآیندهای ته‌نشینی ذرات معلق شامل ته‌نشینی خشک و ته‌نشینی مرطوب است. ته‌نشینی خشک دو حالت متداول تر دارد. یکی هنگامی رخ می‌دهد که ذرات معلق حاصل از وزش باد، به مانعی برخورد می‌کنند و ته‌نشین می‌شوند. دوم آن که ذرات در اثر جاذبه زمین یا جذب سطحی به سطوحی برخورد کرده یا به طرف سطوح منتقل می‌شوند و همان جا باقی می‌مانند. به طور تقریبی می‌توان گفت که حدود ۲۰ درصد نشست ذرات معلق اتمسفری از طریق ته‌نشینی خشک صورت می‌گیرد. فرآیند ته‌نشینی مرطوب به دو دسته تقسیم می‌شود: الف) مرحله ای که ذرات به عنوان مراکز و محل‌های تجمع در ابرها عمل می‌کنند که در آنجا بخار سرد شده و به شکل آب یا برف یا تگرگ درمی‌آید و ب) ریزش باران و برف، ذرات معلق بزرگتر از  $1\mu\text{m}$  را از اتمسفر جمع کرده و به سطح زمین حمل می‌کند.

## ۵.۴.۲ غلظت‌های ذرات معلق

غلظت ذرات معلق بر حسب میکروگرم بر متر مکعب هوا بیان می‌شود. از آنجایی که طبق تعریف، ذرات معلق غیر گازی هستند، کاربرد واحد حجمی (ppmv) مناسب نیست. غلظت‌ها بر حسب  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  در شرایط خشک گزارش می‌شود و بنابراین شامل ذرات و قطرات آب، برف و بخارهای ترکیبات آلی و معدنی، که در حین عمل خشک کردن خارج می‌شوند، نمی‌باشد. استانداردهای رایج در مورد کیفیت هوا برای ذرات معلق وابسته به وزن می‌باشند. وزن ذرات  $10\mu\text{m}$  (بزرگترین ذرات) و  $0.1\mu\text{m}$  (کوچکترین ذرات) به عنوان مبنای کار می‌روند. اگر چگالی این ذرات تقریباً با هم برابر باشند، ذرات کوچکتر تنها به اندازه یک میلیونیم ذرات بزرگتر وزن خواهند داشت.

## ۶.۴.۲ اثرات ذرات معلق بر روی انسان

ورود ذرات معلق آلاینده به بدن انسان بیشتر از راه مجاری تنفسی می‌باشد و فوراً کار این دستگاه بدن را مختل می‌کند. شدت اثرات به قدرت نفوذ ذرات معلق به دستگاه تنفسی و درجه سمی بودن آنها بستگی دارد. دامنه نفوذ ذرات نیز به اندازه آنها و دستگاه تنفسی وابسته است. دستگاه تنفسی به دو بخش فوقانی و تحتانی تقسیم می‌شود. بخش فوقانی شامل حفره بینی، حلق و نای و بخش تحتانی شامل برونشها و ششها می‌باشد. مجاری فوقانی، ذراتی با قطر بیشتر از  $5\mu\text{m}$  را از هوای دم می‌گیرد. اولین سد دفاعی، موهای درون حفره بینی است. ذراتی که از این سد می‌گذرند، در داخل موکوسی که جدار حفره بینی و نای را پوشانده، به دام می‌افتند. آلوده کننده‌های گازی محلول در آب مثل  $\text{SO}_2$ ، تقریباً به طور کامل توسط ماده مرطوب موجود در حفره های مجاری فوقانی تنفسی از بین می‌روند. ذراتی با قطر بین  $0.5$  تا  $5$  میکرومتر، در طول نایژه‌ها ته نشین شده و فقط تعداد کمی از این ذرات وارد کیسه‌های هوای شش می‌شوند. چنین ذراتی معمولاً توسط حرکت مژگها و یا زائده‌های مو مانند دیواره نایژکها و نایژه‌ها، به بیرون رانده می‌شوند. حرکت مداوم موجی شکل مژکها، سهم عمده ای در جابه جایی موکوس و ذرات گیر افتاده دارد و آنها را تا جلوی حلق حرکت می‌دهد و در آنجا به وسیله سرفه‌ی خلط آور یا بلع، بیرون رانده می‌شوند.

ذراتی با قطر کمتر از  $5\mu\text{m}$  به کیسه‌های هوایی رسیده و در آنجا ته‌نشین می‌شوند. از آنجایی که دیواره کیسه‌های هوایی، مژک یا پوشش مرکوس ندارد، خروج چنین ذراتی از این ناحیه در مقایسه با مجاری بزرگتر، با سرعت کمتر و به صورت ناقص صورت می‌گیرد. ذرات معلق که وارد ششها شده و در آنجا باقی می‌مانند، به سه طریق اثرات سمی خود را اعمال می‌کنند:

۱. ذراتی که خود ساکن و بی حرکت هستند، در سازوکار دفاعی مجاری تنفسی دخالت کرده و حرکت ذرات مضر دیگر را کندتر کرده یا از جابه جایی آنها جلوگیری می‌کنند. مشاهده عکس العمل‌های فیزیولوژیکی در رابطه با این اثر، شامل کند کردن مژکها و جریان حرکت موکوس در انشعابات می‌باشد.

۲. بعضی از ذرات معلق ممکن است حاوی مولکول‌های گازی تحریک کننده و سوزش‌آور باشند که وارد نواحی حساس ریه شده و در آنجا جایگزین می‌شوند. عمل جذب این گاز هنگامی اتفاق می‌افتد که یک مولکول، به سطح یک ذره معلق برخورد کرده و به حالت اولیه خود باز نگردد، بلکه یا به ذره بچسبند یا جذب آن شود. عمل جذب به ۳ صورت مختلف انجام می‌گیرد:

الف: هنگامی که مولکول برخورد کرده و به صورت فیزیکی جذب سطح ذره شود، عمل جذب سطحی (adsorption) رخ داده است. ب: جذب شیمیایی، وقتی رخ می‌دهد که عمل جذب توأم با تأثیرات متقابل شیمیایی بین سطح ذره و مولکول گاز باشد. ج: اگر مولکول گازی به ذره معلق برخورد کرده و در آن حل شود، این عمل را جذب (absorbption) گویند. اثرات گاز  $SO_2$  و تبدیل آن به اسید سولفوریک  $H_2SO_4$ ، نمونه ای از عمل جذب می‌باشد.

۳. ذرات معلق که ذاتاً سمی هستند و بنابراین مستقیماً روی بدن اثر سوء دارند. چنین ذراتی به ندرت با غلظت بالا در هوا یافت می‌شوند. با این وجود، بسیاری از مواد سمی به مقدار جزئی در هوا حضور دارند. بیشتر نگرانی در این خصوص مربوط به قابلیت افزایش غلظت این مواد بیش از حد طبیعی می‌باشد. تعداد زیادی از فلزات در بین ذرات موجود در هوا یافت می‌شوند که خود، حاصل احتراق منابع سوختی در دمای بالا، مثل دستگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، گدازه‌های متالوژیکی و کوره‌های بخار، کوره‌های آشغال سوزی و اتومبیل‌ها هستند.

#### ۷.۴.۲ اثرات ذرات معلق بر روی بینایی و مقدار تابش اشعه خورشید به سطح زمین

کاهش بینایی، در اثر آلودگی افزایش غلظت ذرات معلق، مشکلات بدیهی برای انسان دارد که پاره‌ای خطرناک (نظیر تصادف اتومبیل‌ها) و برخی آزار دهنده می‌باشد. بیش‌ترین تأثیر بر روی بینایی توسط ذرات با

قطری در محدوده ۰/۱ تا ۱ میکرومتر صورت می‌گیرد، به این دلیل که قطر آنها تقریباً به اندازه طول موج مرئی (۰/۴ تا ۰/۸ میکرومتر) می‌باشد و موجب پراکندگی و پخش نور مرئی در اتمسفر می‌شوند.

همچنین ذرات معلق باعث کاهش مقدار تابش نور خورشید به سطح زمین می‌شوند. مواد آلاینده برخی از پرتوهای فرعی ساطع شده از خورشید را جذب و برخی را به فضا برمی‌گردانند. نتیجه این امر عبارت است از ۱- کاهش بینایی در اثر کاهش نور مرئی ۲- کاهش دمای زمین. نواحی شهری به علت دارا بودن مقدار بیشتری از ذرات معلق در اتمسفر، به مقدار ۱۵ تا ۲۰ درصد کمتر از نواحی روستایی، اشعه خورشید را دریافت می‌کنند. در طول دوره‌هایی با آلودگی هوای زیاد، میزان اشعه ای که به سطح زمین می‌رسد تا ۳۰ درصد می‌تواند کاهش یابد.

## ۸.۴.۲ ذرات معلق آلی

مواد آلی که به صورت ذرات معلق در اتمسفر قرار دارند، به دو دسته آلیفاتیک و آروماتیک تقسیم می‌شوند. آلیفاتیک‌ها، ترکیباتی هستند که بین ۱۶ تا ۲۸ کربن دارند و چنین به نظر می‌رسد که برای سلامتی انسان مضر نیستند و در واکنش‌های اتمسفری شرکت نمی‌کنند. دسته آروماتیک، دارای چند حلقه آروماتیکی هستند و بسیار خطرناک و سرطان زا می‌باشند. از مواد آلی اکسیژن‌دار که در هوای آلوده یافت می‌شوند، می‌توان آلدهیدها، کتون‌ها، اپوکسیدها، استرها و لاکتون‌ها را نام برد که تعدادی از آنها سرطان‌زا هستند. از مواد قلیایی موجود در اتمسفر، اکریدین را می‌توان نام برد.

## ۵.۲ هیدروکربن‌ها

این ترکیبات از عناصر هیدروژن و کربن تشکیل یافته‌اند. تقریباً حدود ده‌ها هزار ترکیب هیدروکربن شناخته شده‌اند. آن‌ها در سه حالت فیزیکی (گاز، مایع، جامد) در دمای معمولی یافت می‌شود. خصوصیات حالت فیزیکی هر یک از آنها به ساختمان مولکولی بخصوص به تعداد اتم‌های کربنی که این مولکولها را می‌سازند بستگی دارد.

مولکول‌هایی که شامل یک تا چهار اتم کربن می‌باشند در دمای معمولی بصورت گاز هستند در حالی که آنهایی که پنج یا بیشتر اتم کربن دارند مایع یا جامد هستند. هیدروکربن‌هایی که عامل آلودگی هوا هستند در دمای معمولی به حالت گازند. یک هیدروکربن آرماتیک به عنوان یک واحد ساختمانی حاوی یک یا چند حلقه‌های شش‌عضوی کربن که به شکل بنزن آشکار می‌شوند می‌باشد. هیدروکربن‌های آریفاتیک (خطی) فاقد ساختمان حلقوی می‌باشند.

هیدروکربن‌ها در یک تقسیم‌بندی دیگر به دسته‌ی اشباع شده و غیر اشباع تقسیم می‌شوند. یک هیدروکربن اشباع هیدروکربنی است که در آن تمام اتم‌های کربن با چهار اتم کربن دیگر یا اتم‌های هیدروژن پیوند یگانه دارند. یک هیدروکربن غیر اشباع حاوی دو یا بیشتر اتم کربن است که با کمتر از چهار اتم دیگر پیوند تشکیل می‌دهند و بنابراین باید حداقل دارای یک پیوند چندگانه باشند. بعضی از هیدروکربن‌هایی که معمولاً در اتمسفر شهری یافت می‌شوند عبارتند از: ایزوپرن، تولوئن، اتیلن، متان و بنزن. تجزیه‌ی هوای شهری به وسیله‌ی کروماتوگرافی گازی ۵۶ ترکیب متفاوت هیدروکربن را مشخص نموده است. غلظت‌های متوسط فراوان‌ترین هیدروکربن‌هایی که شناخته شدند در جدول ۵.۲ داده شده است.

غلظت هیدروکربن	نام هیدروکربن‌ها
۳/۲۲	متان
۰/۰۵	تولوئن
۰/۰۶	n- بوتان
۰/۰۴	ایزوپنتان
۰/۱	اتان
۰/۰۳	بنزن
۰/۰۳	n- پنتان
۰/۰۵	پروپان
۰/۰۶	اتیلن

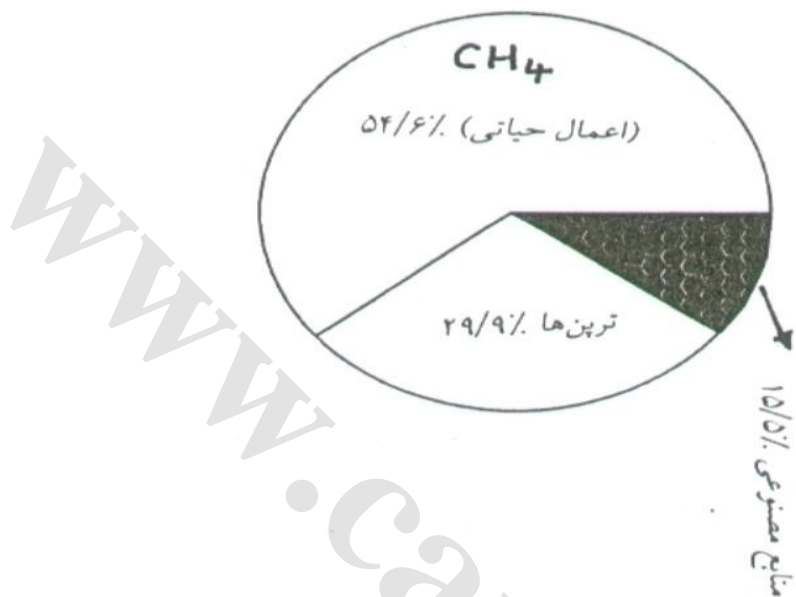
جدول ۵.۲ غلظت برخی هیدروکربن‌ها در هوای نمونه شهری بر حسب (ppm)

## ۱.۵.۲ منابع هیدروکربن‌ها

اغلب هیدروکربن‌ها از منابع طبیعی وارد اتمسفر می‌شوند تقریباً تمام این منابع درگیر فرایندهای زیستی هستند اگرچه تعداد کمی از آنها مربوط به حرارت مرکزی زمین و فرآیندهایی را که در مناطق دارای ذغال سنگ گاز طبیعی و نفت خام روی می‌دهد را شامل می‌شوند. متان ساده‌ترین هیدروکربنی است که بیش از هر هیدروکربن دیگر در اتمسفر منتشر می‌شود. (سالانه ۳۱۰ میلیون تن). فعل و انفعالات تجزیه‌ی باکتری‌ها منبع اصلی متان هستند و مقادیر زیادی نیز در باتلاق‌ها و مرداب‌ها و سایر آب‌های راکد تولید می‌شود.



شکل ۶.۲ مقایسه‌ای کلی را بین انتشارات طبیعی و انسانی هیدروکربن‌ها نشان می‌دهد. غلظت‌های هیدروکربن‌های درون هوای غیرشهری حدود ۱ تا ۱/۵ ppm و برای سایر هیدروکربن‌ها کم‌تر از ۱ ppm برآورد شده‌است.



شکل ۶.۲ منابع هیدروکربن‌های موجود در اتمسفر

## ۲.۵.۲ تاثیر هیدروکربن‌ها بر روی انسان‌ها

به طور کلی مدرکی دال بر اثرات نامطلوب هیدروکربن‌ها در غلظت‌های طبیعی هوا بر روی انسان وجود ندارد. اطلاعات و تجربیات جمع‌آوری شده نشان می‌دهد که هیدروکربن‌ها فقط در غلظت‌های صدها تا هزارها برابر آنچه در اتمسفر یافت می‌شوند تاثیر نامطلوب ایجاد می‌کنند. هیدروکربن‌ها در غلظت‌های کمتر از ۵۰۰ ppm تقریباً اثر نامطلوبی بر انسان ندارند. هیدروکربن‌های حلقوی (آروماتیک) بسیار خطرناک‌تر از هیدروکربن‌های خطی می‌باشند. بخارهای آروماتیک برای مجزای مخاطی بسیار محرک است و می‌توانند در هنگام تنفس جدی برسانند. همچنین در معرض ازون قرار گرفتن در محیطی با غلظت کمتر از ۱ ppm

۰/۲ هیچ تأثیر مخربی دیده نشده است ولی مقداری در حدود ۰/۳ ppm حد آستان تحریک چشم ، بینی و حلق می باشد. آزمایش ها نشان داده است که اگر انسان به مدت ۲ ساعت در معرض اوزن با غلظت ۱ تا ۳ ppm قرار بگیرد، دچار خستگی شدید و عدم توازن خواهد شد و اگر غلظت آن حدود ۹ ppm باشد در اکثر افراد بیماری های کلیوی شدیدی را در پی دارد.

www.cargeek.ir

### ۳. کاتالیست کانورتورها

#### ۱.۳ تئوری اکسیداسیون کاتالیتیک (تحریک شونده)

اکسیداسیون کاتالیتیک یک فرآیند اکسیداسیون شیمیایی است که در آن هیدروکربن‌ها (HCS) با اکسیژن ترکیب شده و تولید  $CO_2$  و آب می‌کند. همان طور که از نام آن مشخص است، در اکسیداسیون کاتالیتیک، از یک کاتالیزور یا محرک، ماده‌ایی که سرعت واکنش را بیشتر می‌کند ولی خودش مصرف نمی‌شود، استفاده می‌شود.

وسیع‌ترین روش برای کاهش آلاینده‌های آلی فرار پر خطر هوا (VOHAP)، سوزاندن می‌باشد:

برای انجام این واکنش یا روش کاتالیزور و یا روش حرارتی استفاده می‌شود. در دماهای بالا، مولکول‌های هیدروکربن و اکسیژن انرژی کافی برای واکنش مستقیم با یکدیگر را دارند:

کاتالیزورها انرژی فعال‌سازی واکنش، انرژی اولیه لازم برای واکنش دادن مولکول‌ها، را کاهش می‌دهند. با حضور یک کاتالیزور، همان واکنش در دمای پایین‌تر رخ می‌دهد و در نتیجه هزینه عملیات اجرایی اکسیداسیون کاهش می‌یابد:

عمومی‌ترین کاتالیزورها، فلزات گران‌بها (پلاتین یا پالادیم) هستند. کاتالیزورها بر روی سطح پکیپارچه لانه زنبوری که یا از جنس استیل ضدزنگ است و یا سرامیک، قرار می‌گیرند. لایه استیل ضدزنگ، ساختمان و آرایش بی‌عیب و نقصی نسبت به سرامیک دارد، در حالی که لایه سرامیک در مواقعی که خوردگی وجود دارد، ترجیح داده می‌شود.

یک نوع کمتر رایج‌تر کاتالیزور، کاتالیزور پایه فلزی است. این کاتالیزورها، معمولاً اکسید کروم یا منگنز هستند. یکی از معایب کاتالیزور پایه فلزی این است که افت فشار بالایی دارد و اینکه سایش فلز نگهدارنده‌ی آن‌ها می‌تواند ذرات ریزی تولید کند که در کف بستر گیر کند. همچنین، در مورد کاتالیزور پایه کروم، سایش بستر می‌تواند سبب انتشار هگزاوالنت (آلاینده هوایی پر خطر) به اتمسفر شود.

یکی دیگر از مشکلات عمده فن‌آوری اکسیداسیون تحریک شونده، بی‌اثر شدن کاتالیزور است که یکی از عوامل تنزل بازده کاتالیزور می‌باشد. بی‌اثر شدن، می‌تواند فرایند برگشت پذیر (مانند رسوب ذرات) و یا غیر قابل برگشت (سمی شدن، بی‌اثر شدن گرمایی) باشد. رسوب هنگامی رخ می‌دهد که ذرات ریز جریان گاز کثیف، سوراخ‌های بستر کاتالیزور را مسدود کنند. کاتالیزور رسوب گرفته ممکن است به صورت گرمایی، فیزیکی یا شیمیایی بازتولید شود. تمیز کردن گرمایی وقتی استفاده می‌شود که ذرات ته نشین شده، آلی باشند و در دمای بالاتر تبخیر شوند. تمیز کردن فیزیکی، بیرون راندن ذرات ریز از طریق ایجاد خلا یا وزیدن هوای فشرده روی کاتالیزور می‌باشد. این روش به صورت اثربخشی، وقتی که ذرات به شدت بر روی سطح کاتالیزور چسبیده‌اند استفاده می‌شود. تمیز کردن شیمیایی، معمول‌ترین روش برای تمیز کردن کاتالیزور و شامل غوطه‌ور کردن کاتالیزور درون یک اسید یا الکل می‌باشد.

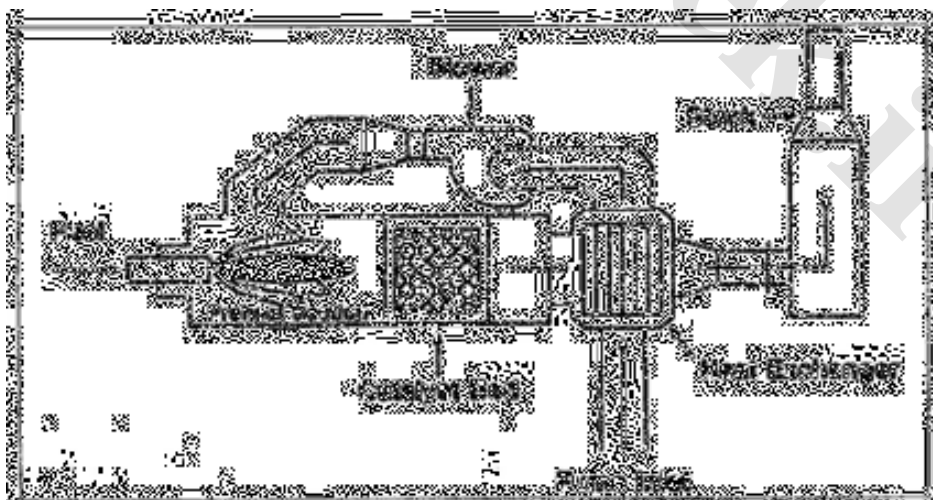
فرآیندهای واقع در اکسیداسیون تحریک شده، از گام‌های زیر پیروی می‌کنند:

۱. پخش ترکیبات آلی فرار (VOCs) بین یک لایه ایستا، اطراف سطح کاتالیزور
۲. جذب VOCs بر روی سطح کاتالیزور
۳. اکسیداسیون VOCs درحالی که روی کاتالیزور جذب شده اند
۴. آزاد شدن محصولات واکنش از سطح کاتالیزور
۵. پخش محصولات واکنش از لایه ساکن به توده گاز متحرک

واکنش‌های اولیه در یک سیستم اکسیداسیون تحریک شونده تقریباً همانند اکسیداسیون گرمایی هستند. تفاوت‌ها در واکنش‌های ثانویه مشخص می‌شود. چون که اکسیداسیون تحریک شونده در دمای پایین‌تری رخ می‌دهد تولید  $\text{NO}_x$  تنها وقتی اتفاق می‌افتد که نیتروژن در سوخت وجود داشته باشد. به سبب پتانسیل برای رسوب‌گیری کاتالیزور، گازهای کثیفی که با روش اکسیداسیون تحریک شونده سر و کار دارند، نباید حاوی مقدار زیادی ذرات ریز باشند.

### ۲.۳ کارکرد سیستم‌های اکسیداسیون تحریک شونده

یک سیستم اکسیداسیون تحریک‌شونده متداول در شکل ۱.۳ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱.۳ یک سیستم اکسیداسیون تحریک‌شونده متداول

در این سیستم ابتدا گاز آلوده وارد یک مبدل حرارتی شده و پیش‌گرم می‌شود. سپس گرمایش اصلی رخ می‌دهد تا دما به حد کارکرد بستر کاتالیزور برسد. گاز گرم شده از روی بستر کاتالیزور عبور کرده و اکسیداسیون رخ می‌دهد. طی فرآیند اکسیداسیون که  $H_2O$  و  $CO_2$  تولید می‌شود مقداری انرژی آزاد می‌شود. گاز پاکیزه از طریق یک دودکش به بیرون هدایت می‌شود اما پیش از آن در یک مبدل حرارتی گرمای خود را به جریان گاز ورودی که در ادامه می‌آید، می‌دهد.

دمای سوختن در یک اکسیداسیون تحریک شونده در منابع مختلف متفاوت گزارش شده است. معمولاً ممکن است از ۱۵۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس تغییر کند که محدوده معمول آن ۳۷۰ تا ۴۸۰ درجه می‌باشد [۳]. چون که واکنش اکسیداسیون روی سطح کاتالیزور رخ می‌دهد، بخار گاز کثیف باید قبل از پخش شدن روی لایه ساکن سیال اطراف کاتالیزور، به خوبی مخلوط شود. مخلوط کردن بخار گاز در یک اکسیدکننده تحریک شونده، با دو روش انجام می‌شود: روش اول که در آن گاز کثیف به طور یکسان، بر روی سطح کاتالیزور پخش می‌شود و مخلوط شدن VOCها و اکسیژن بهبود می‌یابد. روش دوم مخلوط کردن در خود بستر کاتالیزور است که در آن پیچ و خم دار بودن مسیر جریان گاز کثیف، اجازه بیشتری به مخلوط شدن VOCها و اکسیژن درون گاز می‌دهد.

### ۳.۳ بازدهی حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs)

بازدهی تجزیه و حذف VOCها بستگی به ترکیبات و غلظت VOC، دما، غلظت اکسیژن، خواص کاتالیزور و سرعت فضایی<sup>۱</sup> دارد. سرعت فضایی که یک مفهوم کاربردی در اکسیدکننده‌های تحریک‌شونده است به صورت دبی حجمی گاز ورودی به بستر کاتالیزور تقسیم بر حجم بستر کاتالیزور تعریف می‌شود. با افزایش سرعت فضایی، بازدهی تجزیه‌ی VOC کاهش می‌یابد و با افزایش دما بازدهی تجزیه‌ی VOC افزایش می‌یابد.

<sup>1</sup> Space velocity

به عنوان مثال کاتالیزوری که در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس (۸۴۰ درجه فارنهایت) کار می‌کند و دارای حجم بستر ۰/۱۴ تا ۰/۵۷ متر مکعب ( ۰/۵ تا ۲ فوت مکعب) است، در ازای جریان آلوده‌ای با دبی  $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$  ( ۱۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه) می‌تواند تا ۹۵ درصد VOC را تجزیه نماید[۴]. بازدهی‌های بالاتر (۹۸ تا ۹۹ درصد) هم قابل دستیابی است اما نیاز است که کاتالیزور حجم بیشتری داشته باشد و/یا دما بالاتر رود. این گونه سیستم‌ها معمولاً به طور اختصاصی برای یک پروژه‌ی تعریف شده‌ی خاص طراحی می‌شوند.

### ۴.۳ درباره طراحی سیستم‌های اکسیداسیون تحریک‌شونده

طراحی کاتالیزور به چندین مشخصه جریان گاز کثیف بستگی دارد، مانند نوع و مقدار VOCها، نرخ جریان، دما و افت فشار مورد نظر. دیگر عواملی که در طراحی کاتالیزور تأثیر می‌گذارد، عبارت است از بازده تجزیه آلاینده مورد نظر، احتیاج به ماندگاری و محدودیت‌های مکان نصب دستگاه.

زمان اقامت<sup>۱</sup> گاز آلاینده از عوامل موثر بر بازده تجزیه آلاینده‌های مورد نظر است. زمان اقامت در اکسیدکننده تحریک شونده بسیار کم است، بنابراین معکوس زمان اقامت یعنی سرعت فضایی، به عنوان پارامتر طراحی استفاده می‌شود. سرعت فضایی در اکسیدکننده تحریک شونده ممکن است از ۱۵۰۰۰ تا  $1/h$  ۸۰۰۰۰ تغییر کند که محدوده معمول آن، برای کاتالیزورهای فلزات گران‌بها بین ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ و برای کاتالیزورهای پایه فلزی، بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ می‌باشد[۳]. اختلاف این دو، به سبب این واقعیت است که کاتالیزورهای فلزات گران‌بها واکنش پذیرتر هستند و در نتیجه زمان اکسیداسیون کمتری نیاز دارند.

به سبب دمای نسبتاً بالایی که در آن اکسیداسیون تحریک شونده رخ می‌دهد، بازیافت گرمای گاز خروجی می‌تواند به طور قابل توجهی، مصرف سوخت را کاهش دهد. در نظر گرفتن این نکته در طراحی می‌تواند به میزان محسوسی هزینه‌ی عملیاتی سیستم را کاهش دهد.

<sup>1</sup> residence time

## ۵.۳ کاربردهای صنعتی متداول

کاتالیزورهای اکسید کننده بیشتر برای کاهش انتشار آلاینده‌ها از منابع ایستای آلاینده، به کار می‌روند. صنایع عمده‌ای که کاتالیزورها در آن کاربرد دارند از این قرار است:

- صنایع تولید کننده حلال‌ها
- ریخته‌گری
- تولید کاغذ صافی
- ایستگاه‌های بارگیری مخازن بنزین
- صنایع تولید ترکیبات شیمیایی آلی
- لاستیک سازی و صنعت پلیمر
- تولید پلی‌اتیلن، پلی‌استیرن و پلی‌استر

بهترین شرایط برای اکسیدکننده‌های کاتالیزوری، جریان‌های گازی است که دارای دبی حجمی کم و نیز تغییرات اندکی در نوع و غلظت VOC می‌باشند. همچنین در این جریان‌ها مواد خطرناک یا رسوب کننده مانند سیلیکون، گوگرد، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق سنگین نباید حضور داشته باشند.

## ۶.۳ بار آلاینده<sup>۱</sup>

اکسید کننده‌های کاتالیزوری به طور مؤثر برای غلظت‌های بسیار کم - تا ۱ ppmv یا کمتر- به کار رفته‌اند و می‌روند. همانند اکسید کننده‌های حرارتی، برای ملاحظات امنیتی، حداکثر غلظت ترکیبات آلی در گاز

---

<sup>1</sup>Pollutant Loading



پسماند، باید به طور قابل ملاحظه‌ای زیر حد پایین شعله‌وری ( حد پایین انفجار، LEL ) ترکیبی که مهار می‌شود، باشد. در آمریکا به عنوان یک قانون، ضریب اطمینان ۴ (یعنی ۲۵ درصد LEL) استفاده می‌شود [۴]. در صورت نیاز می‌توان گاز پسماند را با هوای محیط رقیق کرد تا غلظت کاهش یابد.

### ۷.۳ اقدامات پیش تصفیه‌ی مورد نیاز، بر روی گاز پسماند

اگر گاز پسماند شرایط مورد لزوم را داشته باشد نیاز به اقدامات پیش تصفیه نیست، با این حال گاهی اوقات پیش از ورود گاز به اکسید کننده لازم است تا ذرات معلق (PM) از جریان پسماند حذف شود. ذرات معلق می‌توانند به سرعت بر روی کاتالیست تشکیل یک لایه را بدهند به گونه ای که نواحی فعال کاتالیزور نتوانند آلاینده‌های موجود در جریان گاز را اکسید کنند. چنین تأثیری کور کردن<sup>۱</sup> نام دارد و می‌تواند به مرور زمان کاتالیست را غیر فعال کند. به خاطر اینکه تمامی سطوح فعال کاتالیست شامل سوراخ‌های نسبتاً کوچک اند، ذرات معلق نباید آن قدر بزرگ باشند که باعث کور کردن کاتالیست شوند. هیچ راهنمایی کلی‌ای برای میزان غلظت و اندازه‌ی ذرات معلق که کاتالیست بتواند آن را تحمل کند وجود ندارد. چرا که اندازه‌ی منافذ و حجم کاتالیست‌ها با یکدیگر بسیار متفاوت است. این گونه اطلاعات را باید از تولید کنندگان کاتالیست دریافت کرد.

### ۸.۳ مزیت‌های فن‌آوری کاتالیتیک و معایب آن

با مقایسه فرآیند اکسید شدن چهار نوع VOHAP توسط کوره‌های حرارتی و کاتالیزوری، بعضی مزایای فن‌آوری اکسیداسیون کاتالیتیک ظاهر می‌شود. به عنوان مثال، برای تجزیه HCN (که در مقایسه با

<sup>1</sup> blinding

سایر VOHAPها در مقابل حرارت مقاوم تر است ) به کوره گرمایی ای نیاز است که در دمای  $982^{\circ}\text{C}$  و با زمان اقامت  $1/5$  ثانیه کار کند تا به تخریب بیش از ۹۹ درصد برسد، در مقایسه با سیستم کاتالیتیک که برای بدست آوردن همان بازده تخریب، باید در دمای  $249^{\circ}\text{C}$  و با زمان اقامت  $0/24$  ثانیه کار کند. بنابراین، فن آوری حرارتی به راکتوری با اندازه ایی بیش از ۶ برابر بزرگ تر نسبت به راکتور سیستم کاتالیتیک، نیاز دارد. همچنین کوره گرمایی با دمای بسیار بالاتر، به موادی با ساختار بسیار قوی تری نیاز دارد و نسبت به سیستم کاتالیتیک، انرژی بسیار بیش تری مصرف می کند. یکی دیگر از مزایای سیستم کاتالیتیک، این است که کمترین مقدار  $\text{NO}_x$  را به علت عملکردشان در دماهای پایین، تولید می کند و  $\text{CO}$  تولید شده در کوره، به  $\text{CO}_2$  اکسید می شود .

خلاصه مزایای سیستم اکسیداسیون تحریک شونده :

۱. نیاز کمتر به سوخت
۲. دمای عملکرد پایین تر و در نتیجه عدم نیاز به تجهیزات مقاوم در دمای بالا
۳. نیاز به فضای کوچک تر
۴. خطر کم تر آتش سوزی

خلاصه معایب سیستم اکسیداسیون تحریک شونده :

۱. هزینه نگهداری بیش تر
۲. هزینه سرمایه گذاری بیش تر نسبت به اکسیداسیون گرمایی
۳. بی اثر شدن کاتالیزور در طول زمان

## ۹.۳ اکسیداسیون فوتوکاتالیتیک<sup>۱</sup>

برای فهم کامل اکسیداسیون فوتوکاتالیتیک، بایستی ابتدا کمی درباره فلزی که به عنوان کاتالیزور به کار می‌رود - در این جا تیتانیوم - بیشتر بدانیم. تیتانیوم به عنوان فلز سبک، مقاوم و ضد خوردگی شناخته شده است. تیتانیوم این خواص را به دلیل لایه اکسید شده یعنی تیتانیوم اکسید ( $TiO_2$ ) بسیار نازک روی سطحش دارا می‌باشد. این پوشش نامرئی کاملاً جالب توجه است چراکه اگر این لایه خراشیده یا خراب شود، به سرعت در مجاورت آب یا هوا، خود را بازسازی می‌کند. تیتانیوم اکسید همچنین دارای نسبت شکست نور<sup>۲</sup> بسیار بالایی است و هنگامی که در معرض پرتو فرابنفش (دارای طول موج کم‌تر از ۳۸۵ nm) قرار می‌گیرد، انرژی وارد به الکترون‌ها از انرژی باند گپ<sup>۳</sup> ماده (مقدار انرژی‌ای که فوتون‌ها باید داشته باشند تا بتوانند پیوندهای اتمی الکترون‌ها را بشکنند) بیشتر می‌شود. آنچه که تولید می‌شود جفت‌های اکترون - حفره و رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) هستند که این‌ها مولکول‌هایی مانند ترکیبات آلی فرار (VOC) و بیوائروسول‌ها<sup>۴</sup> (ذرات جاندار معلق در هوا) را به کاتالیزور جذب می‌کنند. آلاینده‌های موجود در محیط به وسیله واکنشی که در طول این فرآیند رخ می‌دهد، به دلیل این واقعیت که رایکال‌های هیدروکسیل تمایل دارند که به چیزی بچسبند، به  $H_2O$  و  $CO_2$  اکسایش می‌یابند (شکل ۲.۳).

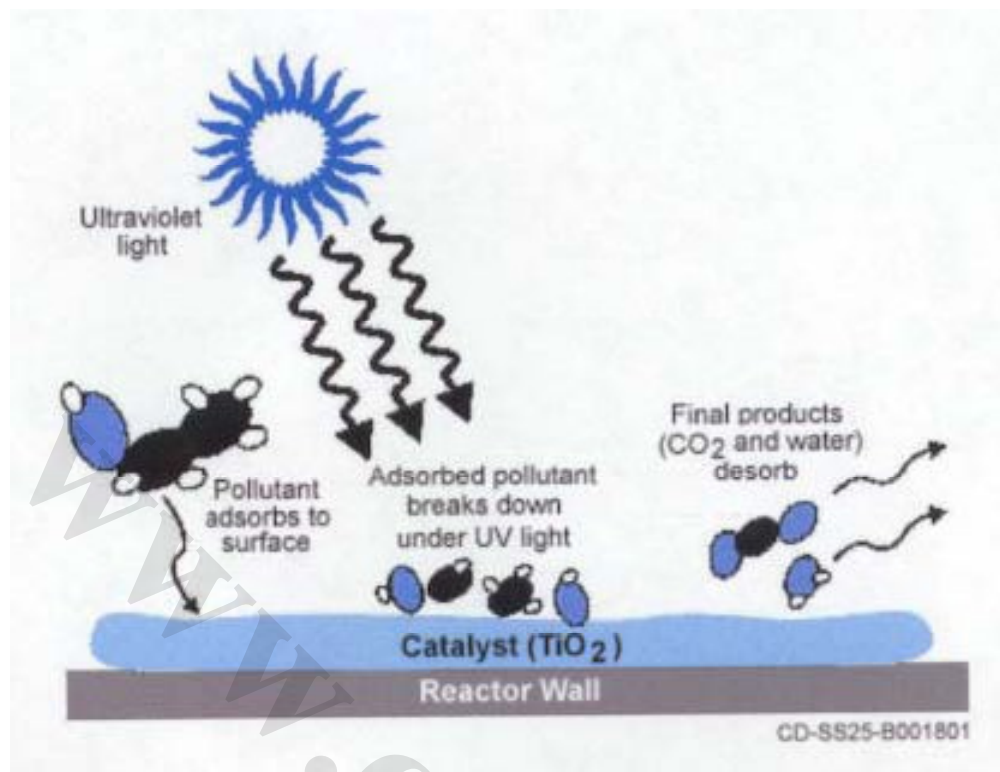
با فن‌آوری PCO بعد از این‌که VOC و بیوائروسول به لایه اکسید تیتانیوم چسبیدند، در تماس با رادیکال هیدروکسیل قرار می‌گیرند که ساختار مولکولی آن‌ها را تغییر می‌دهد. اکسیداسیون فوتوکاتالیتیک، بیوائروسول‌های جذب شده را به همان خوبی که VOC‌ها را تجزیه می‌کند، از بین می‌برد.

<sup>1</sup> photo-catalytic oxidation (PCO)

<sup>2</sup> refraction ratio

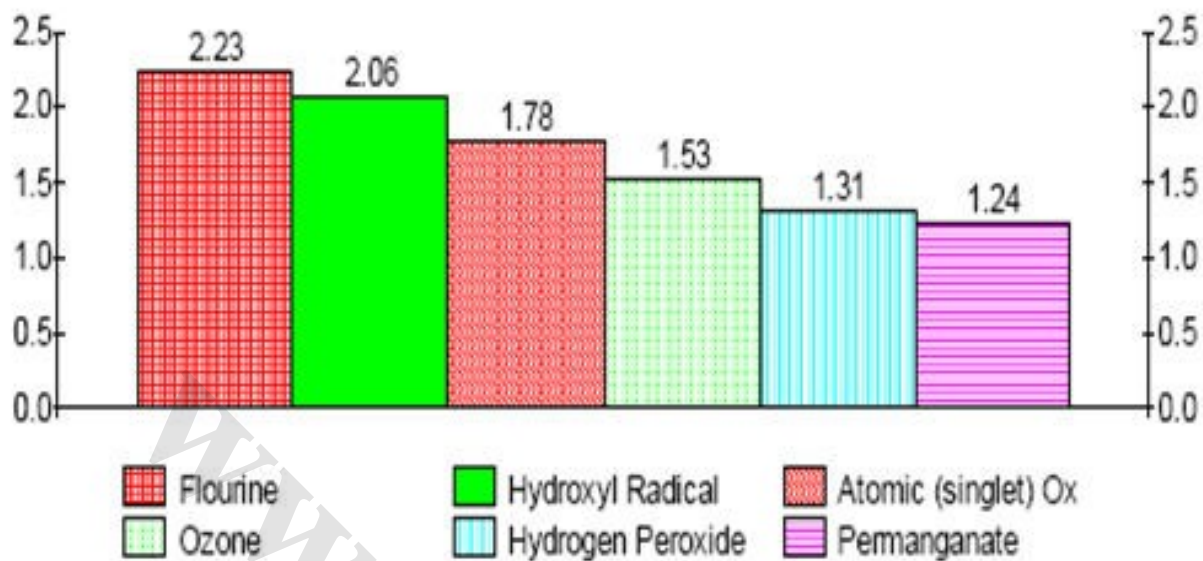
<sup>3</sup> the band gap energy

<sup>4</sup> bioaerosol

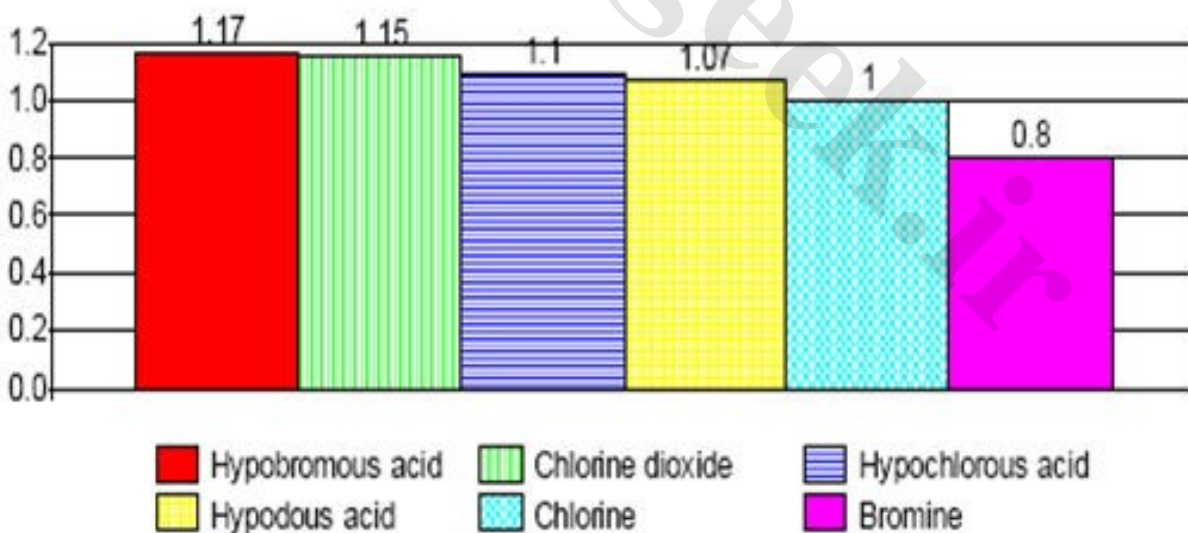


شکل ۲.۳ فرآیندهای اکسیداسیون فوتوکاتالیتیک

همان طور که از نمودارهای زیر (شکل ۳.۳ و ۴.۳) مشخص می شود رادیکال هیدروکسیل تنها نسبت به فلورین دوم است. با نگاه به قدرت اکسیداسیون ازن، می توانیم تعیین کنیم که قدرت آن به اندازه قدرت اتم اکسیژن یا رادیکال هیدروکسیل نیست.



شکل ۳.۳ قدرت اکسایش چند نوع ماده مختلف



شکل ۴.۳ قدرت اکسایش چند نوع ماده مختلف

خانواده‌ی پاک‌کننده هوا، دو فن‌آوری مختلف تولید اتم اکسیژن و تولید رادیکال هیدروکسیل را بکار می‌برد. تفاوت اصلی آن‌ها، در کنار این حقیقت که رادیکال‌های هیدروکسیل ۱۶ درصد در اکسید کردن آلاینده‌ها مفیدتر هستند، این است که فن‌آوری PCO، ازن باقی مانده تولید نمی‌کند. در حالی که هنگام استفاده از واحدهایی که اتم اکسیژن برای اکسید کردن آلاینده‌ها تولید می‌کنند، مقداری ازن می‌تواند به‌وجود آید.

برخی از مزایای سیستم PCO عبارت است از :

- بازده تخریب بالا در دمای اتاق
- نداشتن مواد افزودنی شیمیایی
- عدم تولید ازن
- مصرف انرژی پایین
- اکسیداسیون کامل به کربن دی‌اکسید و آب ممکن است.
- سودمند برای تعداد زیادی از مواد آلی
- قابل کاربرد در محیط‌های مرطوب
- طول عمر زیاد
- هزینه نگهداری پایین
- افت فشار ناچیز

## ۴. سیستم‌های زیست پالاینده

### ۱.۴ معرفی زیست پالایش

زیست پالایش<sup>۱</sup> یا تصفیه‌ی زیستی، مورد استفاده قرار دادن ریزجاندارانی است که در تجهیزات تصفیه کننده جا داده می‌شوند تا آلودگی‌ها را به صورت زیستی از جریان‌های آلوده پالایش کنند. در این دستگاه‌ها که به طور عمده برای پالایش گازهای آلوده استفاده می‌شوند، جریان گاز آلوده ابتدا مرطوب می‌شود و سپس وارد بستر زیست پالاینده<sup>۲</sup> شده و در آنجا تصفیه می‌شود. بستر زیست پالاینده شامل ریزجاندارانی است که وظیفه‌ی تصفیه‌ی ترکیبات آلاینده به عهده آنها است. این ریزجانداران مواد آلاینده را تجزیه و از انرژی ناشی از شکست این ترکیبات برای تکثیر و فعل و انفعالات سوخت و سازی<sup>۳</sup> خود استفاده می‌کنند.

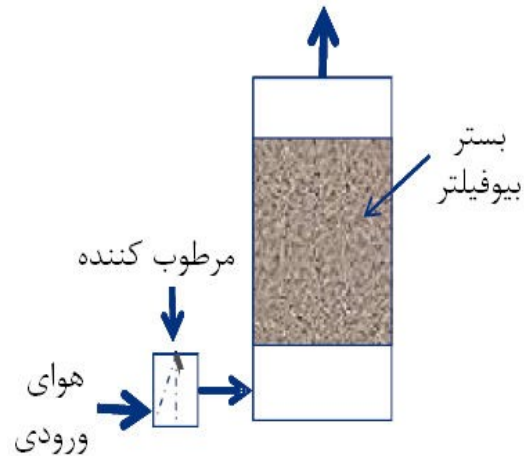
علت مرطوب شدن هوای ورودی این است که باید در بستر بیوفیلتر رطوبت به اندازه‌ی کافی وجود داشته باشد تا عمل تصفیه به خوبی صورت گیرد. (برای توضیح فرآیند تصفیه و نقش رطوبت در آن به ترتیب رجوع شود به قسمت‌های ۲.۴ و ۱.۴.۴). در بعضی دیگر از انواع سیستم‌ها که بعداً به آنها خواهیم پرداخت رطوبت مستقیماً به بستر زیست پالاینده منتقل می‌شود. هوای تصفیه شده از زیست پالاینده خارج شده و وارد محیط دیگری (معمولاً اتمسفر) می‌شود.

---

<sup>1</sup> biofiltration

<sup>2</sup> Biofilter

<sup>2</sup> metabolic



شکل ۱.۴ یک زیست‌پالاینده ساده

در شکل ۱.۴ نمایی از یک زیست‌پالاینده ساده را مشاهده می‌کنید. زیست‌پالاینده‌ها معمولاً این قدر ساده نیستند. بعداً به انواع مختلف و پیچیده‌تر این دستگاه‌ها می‌پردازیم.

## ۲.۴ فرآیندهای واقع در بستر یک زیست‌پالاینده

فرآیندهایی که در بستر یک زیست‌پالاینده رخ می‌دهد را می‌توان در چهار مرحله‌ی اصلی توضیح داد [۵]:

۱. گاز دارای ترکیبات آلاینده وارد فاز مایعی می‌شود که ریزجانداران را در بر گرفته است.
۲. ترکیبات آلاینده از قسمت بیرونی فاز مایع به سمت فاز فعال زیستی یا بیوفیلم - که بر روی بستر بیوفیلتر در حال رشد است - حرکت می‌کنند.
۳. آلاینده‌ها توسط ریزجانداران موجود در بیوفیلم تجزیه می‌شوند. در آنجا گاز زیست‌تجزیه‌پذیر اکسید شده و محصولات نهایی این تجزیه کربن‌دی‌اکسید، آب، نمک‌های معدنی و توده‌ی زیستی (تولید ارگانیک‌های بیشتر) می‌باشد.

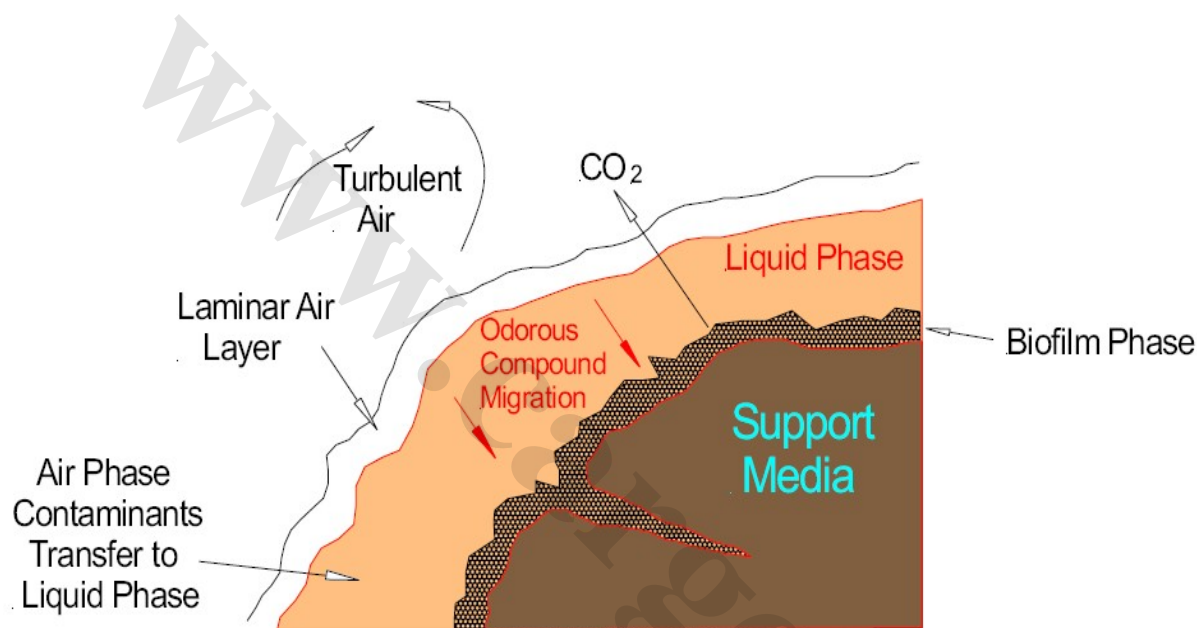


بسته به نوع زیست‌جانداران گاهی مقادیری کربن‌دی‌اکسید نیز پالایش می‌شود.

۴. محصولات نهایی به فاز مایع برمی‌گردند و وارد فاز گازی می‌شوند. سپس هوای پاکیزه زیست‌پالاینده را

ترک می‌کند

شکل ۲.۴ نشان‌دهنده‌ی فرآیندهای اصلی واقع در بستر یک زیست‌پالاینده است.



شکل ۲.۴ فرآیندهای واقع در بستر زیست‌پالاینده در یک نگاه

### ۳.۴ درباره‌ی ریزجانداران

از لحاظ نظری، برای هر ترکیب آلی جاندار وجود دارد که می‌تواند آن را تصفیه کند. ریزجاندارانی

وجود دارند که غیر از محیط‌های بسیار پر فشار و دارای دمای بالا می‌توانند در هر شرایطی ادامه حیات دهند

و حتی گسترش یابند. به خوبی شناخته شده که میکروپهای گوناگون می‌توانند هیدروکربن‌ها، ترکیبات کلردار، مواد ضد آفت و اشتعال پذیر را پالایش کنند.

مسئله‌ای که مهندسان در حوزه واکنش‌های زیستی با آن روبه‌رو می‌شوند این است که چگونه ریزجانداران را برای حذف ترکیبات مضر، کنترل و پیش‌بینی کنند. بنابراین اگرچه از نظر تئوری هر واکنش پالایش کننده امکان پذیر است و ریزجانداران مناسب در طبیعت وجود دارد، چالش اصلی این است که فرآیندها را طوری بهینه کنند تا بیش‌ترین بازده بدست آید. یکی از نکات مهم در این خصوص، تعیین محیطی است که بازده بیشینه شود. فاکتورهایی که برای تنظیم ممکن است نیاز شود شامل الکترون‌پذیرندگی و الکترون‌دهندگی، دما و حضور دیگر ریزجانداران می‌باشد. تصفیه زیستی به تماس مستقیم بین ریزجانداران و جریان آلوده نیاز دارد. این مهم زمانی می‌تواند اتفاق بیفتد که ریزجانداران در فاز مایع معلق شوند یا به سطح یک جسم بچسبند و بعد گاز آلوده از روی آن فاز مایع یا سطح عبور داده شود.

فراهم کردن محیط مناسب برای ریزجانداران، یکی از کلیدهای موفقیت در زیست‌پالایش می‌باشد. در یک طراحی خوب و مؤثر، ریزجانداران را برای تکمیل تصفیه مواد شیمیایی، بکار می‌گیرد، تا محصولاتی مانند کربن‌دی‌اکسید، آب و نمک‌های غیر آلی بدست آید. تصفیه ترکیباتی که مولکول‌های غیر آلی را در بر می‌گیرند، مانند کلر و گوگرد، محصولاتی مانند نمک‌های معدنی و اسیدها را نتیجه می‌دهند.

این واقعیت که آلودگی‌ها کاملاً از بین می‌روند، یکی از اصلی‌ترین برتری‌های زیست‌پالایش در مقایسه با روش‌های پالایش دیگر، مانند سوزاندن و جذب سطحی می‌باشد. در این روش هیچ احتیاجی به وسایل بازیافت نیست. به طور کلی، فرآیند شامل عبور دادن بخار آلوده در طول یک لایه زیستی است تا آلاینده‌ها به کربن‌دی‌اکسید و آب تبدیل شوند. حتی بسته به نوع بستر مقداری از کربن‌دی‌اکسید نیز حذف می‌شود. ترکیبات آلی موجود در جریان بخار قبل از اینکه با ریزجانداران پالایش شوند توسط رطوبت یک محیط واسطه جذب می‌شوند. برای مثال، در فرآیند جذب سطحی از خاک یا دیگر مواد آلی به عنوان فیلتر استفاده می‌شود.

همین که جریان آلوده بخار از فیلتر می‌گذرد، ترکیبات آلی بر روی مکان‌های قابل دسترس جذب می‌شوند. این ترکیبات، سپس توسط ریزجانداران، پالایش می‌شوند. در همان حین که ترکیبات آلی، پالایش می‌شوند، مکان‌های جذب برای ترکیبات جدید پاک می‌شوند.

زیست‌پالایش به صورت عملی، از سال ۱۹۶۰ میلادی در اروپا و آسیا استفاده شد و سپس در جریان‌های گزهایی که شامل ترکیبات فرّار مانند بنزن<sup>۱</sup>، تولوئن<sup>۲</sup> و استیرن<sup>۳</sup> می‌باشند، به کار برده شده است. زیست‌پالایش، به ویژه در جریان‌هایی با حجم زیاد هوا که دارای غلظت کمی از ترکیبات آلی فرار می‌باشند، بسیار مؤثر است. آلاینده‌های درون جریان بخار بر روی محیط واسطه و یا درون خود لایه زیستی جذب و سپس توسط ریزجانداران پالایش می‌شوند.

#### ۱.۳.۴ تئوری

به طور کلی، پالایش زیستی، فرآیندی است که در آن ریزجانداران ترکیباتی را پالایش می‌کنند. این فرآیند، همواره در طول تاریخ حیات بر روی کره‌ی زمین رخ داده و پیوسته در اطراف ما روی می‌دهد. تنها در قرن اخیر انسان توانسته به طور مصنوعی شرایط مطلوب را برای یک سری میکروب‌های مشخص ایجاد کند به طوری که ریزجانداران، در محیط مخصوص خود، به سرعت می‌توانند آلاینده‌ها را از بین ببرند. رویکرد زیستی در پالایش آب کثیف صنعتی، پیش قدم بوده و سپس در صنعت بهداشت و درمان و اخیراً در صنعت کنترل آلودگی هوا گسترش یافته است. اضافه کردن مقداری مواد مغذی ریز ساختار و درشت ساختار لازم است تا به نرخ مناسبی از پالایش دست یابیم. به هر حال، یک نوع مشخص از ریزجانداران، ممکن است نتوانند تا مورد نظر، آلاینده‌ها را درون جریان پالایش کنند. یک پالایش زیستی موفق شامل یک طیف گسترده از ریزجانداران

<sup>1</sup> benzene

<sup>2</sup> toluene

<sup>3</sup> styrene

است که با یکدیگر در یک شبکه ارتباطی پیچیده، کار می‌کنند. به این شبکه ارتباطی ریزجانداران، کنسرسیوم میکروبی<sup>۱</sup> اطلاق می‌شود. در حالی که معمولاً لازم نیست تا دقیقاً هر نوع میکروب را در کنسرسیوم تعریف کنیم، اما مهم است که تعیین کنیم که آیا میکروب مناسب برای حذف آلاینده‌ای خاص، آماده فعالیت است یا خیر. برای مثال، باکتری‌های متانترافیک<sup>۲</sup>، می‌توانند ترکیبات کلر دار و برم دار را تصفیه کنند، در حالی که اگر آلاینده‌ها شامل مواد نفتی<sup>۳</sup> باشند، این باکتری‌ها اصلاً مفید نیستند. مطالعات میدانی و تحقیقات آزمایشگاهی، طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی را مشخص کرده است که در شرایط مناسب می‌توانند پالایش زیستی شوند [۳] (جدول ۱.۴). زیست‌پالاینده‌ها همچنین قادر به پالایش آلاینده‌های خطرناک هوا نیز هستند (بخش ۶.۴).

Bromochloromethane	Phenol
Bromodichloromethane	toluene
Bromoform	Chlorophenol
Chloroethane	hexachlorobenzene
DiBromochloromethane	Monochlorobenzoate
Dichloroethane	Monochlorophenol
Methyl chloride	Dimethylnitrosamines
Methylene chloride	Acrolein
Benzene	Aldrin
Creosol	Diuron
Diphenylhydrazine	Kepone
Nitrobenzene	Toxaphene

جدول ۱.۴ لیست بعضی از ترکیبات آلی قابل تجزیه توسط میکروب ها

<sup>1</sup> Microbial consortium

<sup>2</sup> Methanotrophic

<sup>3</sup> Petroleum

## ۲.۳.۴ دسته بندی میکروبی

ریز جانداران در آغاز به دو گروه حیوانات و گیاهان دسته بندی می شدند که با کشف گونه های متنوع دیگر، این دسته بندی جامعیت خود را از دست داد. در سال ۱۸۶۶ میلادی، هاکل، حوزه سومی را به نام آغازیان<sup>۱</sup> پیشنهاد داد که شامل باکتری ها، جلبک ها، قارچ ها و تک یاختگان<sup>۲</sup> می باشد. آغازیان یا تک سلولی بودند یا چند سلولی. در سال ۱۹۵۰ میلادی، ظهور میکروسکوپ الکترونی، اجازه بررسی عمیقی در ارتباط با ساختار سلولی داد و ما را هدایت کرد به این درک که ساختار سلول موجودات زنده به دو دسته تقسیم می شود: ساده<sup>۳</sup> و پیچیده<sup>۴</sup>.

اعضای آغازیان یا ساده هستند و یا پیچیده. این مسئله ما را به دسته بندی حاضر جانداران به سه گروه راهنمایی کرد: ایوکاریوتس<sup>۵</sup>، ایوباکتری<sup>۶</sup>، ارکاباکتری<sup>۷</sup>. ایوکاریوتس می تواند چند سلولی باشد، با سلول ها و بافت های متنوع و گسترده، مانند گیاهان و حیوانات یا می تواند تک سلولی باشد با ساختار سلولی و بافتی ساده، مانند آغازیان. ایوباکتری ها، پروکاریوتیک<sup>۸</sup> هستند با ساختار شیمیایی سلولی مشابه با ایوکاریوتس، و شامل اکثر باکتری ها می شوند. ارکاباکتری ها، پروکاریوتیک هایی هستند با ساختار شیمیایی سلولی بی همتا. نمونه ارکاباکتری عبارت است از متانژن<sup>۹</sup> ها، ترموفیل<sup>۱۰</sup> ها و هالوفیل<sup>۱۱</sup> ها. بسیاری از وجه تمایز گروه های مختلف بر پایه

<sup>1</sup> Protists

<sup>2</sup> protozoa

<sup>3</sup> Procaryotic (simple)

<sup>4</sup> Eucaryotic (complex)

<sup>5</sup> Eucaryotes

<sup>6</sup> Eubacteria

<sup>7</sup> Archaeobacteria

<sup>8</sup> Procaryotic

<sup>9</sup> Methanogen

<sup>10</sup> Thermophile

<sup>11</sup> Halophile

ساختارهای شیمیایی و اختلاف در نوع غشای سلولی، سیتوپلاسم<sup>۱</sup>، عناصر سیتوسکلتال<sup>۲</sup> و کروموزوم<sup>۳</sup> های سلول می باشد.

ریزجانداران را می توان بر پایه ویژگی های متنوعی دسته بندی کرد. این ویژگی ها شامل ریخت شناسی<sup>۴</sup>، نیاز به اکسیژن، منبع انرژی و کربن و دما، می باشد. روش دسته بندی استفاده شده در بیش تر قسمت ها، بستگی به هدف تعریف و شناسایی دارد. برای مثال اینکه اطلاعات برای چه منظوری استفاده می شوند می تواند دسته بندی را جهت دهی کند و مثلاً اگر تمام توجه ما به این باشد که آیا ریزجانداران هوازی هستند یا نه، دسته بندی بر پایه منبع انرژی ضرورتی ندارد.

#### ۱.۲.۳.۴ ریخت شناسی

دسته بندی جانداران بر اساس اندازه و شکل به عنوان ریخت شناسی نام گذاری شده است. باکتری ها معمولاً کمتر از ۵ میکرو متر طول دارند، تک سلولی می باشند و به صورت میله ای، کروی یا میله ای- مارپیچی وجود دارند. یکی دیگر از ویژگی های یو باکتری ها، نداشتن اندام درون سلولی و فقط وجود یک کروموزوم می باشد.

---

<sup>1</sup> Cytoplasm  
<sup>2</sup> Cytoskeletal  
<sup>3</sup> Chromosome  
<sup>4</sup> Morphology

۲.۲.۳.۴ نیاز به اکسیژن

به طور کلی، ریزجانداران به دو گروه تقسیم می‌شوند: هوازی<sup>۱</sup> و بی‌هوازی<sup>۲</sup>. میکروبه‌های هوازی برای رشد و ادامه حیات به اکسیژن نیاز دارند، در حالی که میکروبه‌های بی‌هوازی نیاز به نبود اکسیژن در محیط دارند. با این دسته بندی، ریزجانداران به صورت دو گروه در می‌آیند:

- **انعطاف ناپذیر:** تنها در یک سری شرایط خاص توانایی زنده ماندن دارند.

- **تطبیق پذیر:** می‌توانند بدون اکسیژن یا با اکسیژن زنده بمانند.

باکتری بی‌هوازی تطبیق‌پذیر شرایط بی‌هوازی را ترجیح می‌دهد، اما می‌تواند در حضور اکسیژن نیز رشد کند. یک مثال از این نوع، باکتری‌های روده‌ای می‌باشند که وقتی اکسیژن وجود دارد، به حالت تنفس هوازی تبدیل شوند و در نبود اکسیژن به حالت تخمیر در می‌آیند. بنابراین غیر معمول نیست که ترکیبات آلاینده در هر دو شرایط، توسط میکروبه‌های مربوطه، پالایش شوند، البته با نرخ متفاوت. وجود یا نبود اکسیژن برای بازیافت زیستی حائز اهمیت است. یک مثال از این مورد، تجزیه زیستی ترکیبات کلر دار مانند تری کلرو اتیلن<sup>۳</sup> (TCE) می‌باشد. باکتری‌های متانوتراфик، میکروبه‌های هوازی هستند که آنزیمی را تولید می‌کنند که متان را به عنوان منبع انرژی تجزیه می‌کند، در حالی که به طور هم‌زمان می‌تواند پیوندهای یگانه و دوگانه ترکیبات کلر دار را بشکند. TCE در طی چندین گام تبدیل به کربن دی‌اکسید، آب و مواد شبکه‌ای<sup>۴</sup> می‌شود. هر چند، در شرایط نبود اکسیژن، پالایش TCE با متانوزنها انجام می‌شود و در نتیجه واکنش‌های آن، ونیل کلرید<sup>۵</sup> که سمی‌تر از TCE می‌باشد، تولید می‌شود. بنابراین، بسیار مهم است که شرایط اکسیژن محیطی که واکنش رخ می‌دهد، را بدانیم.

<sup>1</sup> Aerobic

<sup>2</sup> Anaerobic

<sup>3</sup> Trichloroethylene

<sup>4</sup> Cellular material

<sup>5</sup> Vinyl chloride

تمام ریزجانداران از لحاظ مواد مورد مصرفشان برای رشد با یکدیگر فرق دارند. یک دسته بندی رایج که برای عملیات بازیافت زیستی گونه‌ای از ریزجانداران مفید است با مواد شبکه ایی و منبع انرژی مطابقت دارد و به نام دسته بندی غذایی شناخته شده است. کربن یک عامل اصلی ترکیبات مواد شبکه‌ای است و بنابراین برای رشد ریزجانداران ضرورت دارد. میکروبه‌های هتروتروفیک<sup>۱</sup> نیاز به کربن خود را از راه سوخت و ساز مواد آلی تأمین می‌کنند. به علت این که ترکیبات آلی به عنوان منبع کربن استفاده به انرژی بیرونی احتیاج ندارند. میکروبه‌های اتوتروفیک<sup>۲</sup> کربن خود را از ترکیبات غیر آلی مانند دی اکسیدکربن می‌گیرند. این یک فرآیند کاهش است و به انرژی خارجی احتیاج دارد. میکروبه‌های اتوتروفیک، جزو اولین رتبه زنجیره غذایی هستند که کربن مواد غیر آلی را به مواد آلی تبدیل می‌کنند. بسیاری از هتروتروفیک‌ها و اتوتروفیک‌ها که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، با یکدیگر مشابه هستند. طراح باید در نظر داشته باشد که یک تغییر اساسی در سطح سیستم زیستی ممکن است نتیجه پالایش آلاینده‌ها را دگرگون کند. برای دانشمندان روشن شد تقسیم بندی ریزجانداران به دو گروه هتروتروفیک و اتوتروفیک به درستی تنوع ریزجانداران و نیاز به انرژی‌شان را نشان نمی‌دهد.

منبع انرژی برای ریزجانداران، هم نور می‌باشد (فوتوهتروتروفیک<sup>۳</sup> و فوتواتوتروفیک<sup>۴</sup>) و هم واکنش‌های شیمیایی (کموهتروتروفیک<sup>۵</sup> و کمواتوتروفیک<sup>۶</sup>). کمواتوتروفیک انرژی خود را از اکسیداسیون ترکیبات غیرآلی بدست می‌آورد. کموهتروتروفیک، انرژی و همچنین کربن خود را از سوخت و سازهای زیستی همان ترکیبات آلی بدست می‌آورد. فتوسنتز<sup>۷</sup> فرآیندی است که رنگ دانه‌های سلول، نور را جذب می‌کند و زنجیره‌ای از

<sup>1</sup> Heterotrophic

<sup>2</sup> Autotrophic

<sup>3</sup> Photoheterotrophic

<sup>4</sup> Photoautotrophic

<sup>5</sup> Chemoheterotrophic

<sup>6</sup> Chemoautotrophic

<sup>7</sup> photosynthesis



واکنش‌ها را به راه می‌اندازد که اجازه ذخیره سازی انرژی درون سلول را می‌دهد. کلروفیل<sup>۱</sup> یکی از عمومی‌ترین رنگ‌دانه‌ها می‌باشد و به گیاهان رنگ سبز می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی ممکن است هوازی یا بی‌هوازی باشد و همچنین می‌تواند شامل ترکیبات آلی یا غیر آلی نیز باشد.

دسته بندی غذایی می‌تواند مطابق با حالت فیزیکی که مواد غذایی وارد سلول می‌شوند، به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شود. در موردی که اکسیژن برای میکروب لازم باشد، اتوتروفیک و هتروتروفیک می‌توانند انعطاف‌ناپذیر<sup>۲</sup> یا تطبیق‌پذیر<sup>۳</sup> باشد. با توجه به قابل مصرف بودن منابع کربن، میکروب‌ها می‌توانند بسیار تطبیق‌پذیر باشند، مانند باکتری‌های میله‌ای سایدمناس<sup>۴</sup>، که می‌تواند بیش از ۹۰ ترکیب آلی را مصرف کند یا میکروب‌هایی که به طور ویژه، تنها یک تا دو منبع کربن را مصرف می‌کنند. وقتی که یک میکروب می‌تواند چندین ترکیب آلی را مصرف کند و بیش از یک ترکیب نیز حاضر باشد، فرآیند انتخاب ترتیبی ترکیبات<sup>۵</sup> رخ می‌دهد که اشاره به فرآیند انتخاب ترجیحی ترکیبات<sup>۶</sup> دارد که در آن ریزجانداران، آلاینده‌های قابل دسترس را بر اساس هدف خاصی تصفیه می‌کنند. به طور کلی، ریزجانداران ابتدا ترکیباتی را تجزیه می‌کنند که بیش‌ترین مقدار انرژی را آزاد می‌کنند. دو سازوکار کلی که در فرآیند انتخاب ترتیبی رخ می‌دهد در ادامه توضیح داده شده است.

سرکوبی کاتابلیت<sup>۷</sup>. محصولات فرآیند تجزیه از تولید آنزیم‌های مورد نیاز برای سوخت و ساز عمده لایه‌ها جلوگیری می‌کنند. این شاید به سبب وجود لایه‌های باشد که در آغاز به سهولت تجزیه می‌شوند.

<sup>1</sup> chlorophyll

<sup>2</sup> restrictive

<sup>3</sup> facultative

<sup>4</sup> pseudomonas

<sup>5</sup> Sequential substrate uptake

<sup>6</sup> Preferential substrate uptake

<sup>7</sup> Catabolite repression

سرکوبی تولیدات پایانی<sup>۱</sup>. محصولات میانی یا پایانی که به دلیل تجزیه بخشی از یک لایه به وجود می‌آیند، از تولید آنزیم‌هایی که برای (معمولا برای قدم اول) تجزیه لایه، مورد استفاده قرار می‌گیرند، جلوگیری می‌کنند. این می‌تواند بر روی همان لایه یا دیگر لایه‌ها، تاثیر بگذارد.

روی هم رفته، هر ترکیب آلی به صورت طبیعی می‌تواند به عنوان منبع کربن یا سوخت، به وسیله بعضی ریزجانداران مصرف شود. این مسئله دو مورد دیگر را که در تقسیم بندی ریزجانداران، استفاده می‌شود، فراهم می‌کند: فوتوترافی<sup>۲</sup> و آکسوترافی<sup>۳</sup>. فوتوترافی به این معنا است که تمام نیازهای ریزجانداران به کربن از یک منبع اصلی کربن تأمین می‌شود. آکسوترافی اشاره به ریزجاندارانی دارد که علاوه بر یک منبع اصلی کربن به یک یا چند فاکتور رشد دیگر نیاز دارند.

#### ۴.۲.۳.۴ دما

میکروب‌های مختلف در رنج دماهای مختلف، حیات دارند. کمترین، بهینه و بیشترین دما برای باکتری‌ها از ۱۰- تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. بسیاری از ریزجانداران، ثابت کردند که وقتی پس از بیرون آمدن از محفظه‌ای با دمای پایینی چون  $194^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شوند، زنده ماندنی هستند. محدوده دمایی معمولی برای اکثر ریزجانداران بین ۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و سوخت و ساز بهینه‌شان بین ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد، رخ می‌دهد.

کمترین دما به عنوان دمایی تعریف می‌شود که در آن جانداران، در اثر دمایی پایین و توقف واکنش‌های درون سلولی، از رشد کردن باز می‌مانند. بیش‌ترین دما، دمایی است که رشد ریزجانداران به دلیل غیر فعال

<sup>1</sup> End-product repression

<sup>2</sup> phototrophy

<sup>3</sup> Auxotrophy

شدن اعضای درون سلولی، متوقف می‌شود. دمای بهینه، دمایی است که در آن نرخ رشد ریزجانداران بیش‌ترین مقدار می‌باشد. اکثر میکروب‌های پر بازده برای تصفیه ترکیبات خاص، نباید اصلاً وابسته به دماهای طراحی سیستم باشند. سه دسته جانداران پروکاریوتیک<sup>۱</sup> عبارت‌اند از: سایکروفیل<sup>۲</sup>‌ها، مسوفیل<sup>۳</sup>‌ها و ترموفیل<sup>۴</sup>‌ها.

سایکروفیل‌ها، در محدوده دمایی ۰ تا ۶ درجه، کارکرد بهینه دارند. مسوفیل‌ها، که بیشتر معمول هستند، در محدوده دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه کارکرد بهینه دارند. ترموفیل‌ها، در محدوده دمایی ۵۸ تا ۶۲ درجه سانتی‌گراد، کارکرد بهینه دارند. در مقایسه با دیگر روش‌های تقسیم‌بندی، سه دسته دمایی ذکر شده در طبیعت صریح و قابل تشخیص نیستند. میکروب‌هایی نیز وجود دارند که عملکردشان می‌تواند پهنه گسترده‌تری یا کمتری از این دسته بندی باشد. در حین طراحی، بایستی به دمای واقعی مکان توجه کرد و اینکه زیر ضربه زدن به میکروب‌ها، بر رشد و نرخ تصفیه‌شان تأثیر دارد.

### ۳.۳.۴ مواد مورد نیاز برای رشد و عملکرد بهینه ریزجانداران

تمام سلول‌ها به مواد مغذی و انرژی برای رشد، تولید آنزیم، هماهنگی و مدیریت عملکرد و تولید مثل احتیاج دارند. ترکیبات شیمیایی یک سلول نیازهای میکروب به مواد مغذی مرتبط را نشان می‌دهد. قسمت عمده مواد سلول، آب است. آب عنصری کلیدی است که در محیط برای رشد و عملکرد بهتر ریزجانداران لازم است. این محیط مرطوب، واسطه‌ی ابتدایی برای انتقال مواد غذایی درون میکروب می‌باشد. تقریباً ۹۵ درصد مواد جامد درون سلول، شامل هیدروژن، اکسیژن، کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد می‌باشد. ۲۴ عنصر مختلف، در غلظت و نسبت‌های متنوع برای حیات، لازم است. ترکیبات جامد مواد درون سلولی یک ریزجاندار در جدول زیر [۳] آمده است.

<sup>1</sup> procaryotic  
<sup>2</sup> psychrophile  
<sup>3</sup> mesophile  
<sup>4</sup> thermophile

عنصر	درصد
کربن	۵۰
اکسیژن	۲۰
نیتروژن	۱۴
هیدروژن	۸
فسفر	۳
سولفور	۱
پتاسیم	۱
سدیم	۱
کلسیم	۰/۵
منیزیم	۰/۵
کلر	۰/۵
آهن	۰/۲

جدول ۳.۴ درصد تقریبی عناصر یک سلول خشک

## ۱.۳.۳.۴ عناصر اصلی

عناصر اصلی سلولها شامل کربن، نیتروژن و فسفر می‌باشد. کربن، در شکل‌های متنوع از کربن آلی مانند گلوکز<sup>۱</sup> و فنول<sup>۲</sup>ها گرفته تا کربن غیر آلی مانند گاز دی‌اکسیدکربن در دسترس ریزجانداران قرار دارد.

---

<sup>1</sup> glucose

<sup>2</sup> phenol

منبع نیتروژن نیز می‌تواند آمونیاک<sup>۱</sup>، نیترات<sup>۲</sup>ها، مولکول نیتروژن، نیتروژن آلی یا یک گروه آمینو یا همان آمینو اسید باشد. فسفر می‌تواند از ارتوفسفات<sup>۳</sup> یا از نمک‌های فسفات غیر آلی معدنی شده گرفته شود.

#### ۲.۳.۳.۴ مواد غذایی فرعی

کمتر از ۵ درصد مواد سلولی، از مواد غذایی فرعی ساخته شده است. این‌ها به عنوان کوفاکتور<sup>۴</sup>های آنزیمی و جزء سازنده آنزیم ضروری هستند. دیگر مواد لازم برای رشد ریزجانداران، ویتامین<sup>۵</sup>ها (ترکیبات ویژه آلی که برای فعالیت‌های سلولی لازم هستند) و استریود<sup>۶</sup>ها (کنترل کننده‌های عملکردهای زیستی) می‌باشند. مواد غذایی و دیگر عناصر حیاتی بایستی به صورت محلول برای ریزجانداران در دسترس باشند. در حالی که مقدار ناکافی از مواد غذایی می‌تواند از فعالیت ریزجانداران جلوگیری کند، بسیاری از آن‌ها قابلیت ذخیره مقدار زیادی از مواد را دارند که این به پایداری آنها وقتی که شرایط تغییر می‌کند، کمک می‌کند.

#### ۳.۳.۳.۴ آنزیم‌ها

یک سلول از آنزیم‌ها برای کاتالیست کردن (سرعت دادن به آهنگ واکنش) استفاده می‌کند. یک آنزیم، مولکول زنجیره‌ای پروتئین است که دارای یک یا چند مکان اختصاصی برای مولکول‌های خاص یا برای واکنش خاص می‌باشد. آنزیم‌ها از کوفاکتورها و کوآنزیم<sup>۷</sup>ها ساخته شده‌اند. کوفاکتورها، ترکیبات غیر پروتئینی هستند

<sup>1</sup> ammonia

<sup>2</sup> nitrate

<sup>3</sup> orthophosphate

<sup>4</sup> cofactor

<sup>5</sup> vitamin

<sup>6</sup> steroid

<sup>7</sup> coenzyme

که به پروتئین غیر فعال (کوآنزیم) وصل می‌شوند تا یک آنزیم پیچیده تشکیل بدهند. آنزیم‌ها، هم طبیعی هستند و هم ساخته شده، هرچند آنزیم‌های طبیعی می‌توانند چندین برابر سریع‌تر از آنزیم ساختگی معادل عمل کنند.

پالایش آلاینده‌های آلی معمولاً با وساطت آنزیم‌های باکتری انجام می‌شود. فعالیت آنزیم‌ها می‌تواند با pH، دما، قدرت یونی و حضور یون‌های ویژه یا دیگر عامل‌های فیزیکی یا شیمیایی متأثر شود.

#### ۴.۳.۴ فاکتورهای رشد

ترکیبات آلی که یک جاندار، چه به عنوان پیش ماده سلول جدید و چه به عنوان جزء اصلی ماده آلی سلولی به آنها نیاز دارد و نمی‌تواند از منبع درونی تأمین شود، فاکتورهای رشد نامیده می‌شود. نمونه‌های فاکتور رشد، شامل آمینو اسیدها (مواد سازنده پروتئین‌ها)، ویتامین‌ها (ماده سازنده بعضی آنزیم‌ها)، پورین<sup>۱</sup>ها و پیریمیدین<sup>۲</sup>ها (مواد سازنده نئوکلیک اسید) می‌باشد. فاکتور رشد برای یک سلول به مقدار کمی لازم است.

#### ۴.۴ عوامل موثر بر کیفیت عملکرد بستر زیست‌پالاینده

در فن‌آوری زیست‌پالایش کار تصفیه را موجودات زنده موجود در بستر زیست‌پالاینده انجام می‌دهند. هرچقدر موجودات زنده نسبت به غیرجانداران در برابر شرایط محیطی حساس و ضعیف‌اند، یک زیست‌پالاینده نیز نسبت به یک دستگاه تصفیه‌ی مشابه (مثلاً یک کاتالیست‌کانورتور) از حساسیت بالاتری نسبت به شرایط کارکرد برخوردار است.

<sup>1</sup> purine

<sup>2</sup> pyrimidine

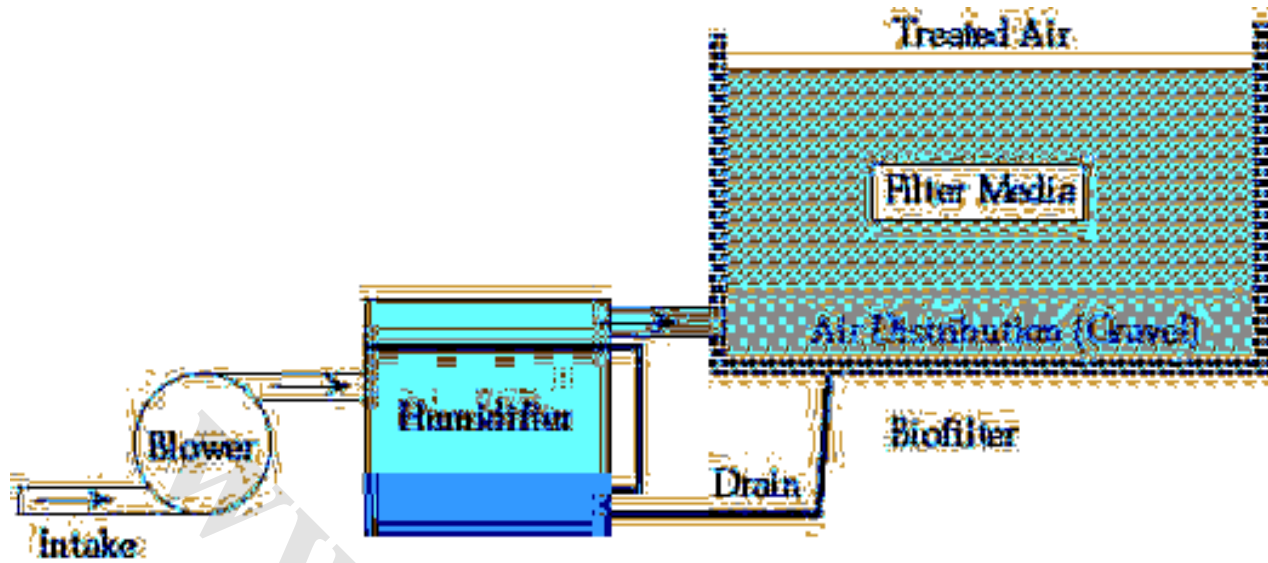
در قسمت ۳.۳.۴ درباره‌ی تغذیه‌ی ریزجانداران صحبت شد. در این جا به مقدار رطوبت، محدوده‌ی دمای، میزان pH بستر و افت فشار که مهم‌ترین عوامل موثر بر کیفیت عملکرد یک زیست‌پالاینده اند می‌پردازیم.

#### ۱.۴.۴ مقدار رطوبت

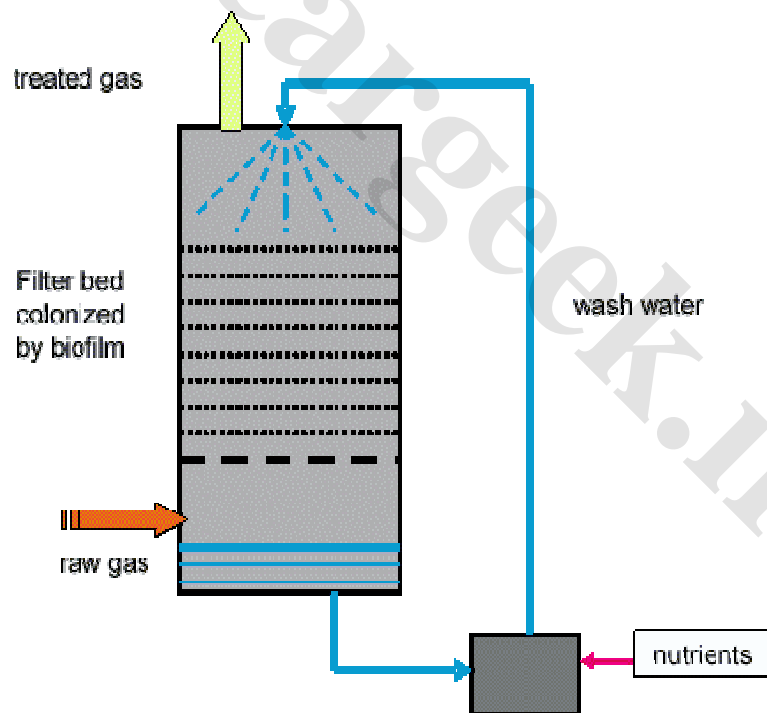
پژوهشگران بر این امر که میزان رطوبت سیستم زیست‌پالاینده حیاتی‌ترین شاخص عملکرد سیستم است توافق دارند. جریان گاز باعث می‌شود که بستر زیست‌پالاینده کم‌کم خشک شود. اگر مقدار آب خیلی کم شود فعالیت ریزجانداران کاهش می‌یابد و باعث کاهش نرخ تصفیه و در نتیجه ورود آلاینده‌ها به اتمسفر می‌شود. حضور مقدار زیاد آب نیز می‌تواند باعث بروز مشکلاتی از جمله ایجاد مناطقی بدون حضور هوا در بستر با پتانسیل بالا برای فاسد شدن و نیز افزایش افت فشار سیستم شود.

مقدار بهینه‌ی آب در پژوهشهای مختلف متفاوت گزارش شده است اما معمولا بین ۲۰ تا ۶۰ درصد وزنی قابل قبول است [۶].

در سیستم‌های متداول از دو راه برای اضافه کردن رطوبت به سیستم استفاده می‌شود. در بعضی سیستم‌ها گاز ورودی را مرطوب می‌کنند (شکل ۳.۴) و در بعضی سیستم‌ها آب را مستقیما به سطح بستر زیست‌پالاینده اسپری می‌کنند (شکل ۴.۴). برای مرطوب کردن گاز ورودی معمولا توصیه می‌شود که کمینه درجه‌ی اشباع رطوبت گاز ورودی به ۹۵ درصد برسد. بهینه‌ی این میزان ۹۹ تا ۱۰۰ درصد گزارش شده است. در روش اسپری مستقیم آب به سطح بستر زیست‌پالاینده نیز باید توجه کرد که قطرات آب کوچک باشند. معمولا برای جلوگیری از بهم چسبیدن ذرات بستر، قطر قطره‌های آب زیر ۱ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود. عمق بستر بین ۰/۵ تا ۲/۵ متر و بیشینه آهنگ آب ورودی  $0.15 \text{ gal/ft}^2 \cdot h$  (  $20/35 \text{ lit/m}^2 \cdot h$  ) توصیه شده است [همان].



شکل ۳.۴ یک زیست‌پالاینده که در آن برای تزریق رطوبت به دستگاه گاز ورودی را مرطوب می‌کنند



شکل ۴.۴ یک زیست‌پالاینده که در آن برای تزریق رطوبت به دستگاه آب را مستقیماً به بستر زیست‌پالاینده تزریق می‌کنند



فعالیت و رشد ریزجانداران در محدوده‌ی دمایی ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بهینه است [همان]. دماهای بالاتر توده‌ی زیستی را تخریب می‌کنند و دماهای پایین‌تر باعث کاهش فعالیت ریزجانداران می‌شوند. بسته به نوع سیستم ممکن است که در زمستان نیاز شود تا گاز ورودی پیش‌گرم شود. این عمل می‌تواند ما را مطمئن سازد که تجزیه‌ی مواد آلاینده توسط ریزجانداران در حد قابل قبولی قرار گیرد. همچنین اگر دمای گاز ورودی بالا باشد باید گاز ورودی پیش‌سرد شود تا ریزجانداران به حیات خود ادامه دهند.

#### ۳.۴.۴ مقدار pH بستر زیست‌پالاینده

مقدار pH در زیست‌پالاینده باید در حد خنثی و رو به قلیایی (بین ۷ تا ۸) باشد [همان]. وقتی گازهای غیر آلی تجزیه شوند ممکن است اسیدهای غیر آلی تولید شوند. برای مثال تصفیه‌ی  $H_2S$  باعث تولید  $H_2SO_4$  می‌شود. سایر اسیدهای غیر آلی که می‌توانند تشکیل شوند  $HCl$  و  $HNO_3$  هستند. این اسیدها در طول زمان می‌توانند pH سیستم را به طرز محسوسی کم کنند. همچنین  $CO_2$  تولید شده توسط ریزجانداران می‌تواند باعث کاهش pH شود. بستر زیست‌پالاینده تا حدی دارای خاصیت بافری است و می‌تواند تغییرات جزئی در pH را خنثی کند. با این حال اگر شرایط سیستم به گونه‌ای باشد که خاصیت بافری بستر کافی نباشد باید آهک به بستر اضافه شود تا میزان pH تنظیم شود. میزان آهک مورد نیاز مخصوصاً به مواد آلاینده بستگی دارد و تنها با آزمایش می‌توان آن را مشخص کرد. به عنوان مثال در یک پژوهش [۷] که برای حذف آلاینده  $NO$  توسط زیست‌پالاینده انجام شد این میزان ۱۰۰ گرم آهک به ازای هر یک کیلوگرم مخلوط بستر توصیه شده است.

## ۴.۴.۴ افت فشار

برای طراحی دقیق و بهینه‌ی یک سیستم تصفیه زیستی باید از میزان افت فشار آگاه بود چرا که با دانستن آن است که می‌توان توان فن مورد نیاز را مشخص کرد. این کار را می‌توان با استفاده از یک مانومتر انجام داد. اما مسئله‌ی اصلی‌ای که مهندسين باید به آن توجه کنند افزایش افت فشار در طول زمان است. افت فشار در بستر زیست‌پالاینده به جنس بستر، تخلخل<sup>۱</sup>، میزان رطوبت و میزان تراکم بستر بستگی دارد. تخلخل بستر با زمان تغییر می‌کند چرا که بستر زیست‌پالاینده متراکم‌تر می‌شود. علت این تراکم معمولاً تجمع گرد و خاک در بستر و نیز رشد ریزجانداران است. وقتی رشد ریزجانداران به حد خیلی زیادی برسد تا جایی که سیستم خوب کار نکند باید بستر را تعویض کرد. البته طراحی‌هایی نیز به منظور حل این مشکل صورت گرفته است که در قسمت زیست‌پالاینده‌های چندفازی (۴.۵.۴) توضیح داده شده است.

گاهی رطوبت زیاد است که باعث افت فشار می‌شود. در یک پژوهش [همان] بر روی سیستم‌های زیست‌پالایش برای حل این مشکل آمده است که این وضعیت از طریق استفاده از جریان گاز خشک کننده به مدت چند ساعت بر طرف می‌شود. پس از آن تنظیمات دما به گونه‌ای تغییر داده شود تا میزان رطوبت زیست‌پالاینده کم شود و در همان حال دما از محدوده‌ی خود برای حفظ شرایط مناسب برای ریزجانداران تجاوز نکند.

## ۵.۴ سیستم‌های متداول تصفیه زیستی

از بین انواع سیستم‌های تصفیه زیستی که با توجه به نیازهای صنعت و نیز ایده‌های مهندسين اختراع و به کار می‌روند سه مورد رایج‌تر و پرکاربردتر است. در واقع می‌توان گفت سایر سیستم‌ها نیز به نوعی زیر

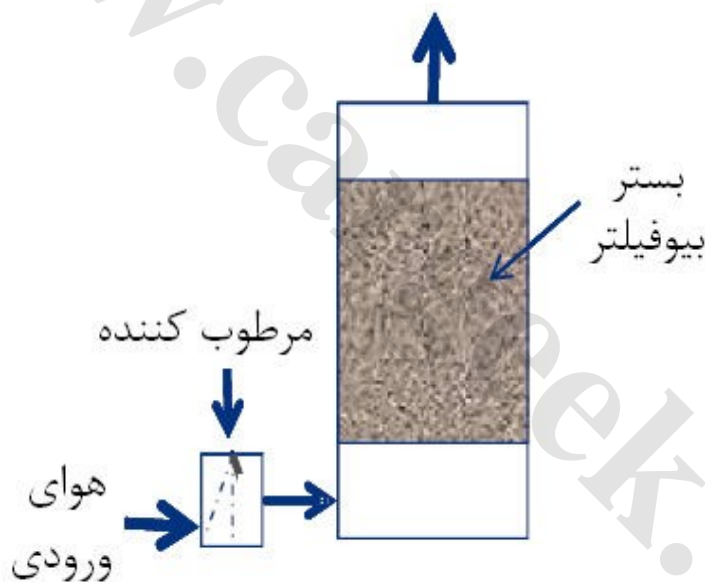
---

<sup>1</sup> porosity

مجموعه‌ی این سه نوع سیستم هستند. این سیستم‌ها بیوفیلتر<sup>۱</sup>، بیوتریکلینگ<sup>۲</sup> فیلتر و بیواسکرابر<sup>۳</sup> نام دارند. در ادامه به معرفی هر کدام و سپس مزایا و معایب آنها پرداخته شده است.

#### ۱.۵.۴ بیوفیلتر

ساده‌ترین انواع سیستم‌های تصفیه زیستی و از نوع اولیه آنها می‌باشد. در این سیستم گاز آلوده قبل از ورود به بستر بیوفیلتر مرطوب می‌شود. سپس وارد بستر شده، در آنجا تصفیه می‌شود و هوای تصفیه شده وارد اتمسفر می‌شود (شکل ۵.۴).



شکل ۵.۴ یک بیوفیلتر

<sup>۱</sup> از این جا معلوم می‌شود که واژه‌ی biofilter به دو معنا به کار می‌رود؛ یکی به معنای عام آن که همان فن‌آوری پالایش جریان‌های آلوده به کمک ریزجانداران است و ما آن را به زیست‌پالاینده برگردانده‌ایم و دیگری به معنای یک نوع خاص از این فن‌آوری است که در این جا با همان نام بیوفیلتر توضیح داده شده است.

<sup>۲</sup> biotrickling filter

<sup>۳</sup> bioscrubber

#### ۱.۱.۵.۴ مزایای بیوفیلتر

۱. طراحی ساده و بدون نیاز به سیستم چرخشی آب.
۲. مرطوب کردن گاز پیش از ورود به بستر باعث می‌شود تا مقداری از ذرات درشت از جریان گاز حذف شوند.

#### ۲.۱.۵.۴ معایب بیوفیلتر

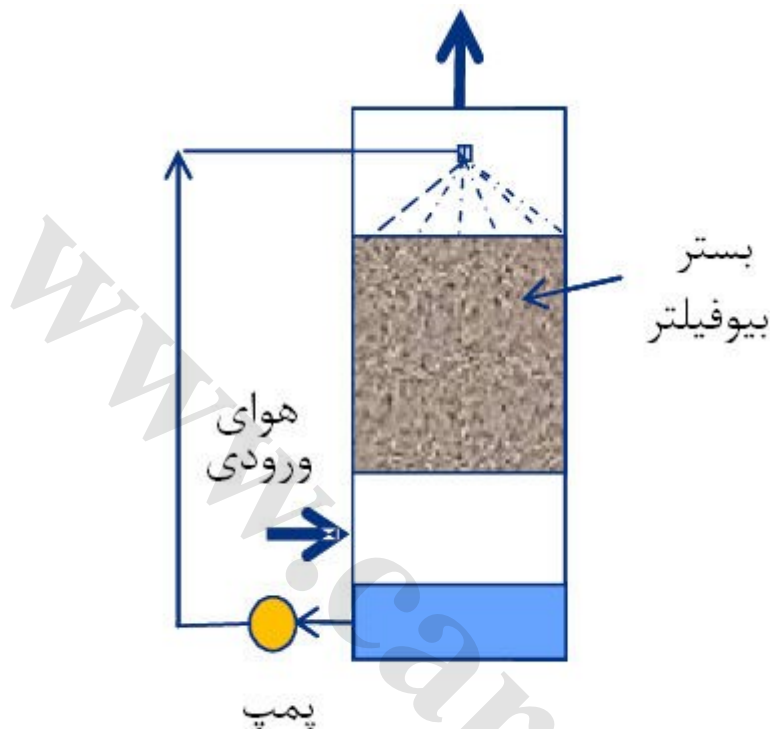
۱. قادر به کنترل رشد توده‌ی زیستی نیست، در نتیجه بستر زیستی دچار گرفتگی می‌شود
۲. قادر به فراهم آوردن نیتروژن، فسفر و سایر مواد مغذی که برای بالا بردن بازدهی فرآیند تجزیه‌ی زیستی لازم اند نمی‌باشد.
۳. قادر به کنترل و حذف ذرات معلق کوچک در فاز گازی نیست
۴. ترکیبات دارای وزن مولکولی بالا مانند ترپن<sup>۱</sup> ( $C_5H_8$ ) در بستر انباشته شده و آن را دچار گرفتگی می‌کنند.
۵. حذف بخشی از ترکیبات قابل حل در آب از فاز گازی و ورود آنها به فاز مایع (در قسمت پیش‌مرطوب کننده) باعث تولید آب آلوده می‌شود.

#### ۲.۵.۴ بیوتریکلینگ فیلتر

در این سیستم به جای اینکه گاز ورودی پیش‌مرطوب شده و سپس وارد بستر شود رطوبت را مستقیماً به سطح بستر می‌دهند. در این جا پمپ آب مسئول به جریان انداختن چرخه‌ی آب است. در این سیستم

<sup>1</sup> terpene

می‌توان مواد مغذی مورد نیاز ریزجانداران را از طریق چاهک آب وارد چرخه‌ی آب و سپس بستر زیست‌پالاینده کرد (شکل ۶.۴).



شکل ۶.۴ یک بیوتریکلینگ فیلتر

#### ۱.۲.۵.۴ مزایای بیوتریکلینگ فیلتر

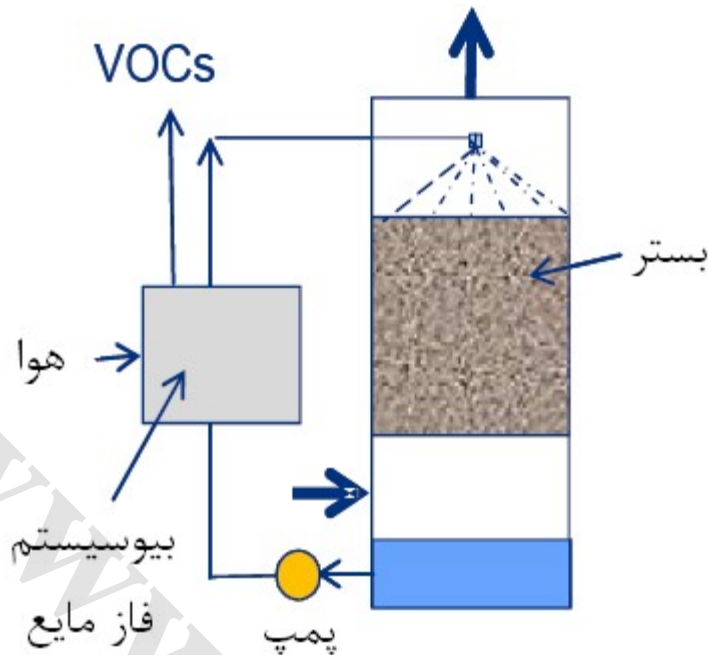
۱. آبی که به صورت قطره‌ای بر روی بستر پاشیده می‌شود می‌تواند هوا را مرطوب کند؛ از طریق این آب مواد مغذی لازم مانند نیتروژن و فسفر تامین می‌شوند و pH تا حدودی کنترل می‌شود.
۲. جریان آب می‌تواند توده‌ی زیستی اضافی را از بستر جدا کند.
۳. چرخه آب باعث قرارگیری ریزجانداران در آب می‌شود و فرآیند تجزیه آلاینده‌ها را سرعت می‌بخشد.

#### ۲.۲.۵.۴ معایب بیوتریکلینگ فیلتر

۱. ترکیبات قابل حل در آب که در فاز گازی موجودند در آب چرخه انباشته می‌شوند و از بالای بستر وارد هوای خروجی شده و در نتیجه بازدهی سیستم تصفیه کاهش می‌یابد.
۲. ترکیبات دارای وزن مولکولی بالا در آب انباشته شده و بستر را دچار گرفتگی می‌کنند.
۳. ذرات معلق موجود در فاز گازی وارد منافذ بستر شده و جلوی جریان آب و گاز را می‌گیرند.

#### ۳.۵.۴ بیواسکراپر

این سیستم مشابه بیوتریکلینگ فیلتر است با این تفاوت مهم که از یک سیستم تصفیه آب در مسیر چرخه استفاده می‌شود تا ترکیبات سنگین قابل حل در آب جداگانه تصفیه شوند (شکل ۷.۴).



شکل ۷.۴ یک بیواسکراپر

#### ۱.۳.۵.۴ مزایای بیواسکراپر

۱. تمامی مزایای بیوتریکلینگ فیلتر را دارد
۲. از طریق هوای ورودی به بیوسیستم فاز مایع می‌توان ارگانیس‌های زنده را وارد چرخه کرد و از این طریق سیستم در مقابل کمبود ارگانیس‌ها مقاوم‌تر می‌شود.
۳. عمده‌ی ترکیبات قابل حل در آب توسط سیستم تصفیه‌ی فاز مایع خارجی، تصفیه می‌شوند.

#### ۲.۳.۵.۴ معایب بیواسکراپر

۱. اگر سیستم تصفیه‌ی فاز مایع خارجی یک سیستم باز باشد آن دسته از ترکیبات قابل حل در آب که فرار هستند دوباره وارد هوا می‌شوند.

۲. ذرات معلق موجود در فاز گازی وارد منافذ بستر شده و جلوی جریان آب و گاز را می‌گیرند.
۳. ترکیبات غیر قابل حل در آب که دارای وزن مولکولی زیاد باشند در بستر انباشته می‌شوند و آن را دچار گرفتگی می‌کنند.
۴. اگر سیستم به طرز مناسبی برای کنترل رشد توده‌ی زیستی طراحی نشده باشد، ممکن است به علت افزایش توده‌ی زیستی دچار گرفتگی شود.
۵. اگر دمای گاز ورودی بالا باشد کم‌کم دمای سیستم تصفیه‌ی آب خارجی بالا می‌رود و می‌تواند باعث ورود آلاینده‌های فرآر بیشتری به هوا شود.

#### ۴.۵.۴ زیست‌پالاینده چندفازی

زیست‌پالاینده چندفازی بر تمامی معایب دستگاه‌های متداول تصفیه‌ی زیستی غلبه می‌کند. این سیستم آلاینده‌ی ورودی را در فازی (مایع یا گاز) که آلاینده بر اساس خواص چسبندگی‌اش در آن فاز حضور دارد، تصفیه می‌کند. به عنوان مثال یک ترکیب بسیار فرآر که به میزان کمی در آب حل می‌شود عمدتاً به صورت فاز گازی موجود است و به همین دلیل نیز باید در فاز گازی تصفیه شود. یک ترکیب با قابلیت حلالیت زیاد در آب و فرآریت پایین به طور عمده در فاز مایع است و در همین فاز باید تصفیه شود. همچنین اکثر ترکیباتی که دارای قابلیت حل شونده‌ی متوسط در آب و نیز فرآریت متوسط هستند باید در هر دو فاز گازی و مایع تصفیه شوند. بیوفیلترها و بیوتریکلینگ فیلتر سعی دارند تا تمامی آلاینده‌ها را در فاز گازی تصفیه کنند در حالی که بیواسکرابرهای متداول تصفیه‌ی کسری از آلاینده‌ها را که در آب قابل حل می‌باشند به یک سیستم تصفیه‌ی خارجی محوّل می‌کنند که معمولاً دچار مشکلاتی از جمله بازگشت آلاینده‌های فرآر به محیط پیرامون یا انباشتگی و خروج آلاینده‌ها از طریق جریان آب است. علاوه بر این هیچ کدام از این سیستم‌ها – بیوفیلتر، بیوتریکلینگ فیلتر و بیواسکرابر – برای تصفیه‌ی ذرات معلق در فاز گازی، تصفیه‌ی مواد چگالش‌پذیر که معمولاً



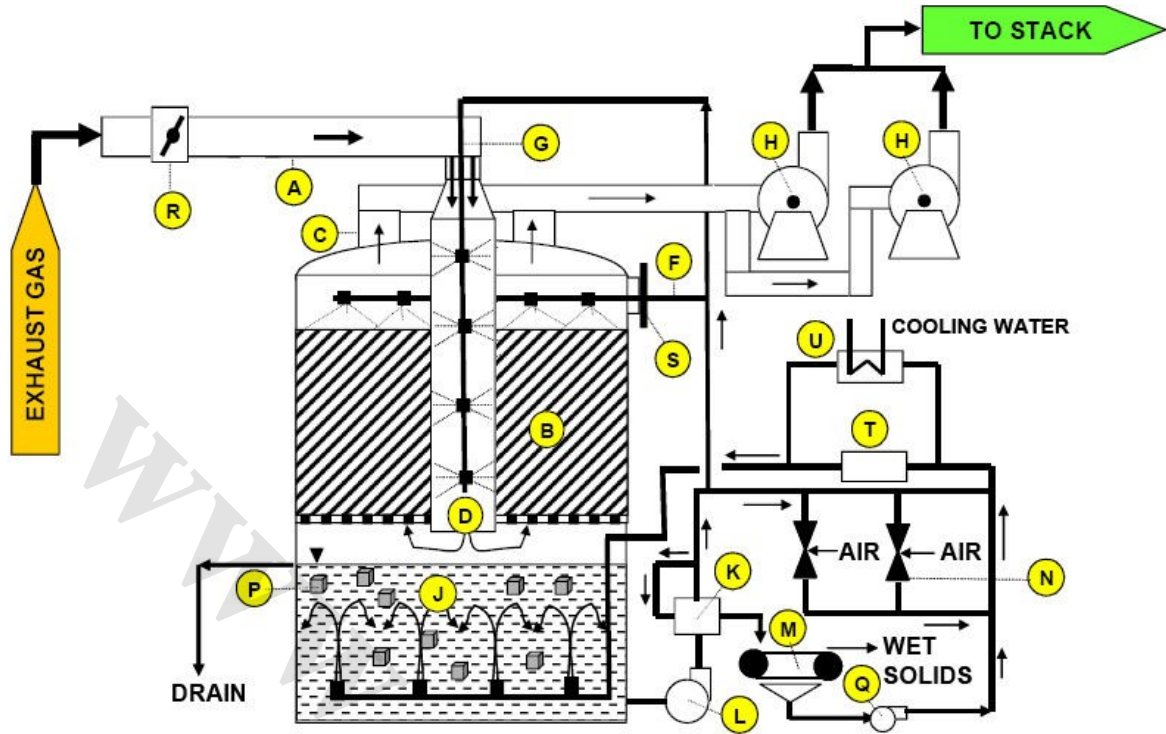
دارای وزن مولکولی زیاد هستند و می‌توانند شامل ترکیبات غیر قابل حل در آب مانند ترپن شوند و نیز اعمال پراکنده کردن گرما در شرایطی که جریان گاز ورودی دارای دمایی بالاتر از دمای معمول عملکرد جانداران است، مناسب نیستند.

شکل ۸.۴ یک زیست‌پالاینده چندفازی را نشان می‌دهد [۸]. در اینجا گاز ورودی در کانال در معرض افشانه‌ی آب قرار می‌گیرد و هم‌زمان هم دچار سرد سازی با تبخیر<sup>۱</sup> می‌شود و هم ذرات بزرگ آن ته‌نشین می‌شوند. گاز سپس وارد کانال مرکزی می‌شود و به سمت پایین جریان می‌یابد و بعد از آن ۱۸۰ درجه می‌چرخد و از پایین وارد بستر زیست‌پالاینده می‌شود. درون کانال مرکزی باز هم مقداری آب افشانه می‌شود تا ذرات کوچکتری که برای حمل شدن توسط جریان گاز رو به بالا - هنگامی که جریان گاز می‌چرخد و از طریق بستر زیست‌پالاینده به سمت بالا حرکت می‌کند - سنگین هستند، از جریان حذف می‌شوند. ذرات در چاهک مایعی که در پایین قرار دارند می‌افتند تا تصفیه گردند. ترکیبات قابل حل در آب و ترکیبات چگالش‌پذیر وارد چاهک مایع می‌شوند، در حالیکه ترکیبات بسیار فرّار و دارای حلالیت پایین در آب در فاز گازی باقی می‌مانند و در بستر زیست‌پالاینده تصفیه می‌شوند.

زیست‌پالاینده چندفازی از یک محیط واسطه سرامیکی استفاده می‌کند که گستره‌ی وسیعی از میکروارگانسیم‌ها را قادر می‌سازد تا به سطوح درونی و بیرونی آن بچسبند و این باعث می‌شود تا مساحت تماس زیادی بین جریان گاز آلوده و زیست‌لایه‌های فعال فراهم شود.

---

<sup>1</sup> evaporative cooling



شکل ۸.۴ یک زیست‌پالاینده چندفازی

#### ۱.۴.۵.۴ مزایای زیست‌پالاینده‌های چندفازی

مزایای عمده‌ی زیست‌پالاینده‌های چندفازی در مقایسه با بیوفیلترها، بیتریکلینگ‌فیلترها و بیواسکرابرها

در جدول ۲.۴ خلاصه شده است.

ویژگی زیست‌پالاینده چند فازی	موضوع
به وسیله پاشش آب به جریان گاز ورودی ذرات وارد فاز مایع می‌شوند و به درون چاهک مایع منتقل می‌شوند و سپس توسط یک فیلتر از چرخه حذف می‌شوند	حضور مواد جامد در گاز ورودی
به وسیله پاشش آب به گاز ورودی ذرات وارد فاز مایع می‌شوند و به درون چاهک مایع منتقل می‌شوند و با باکتری‌ها مخلوط شده و تصفیه می‌شوند	حضور ترکیبات چگالش پذیر در گاز ورودی
افشانه‌ی آب بر روی بستر زیست‌پالاینده باعث شست‌وشوی آن شده و بخشی از توده زیستی را نیز می‌شوید و وارد چاهک مایع می‌کند و این توده در آنجا تجزیه شده و مواد مغذی‌اش بازیافت می‌شوند	بسته شدن بستر زیست‌پالاینده به علت انباشته شدن ذرات کوچک و رشد ریزجانداران
رشد باکتری‌ها در چاهک مایع نقش یک منبع مداوم را برای باکتری‌های مناسب جهت حضور در بستر زیست‌پالاینده دارد	گرسنگی و تلف شدن ریزجانداران به هنگام خاموش کردن سیستم
تصفیه آب در چاهک مایع میزان آب آلوده‌ی خروجی را به کمینه می‌رساند، مصرف آب را کاهش می‌دهد و منبعی برای باکتری‌های مناسب جهت حضور در بستر زیست‌پالاینده است	تولید آب آلوده توسط زیست‌پالاینده (مصرف آب زیاد)
استفاده از روش سردسازی با تبخیر باعث خنک شدن گاز می‌شود	دمای بالای گاز ورودی

جدول ۲.۴ مزایای زیست‌پالاینده‌های چندفازی

## ۶.۴ بررسی حذف آلاینده‌های خودروها توسط فن آوری زیست‌پالایش

اصلی‌ترین آلاینده‌هایی که توسط خودروها (در این پروژه به طور خاص خودروهای دیزلی سنگین) تولید می‌شوند عبارتند از اکسیدهای نیتروژن و گوگرد، کربن مونواکسید، ذرات معلق و هیدروکربن‌ها. در ادامه به

پژوهش‌هایی می‌پردازیم که در آن‌ها مسئله‌ی حذف این مواد از طریق فن‌آوری زیست‌پالایش مورد بررسی قرار گرفته است تا میزان کارآمدی این فن‌آوری در مسئله‌ی مورد بحث این پروژه مشخص شود.

#### ۱.۶.۴ بررسی حذف اکسیدهای نیتروژن و گوگرد توسط زیست‌پالاینده‌ها

نشان داده شده است که بیوفیلترهایی که از خاک و کامپوست پر شده‌اند می‌توانند چه در حضور اکسیژن و چه در عدم حضور آن  $\text{NO}_x$  را حذف کنند. تحقیقات نشان داده است که بیوفیلترهای پایه کامپوست می‌توانند تا ۹۰٪ یک جریان گاز حاوی NO با غلظت ۵۰۰ ppmv را تصفیه کنند. البته معمولاً بازدهی این سیستم‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد و بسته به نوع کامپوست به ۴۵ تا ۷۰ درصد می‌رسد [۷].

اگر سوخت مورد استفاده در موتور دارای مقادیر قابل توجهی گوگرد باشد میزان اکسیدهای گوگرد تولید شده نیز زیاد و در نتیجه در آلوده کردن هوا موثر خواهد بود. در یک پژوهش نشان داده شده است که اگرچه حضور اکسیدهای گوگرد در گاز آلوده باعث اسیدی کردن بستر زیست‌پالاینده می‌شود، اگر در چنین شرایطی pH بستر در حد خنثی نگه داشته شود زیست‌پالاینده قادر به تصفیه اکسیدهای گوگرد خواهد بود [۹].

#### ۲.۶.۴ بررسی حذف کربن مونواکسید توسط زیست‌پالاینده‌ها

توانایی حذف کربن مونواکسید (چه به صورت گاز خالص کربن مونواکسید در ظروف آزمایشگاهی و چه به صورت محصول احتراق موتور درون‌سوز) توسط زیست‌پالاینده‌ها در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله نشان داده شده است که یک زیست‌پالاینده که بستر آن از کامپوست است می‌تواند طی ۲۴ ساعت گاز کربن مونواکسید با غلظت ۱۰۰۰ ppm را با بازده ۹۰ درصد پالایش کند. در شرایط مشابه،

زیست‌پالاینده‌ی با بستر سنگ‌ریزه<sup>۱</sup> پوشیده از ریزجانداران ۸۰ درصد بازدهی دارد. همچنین یک زیست‌پالاینده‌ی با بستر کامپوست می‌تواند تا ۴۵ درصد کربن مونواکسید تولید شده از یک موتور بنزینی را تحت شرایط جریان پیوسته پالایش کند. به منظور حذف کربن مونواکسید، بسته به شرایط برای جریان‌های با حداکثر غلظت ۵۰۰ الی ۱۰۰۰ ppm، زیست‌پالاینده‌ها در مقایسه با کاتالیست‌کانورتورهای متداول مقرون به صرفه‌تراند [۱۰].

#### ۳.۶.۴ بررسی ذرات معلق توسط زیست‌پالاینده‌ها

همان‌طور که در بخش ۵.۴ توضیح داده شد زیست‌پالاینده‌های نوع بیوفیلتر، بیوتریکلینگ فیلتر و بیواسکراپر معمولاً برای حذف جریان‌های دارای ذرات معلق مناسب نیستند و اگر قرار است از این سیستم‌ها برای پالایش جریانی حاوی مقدار قابل توجهی ذرات معلق استفاده شود می‌بایست از یک سیستم جدا برای حذف این ذرات استفاده کرد و سپس جریان گاز بدون ذرات معلق را به سمت سیستم تصفیه زیستی هدایت کرد. مشکل اصلی این سه نوع زیست‌پالاینده در مواجهه با ذرات معلق بسته شدن منافذ بستر زیست‌پالاینده است.

اما همان‌طور که پیش از این گفته شد، زیست‌پالاینده‌های چندفازی می‌توانند جریان‌های حاوی ذرات معلق را بدون ایجاد شدن مشکل خاصی پالایش کنند (رجوع کنید به بخش ۱.۴.۵.۴).

---

<sup>1</sup> pebble

#### ۴.۶.۴ بررسی حذف هیدروکربن‌ها توسط زیست‌پالاینده‌ها

از اولین کاربردهای زیست‌پالایش در صنعت تصفیه‌ی هوا، تصفیه‌ی ترکیبات آلی فرار بود. پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است و امروزه کاملا مشخص شده است که زیست‌پالایش در حذف ترکیبات هیدروکربن‌دار، چه آنهایی که در صنایع مختلف از جمله حفر چاه‌های نفتی و رنگ‌سازی آزاد یا تولید می‌شوند و چه ترکیبات حاصل از احتراق ناقص، کاملا توانا است (برای نمونه رجوع کنید به منابع شماره ۱۱ و ۱۲).

#### ۷.۴ اقدامات قبل از طراحی

دو نوع اقدام متفاوت وجود دارد: تحقیق و طراحی. قدم‌ها و موضوعات به طور مشابه‌ایی نشان داده شده‌اند، اگرچه هدف این دو نوع مطالعه بسیار ناچیز فرق دارند. هر نوع از مطالعه، برای مرحله‌ایی از فرآیند طراحی مناسب است. مطالعه تحقیقاتی بیشتر صریح و مجمل است و اغلب در مراحل اولیه رسیدگی استفاده می‌شود و توجه به این دارد که آیا یک ترکیب می‌تواند تحت یک سری شرایط مشخص، تجزیه زیستی شود یا در نگاه دیگر، تحت چه شرایطی، یک ترکیب می‌تواند تجزیه زیستی شود. مطالعه طراحی شاید عملیاتی‌تر باشد: حال می‌دانیم که یک ترکیب می‌تواند تحت این شرایط تجزیه زیستی شود، حال چگونه ممکن است که نرخ تصفیه بهینه باشد؟ و چگونه این مسئله می‌تواند عملی شود؟ و در پایان، آیا عملیات اجرایی ما، از نظر اقتصادی، بازده خوبی دارد؟ مطالعه طراحی، ممکن است مطالعه تحقیقات را باز بگذارد و شاید هر دو مطالعه به سمت یک مطالعه، هدایت شود. طرح برای مطالعات مقدماتی می‌تواند با پروتکل شش قدمی تعریف شود. آنها ممکن است کاملا مطلق باشند یا اینکه به‌وسیله پروژه، از پیش تعیین شده باشند. برای اینکه طراح اطمینان حاصل کند که نتیجه درستی می‌تواند بدست می‌آید بسیار مهم است که هر یک از این موارد را در نظر بگیرد. یک مثال پروتکل برای مطالعه مقدماتی که شامل پالایش TCE می‌باشد در زیر آمده تا فرآیند طراحی را روشن کند:

۱. تعریف اهداف مطالعه
۲. تعیین مراحل مطالعه
۳. انجام تنظیماتی مقدماتی
۴. هدایت مطالعه مقدماتی
۵. نتایج و گزارش اطلاعات
۶. نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

## ۸.۴ طراحی

بر اساس نتایج مطالعات مقدماتی، قدم بعدی این است که فرآیند طراحی را آغاز کنیم. بسته به نوع پروژه، سیستم درجه‌بندی پیلوت<sup>۱</sup> ممکن است مفید باشد، یا اینکه طراح بایستی یک سیستم درجه بندی کامل<sup>۲</sup> انجام دهد. واحد دجه بندی پیلوت بر این اساس است که اجازه دهد هر خاصیت پیشنهادی سیستم تحت شرایط واقعی مورد آزمایش قرار گیرد، در حالی که سیستم در نرخ جریان پایین تری کار می‌کند. درجه بندی پیلوت به واحدهای سیستم این اجازه را می‌دهد که در قیمت و مقیاس‌های عملکرد کوچک شده، تنظیم و بهینه شود. به هر حال، برای بعضی از سیستم‌های کوچکتر شده مقیاس پیلوت از نظر اقتصادی ممکن است بازده خوبی نداشته باشد. یک سیستم رفتاری کامل مقیاس کوچک<sup>۳</sup>، می‌تواند ساخته شود و با بازده اقتصادی برابر با چندین واحد مقیاس پیلوت مورد اجرا قرار گیرد و حتی می‌تواند به آسانی بهینه شود. مانند بسیاری از مهندسين، سرمایه و هزینه‌های اجرایی برای تصمیم‌نهایی کار پیشنهادی باید با یکدیگر مقایسه شوند تا تعیین شود آیا این کار لازم می‌باشد یا خیر. در راکتورهای زیست پالاینده، پالایش آلاینده‌ها در نهایت با نرخ انتقال

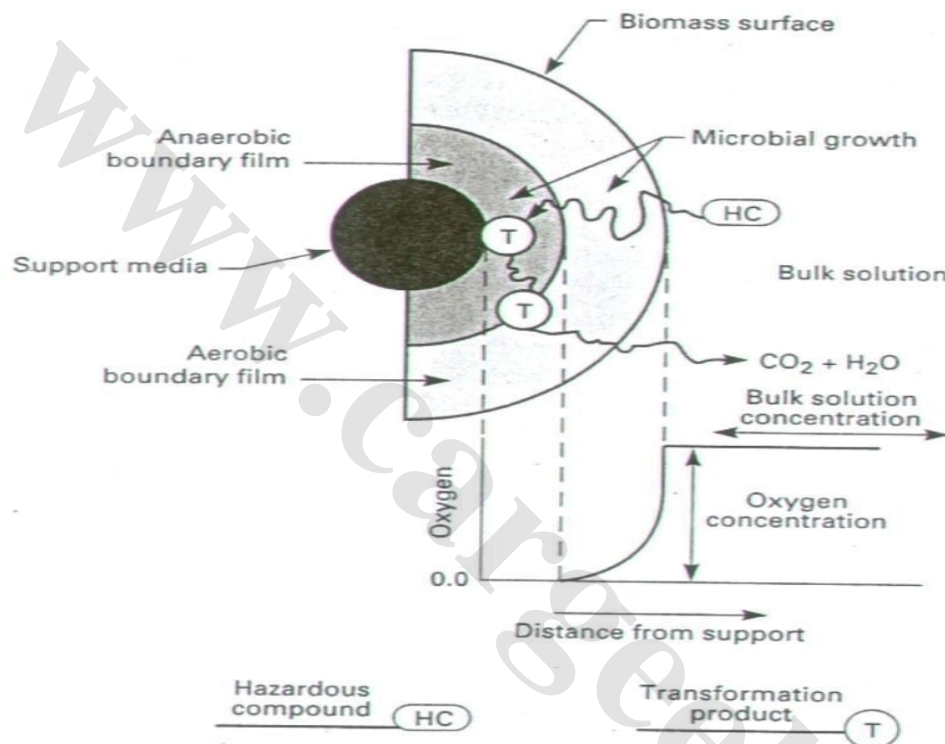
---

<sup>1</sup> pilot

<sup>2</sup> Full-scale

<sup>3</sup> Small Full-scale

جرم از فاز گازی به لایه زیستی و همچنین با نرخ پخش درون توده زیستی<sup>۱</sup> محدود می‌شود. آلاینده، همان طور که از روی راکتور زیست پالاینده از درون جریان گاز می‌گذرد، بر روی فیلترهای واسطه یا خود توده زیستی جذب می‌شود. شکل ۹.۴ به صورت نمایشی فرایند جذب، پخش و تغییرات درون راکتور زیست پالاینده را نشان می‌دهد.



شکل ۹.۴ فرایند جذب، پخش و تغییرات درون راکتور زیست پالاینده

به طور کلی، نرخ پالایش مواد شیمیایی، با پیچیدگی ساختار آن، افزایش می‌یابد. الکل زودتر از کتون<sup>۲</sup> تصفیه می‌شود هر چه نرخ پالایش کمتر باشد، زمان بیشتری لازم است تا ترکیبات مورد نظر تصفیه شوند. این مسئله به زمان نگهداری طولانی‌تر تفسیر می‌شود، همچنین به عنوان زمان تماس بستر خالی<sup>۳</sup> (EBCT) شناخته

<sup>1</sup> biomass

<sup>2</sup> ketone

<sup>3</sup> Empty bed contact time



شده است. EBCT با تقسیم حجم راکتور بر نرخ جریان اندازه‌گیری می‌شود. پهنه وسیعی از مواد تجزیه کننده، شامل خاک کثیف، کود نباتی، ذغال سنگ نارس و تراشه چوب در سیستم‌های زیست‌پالایش استفاده می‌شوند. هر کدام از آنها، یک سری معایب و مزایا دارند.

بیشترین مواد مورد مصرف، عموماً مواد آلی مانند کود نباتی، خاک و برخی ترکیبات آنها می‌باشند. مواد آلی چندین مزیت دارند که شامل ساختار سوراخ دار ماده، نتیجه دادن در سطح بسیار زیاد، دسترس پذیری سهل و آماده مواد غذایی درون ماده آلی و حضور گسترده میکروجانداران، می‌باشد.

مشخص شده است کودهای نباتی، تعداد بسیار بیشتری میکروب نسبت به ذغال سنگ نارس و یا کربن فعال شده، دارند. سیستم کود نباتی، همچنین از خود قابلیت حذف آلودگی بیشتری نشان می‌دهند. یکی از معایب کود نباتی، کم شدن بازده بر اثر ترکیب کردن کودها با پرلیت<sup>۱</sup>ها (سنگ مروارید) می‌باشد. اگر ریزجانداران که به صورت طبیعی در وسیله وجود دارند، در معرض آلاینده‌های آلی قرار داده نشده باشند زیست‌پالاینده احتمالاً نیاز به تغذیه مجدد دارد تا سیستم با سهولت بیشتری به راه افتد.

زیست‌پالاینده‌ها با داشتن یک مسیر جریان، به طور عادی، تمایل به طبقه بندی شدن به حوزه هایی با رشد مشخص میکروبی دارند که اغلب باعث افت فشار و در نتیجه باعث مسدود شدن فیلتر در حوزه‌هایی که رشد میکروب ندارند، می‌شود. حوزه نزدیک ورودی جریان، اکثر آلاینده‌ها و مواد غذایی را تجزیه می‌کند، در حالی که حوزه‌های باقی مانده، هنوز اشباع نشده اند. روش‌های پیشگیری و کنترل رشد بیش از حد و ناخواسته ریزجانداران در ستون‌ها شامل بازشویی منظم، محدودیت تغذیه، تغییر جهت جریان می‌باشد. تغییر جهت شامل معکوس کردن جریان ورودی و خروجی است که باعث می‌شود رشد بیش از حد میکروبی، به دلیل فقدان مواد غذایی کاهش یابد. نتیجه نهایی تغییر جهت جریان، کاهش گرفتگی فیلتر، کم شدن افت فشار در طول ستون و بنابراین کاهش هزینه اجرایی و عملیاتی سیستم می‌باشد. نرخ دبی جریان گاز از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰

<sup>1</sup> perlite

فوت مکعب بر دقیقه و دمای بهینه درونی برای زیست پالاینده تقریباً  $37/7$  درجه سلیسیوس می‌باشد. یکی از اندازه‌گیری‌های معمول ظرفیت راکتور، EBCT است. بایستی توجه شود EBCT همان موقعی که نیاز به پالایش آلاینده‌ها شد، ضرورت نمی‌یابد. EBCT مجموع کل حجم ستون تقسیم بر نرخ جریان است و در اکثر زیست پالاینده‌ها، در حدود ۱ تا ۱۰ دقیقه می‌باشد. EBCT بزرگتر، معمولاً هزینه عملیاتی و اجرایی کمتری دارد، اگرچه هزینه اولیه سرمایه گذاری بیشتری لازم دارد.

قدم هایی که برای طراحی یک سیستم جذب استفاده می‌شود، عبارت اند از :

- ۱- تاسیس کردن یک فاضلاب متمرکز، بر پایه غلظت بخار گاز درون ریز
- ۲- تعیین کردن مشخصه‌های شیمیایی ترکیبات متنوع جریان گاز در طول زمان
- ۳- انتخاب وسیله فیلتر
- ۴- انجام مطالعات مقدماتی برای تعیین نرخ پالایش
- ۵- تعیین مشخصه‌های بخار گازی که در شرایط مختلف کار می‌کند، مانند نرخ جریان، رطوبت نسبی بارگذاری ویژه و دما
- ۶- محاسبه مساحت سطح جذب کننده A، با استفاده از نرخ جریان و حجم گاز، طول سطح L با استفاده از حجم و مساحت. (با نظر به اینکه هر چه سطح بزرگتر، پالایش بیشتر می‌شود)
- ۷- محاسبه زمان برخورد سطح خالی (EBCT). EBCT بایستی به اندازه کافی طولانی باشد تا مطمئن شد که زمان مناسب برای پالایش آلاینده‌ها، وجود دارد.

با این حال، چندین عامل دیگر وجود دارد که باید در طراحی ملاحظه شود. سیستم باید با انعطاف‌پذیری طراحی شود تا به پارامترهای عملیاتی، برای بهینه کردن عملکرد سیستم در واحد کل - مقیاس اجازه بدهد تا تغییر کنند. جریان گاز برای بدست آوردن بیش‌ترین بازده، باید به طور مساوی در ورودی فیلتر پخش شود. تغییرات در غلظت VOC بایستی به عنوان فشار و ضربه روی ریزجانداران در فیلتر، در نظر گرفته شود.

میکروارگان‌داران تلاش خواهند کرد تا خود را با میانگین غلظت جریان گاز سازگار کنند. در طول مدتی که نوسانات غلظت VOC به صورت دوره‌ای هر ساعت (یا حتی سریع‌تر) ادامه دارد، نباید تأثیر ناسازگاری، متحمل شوند. اگر سیکل فرکانس کمی داشته باشد، اصلاحات و تعدیلاتی باید انجام شود تا بازده افزایش یابد. سیستم باید برای پذیرش با نمونه‌گیری کردن از ورودی و خروجی با استفاده از روش EPA رویه 25a، تست شود. برای تست کردن خروجی، باید سیستم بسته شود و یک دودکش تخلیه داشته باشد. مایع لیچیت<sup>1</sup> (مایعی که به وسیله شستشو، از خاک یا واسطه دیگری بگذرد) بیرون آمده از سیستم باید گرفته و از آلوده شدن زمین زیرین جلوگیری شود. هزینه سرمایه‌گذاری سیستم زیست‌پالایش معمولاً برابر همان مقدار هزینه دیگر سیستم‌های عملکردی VOC می‌باشد. بیش‌تر ذخیره و صرفه‌جویی هزینه‌ها، در هزینه‌های اجرایی و عملیاتی حاصل می‌شود.

---

<sup>1</sup> leachate

## ۵. امکان سنجی

به منظور امکان سنجی روش یا روش‌های مهار آلاینده‌های حاصل از کار در جای اتوبوس‌های پایانه‌های درون شهری باید میزان دبی گاز آلوده و غلظت آلاینده‌ها را، هر چند تقریبی، محاسبه کنیم. در بخش ۱.۵ غلظت آلاینده‌های متداول داخل شهری را محاسبه می‌کنیم و در بخش ۲.۵ با توجه به این که می‌خواهیم مسئله را در مورد پایانه آزادی بررسی کنیم، برآوردی از دبی جریان آلوده برای کل سیستم پالایش خواهیم داشت. در بخش ۳.۵ نیز چند طرح برای قرارگیری سیستم پالایش پیشنهاد می‌شود.

### ۱.۵ برآوردی از غلظت آلاینده‌های یک اتوبوس داخل شهری

برای بدست آوردن این اطلاعات، دو روش وجود دارد:

۱. با استفاده از استاندارد زیست‌محیطی خودرو که توسط شرکت سازنده اعلام می‌شود. در اینجا فرض بر این است که این استاندارد اعلام شده، قابل اعتماد است و با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان معقول مقدار محاسبه شده به میزان آلاینده‌های تولید شده نزدیک است.
  ۲. غلظت آلاینده‌ها با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت تجربی و دبی گاز آلوده از طریق محاسبات بدست می‌آید.
- در این جا از روش اول استفاده می‌کنیم.

اکثر اتوبوس‌های مورد استفاده در خطوط داخل شهری (در تهران) از سه مدل O457 ، O457G-OSG و MEGATRANS که توسط ایران خودرو تولید شده‌اند، می‌باشند. اطلاعات خودروها از سایت ایران خودرو دیزل (www.ikd-co.com) گرفته شده است. مشخصات این خودروها به قرار زیر است :

• مدل O457

موتور	
OM457 LA	مدل :
299 hp at 2000 rpm	قدرت موتور :
1250 Nm at 1100 rpm	حداکثر گشتاور موتور :
۶ عدد ، خطی	تعداد و آرایش سیلندرها :
11967 cc	حجم سیلندرها :
یورو ۱	استاندارد زیست محیطی :



شکل ۱.۵ اتوبوس مدل O457 و مشخصات موتور آن

• مدل O457G-OSG

موتور	
OM457G (O457)	مدل :
300 hp at 2000 rpm (O457G)	قدرت موتور :
1080 Nm at 1200 rpm (O457G)	حداکثر گشتاور موتور :
۶ عدد ، خطی	تعداد و آرایش سیلندرها :
11967 cc (O457G)	حجم سیلندرها :
یورو ۱	استاندارد زیست محیطی :



شکل ۲.۵ اتوبوس مدل O457G-OSG و مشخصات موتور آن



شکل ۳.۵ اتوبوس مدل MEGATRANS و مشخصات موتور آن

به علت اینکه واحد استانداردهای یورو II بر حسب گرم بر کیلووات ساعت می باشد، بایستی برای بدست آوردن میزان آلایندگی تولیدی در حالت کار درجا، توان موتور در حالت درجا را داشته باشیم. برای این کار ما از یک نمودار تجربی و یک فرض تقریبی استفاده کرده و قدرت موتور در دور موتور مربوط به کار درجا را بدست می آوریم.

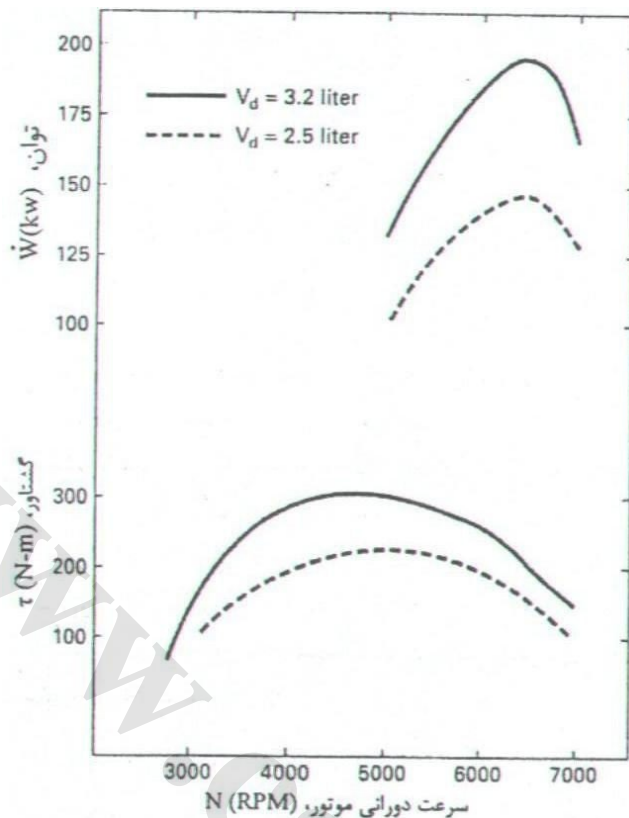
در ابتدا با استفاده از اطلاعات موتور خودرو، می توان محاسبات زیر را انجام داد:

$$P = \omega \cdot T$$

قدرت موتور در ۲۰۰۰ دور در دقیقه برابر ۲۹۹ اسب بخار می باشد در نتیجه :

$$299 \text{ hp} = 223 \text{ KW} = T \times \left(\frac{2\pi}{60}\right) \times 2000 \rightarrow T = 1065 \text{ N.m}$$

هم اکنون ما دو نقطه از نمودار گشتاور - سرعت دورانی را در اختیار داریم . یک نقطه که از محاسبات بدست آمده : A (۲۰۰۰، ۱۰۶۵) و دیگری نقطه بیشینه (۱۱۰۰، ۱۲۵۰) B. شکل ۴.۵ [۱۳] نمودار گشتاور و توان بر حسب سرعت دورانی را برای دو موتور با حجم سیلندرها متفاوت نشان می دهد. اگرچه این نمودار برای دو موتور خودروهای سواری است اما برای یک اتوبوس نیز شکل نمودار مشابه می باشد. با در نظر گرفتن نمودار تجربی زیر این فرض را می کنیم که معادله رابطه بین گشتاور و سرعت دورانی، سهمی می باشد.



شکل ۴.۵ نمودار گشتاور و توان بر حسب سرعت دورانی برای دو موتور

بنابراین داریم :

$$f(\omega) = T =$$

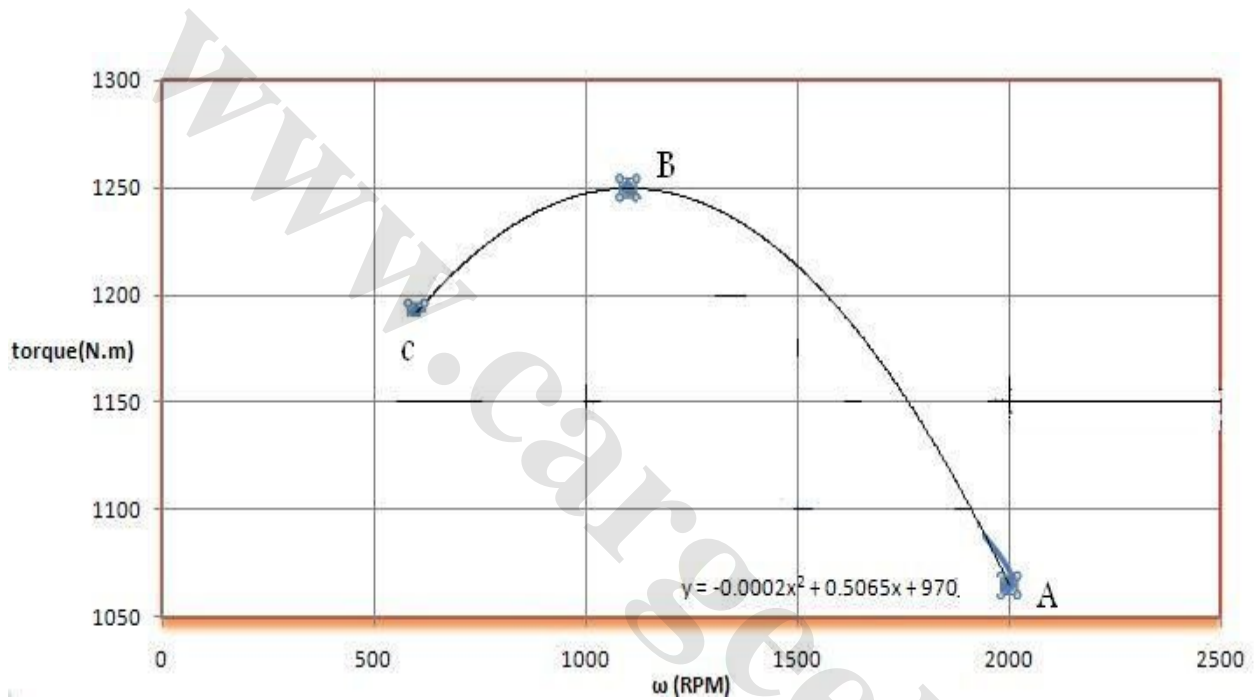
در مسئله‌ی مورد نظر این پروژه یعنی کار درجای اتوبوس‌ها، باید توان موتور را برای دور درجا بدانیم. بر اساس مشاهدات میدانی، دور درجای اتوبوس‌ها ۵۰۰ تا ۷۰۰ دور در دقیقه است. با در نظر گرفتن مقدار میانگین یعنی ۶۰۰ دور در دقیقه داریم:

$$if \omega = 600 \text{ RPM} , T = 1192.6 \text{ N.m}$$

$$\rightarrow C(600, 1192.6) \text{ نقطه‌ی سوم}$$

$$P_{@C} = T \cdot \omega = 1192.6 \times 600 \times \frac{2\pi}{60} = 74.89528 \text{ kW}$$

نمودار زیر نشان دهنده نقاط A و B و C است.



شکل ۵.۵ نمودار گشتاور بر حسب سرعت دورانی برای موتور اتوبوس های متداول

همچنین جدول ۱.۵ [۱۴] استانداردهای یورو برای انتشار آلاینده ها از خودروهای سنگین را نشان می دهد.



Standard	Date	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	Particulates (g/kWh)
Euro 0	1988-1992	12.30	15.3	2.60	none
Euro I	1992-1993	4.90	9.00	1.23	0.49
Euro II	1995-1999	4.00	7.00	1.10	0.15
Euro III	1999-2005	2.10	5.00	0.66	0.18
Euro IV	2005-2008	1.50	3.50	0.46	0.02
Euro V	2008-2012	1.50	2.00	0.46	0.02

جدول ۱.۵ استاندارد یورو برای خودروهای سنگین

برای بدست آوردن غلظت استاندارد آلاینده‌های یک اتوبوس، مبنای زمانی را یک دقیقه در نظر گرفته و چون مقدار توان مصرفی در وضعیت درجا، تقریباً ۷۵ کیلووات است مقدار تولید شده هر آلاینده برای یک اتوبوس در هر دقیقه، بر حسب گرم این گونه حاصل می‌شود:

$$CO : 4 \times \frac{1}{60} \times 75 = 5 \text{ g} , NO_x : 7 \times \frac{1}{60} \times 75 = 8.75 \text{ g} ,$$

$$HC : 1.1 \times \frac{1}{60} \times 75 = 1.375 \text{ g} , PM : 0.15 \times \frac{1}{3} \times 75 = 0.1875 \text{ g}$$

برای بدست آوردن غلظت آلاینده‌ها با استفاده از حجم سیلندرها، مقدار حجم جریان خروجی که در یک دقیقه از اگزوز اتوبوس بیرون می‌آید را حساب می‌کنیم:

$$V = 11.967 \text{ lit} , N_{idle} = 600 \text{ RPM}$$

چون این اتوبوس‌ها دارای موتورهای دیزلی چهار زمانه می‌باشند، به ازای هر دو دور، یک بار سیلندر تخلیه می‌شود. حجم کل تخلیه در یک دقیقه برابر است با:

$$11.967 \times 300 = 3590 \text{ lit}$$

بنابراین غلظت آلاینده ها در مدت یک دقیقه درجا روشن بودن را بر حسب  $\frac{g}{m^3}$  می توان بدست آورد:

مقدار اکسیدهای گوگرد نیز برای خودروهایی که گازوئیل داخلی مصرف می کنند، یعنی برای همه ی اتوبوس های داخل شهری، قابل توجه است اما اطلاعات دقیقی از میزان اکسید گوگردی که یک اتوبوس تولید می کند در دسترس نیست و باید از راه تجربی این مقدار را بدست آورد.

## ۲.۵ برآورد دبی جریان آلوده برای اتوبوس های پایانه آزادی

پایانه آزادی در غرب تهران و در مجاورت میدان آزادی قرار دارد. این پایانه شامل دو قسمت درون شهری و برون شهری است و نسبت به پایانه های دیگر استان تهران وسیع تر و دارای حجم ترافیک وسایل نقلیه عمومی بسیار زیادی است. به علت موقعیت جغرافیایی خاص و در نتیجه وزش باد های غربی، اکثر آلودگی های این منطقه به سمت مرکز شهر منتقل می شود. به همین خاطر این پایانه سهم قابل توجهی در آلودگی هوای تهران دارد. قسمت درون شهری این پایانه را می توان به چهار قسمت تقسیم کرد. قسمت ایستگاه های اتوبوس های داخل شهری معمولی، ایستگاه های اتوبوس های BRT، جایگاه مینی بوس های داخل شهری و قسمت جایگاه تاکسی های سواری. در شکل ۶.۵ نمای از بالای قسمت اتوبوس های عادی را مشاهده می کنید. در این جا کار خود را محدود به این بخش از پایانه می کنیم.



شکل ۶.۵ نمای از بالای قسمت اتوبوس‌های عادی

برای بدست آوردن تعداد تقریبی اتوبوس‌های عادی روشن این پایانه، یک آمار گیری میدانی در تاریخ ۸۹/۵/۱۹ انجام دادیم. در این آمار گیری اتوبوس‌های روشن ایستگاه‌های مختلف را از ساعت ۶ تا ۸ صبح، شمارش کردیم. در نتیجه این تحقیق اطلاعات زیر بدست آمد.

	۶:۰۰ - ۶:۱۵	۶:۱۵ - ۶:۳۰	۶:۳۰ - ۶:۴۵	۶:۴۵ - ۷:۰۰	۷:۰۰ - ۷:۱۵	۷:۱۵ - ۷:۳۰	۷:۳۰ - ۷:۴۵	۷:۴۵ - ۸:۰۰
هفت تیر	۴	۴	۵	۴	۴	۵	۴	۴
میدان صنعت	۶	۵	۴	۳	۳	۲	۴	۵
پونک	۵	۴	۶	۷	۵	۴	۵	۶
نسیم شهر	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱
سید خندان	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱
پایانه جنوب	۱	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲
کوهسار	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۲
ونک	۷	۶	۶	۴	۳	۲	۳	۵
اکباتان	۳	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲
هوانیروز	۲	۲	۲	۱	۱	۰	۱	۲
شهرک ولیعصر	۳	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲
پارک شهر	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱
ابراهیم آباد	۳	۲	۳	۲	۱	۲	۲	۱
خلیج فارس	۲	۱	۳	۲	۱	۲	۲	۲
شهرک آزادی	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۱
جمع	۴۳	۴۲	۴۳	۳۵	۳۰	۳۴	۳۷	۳۷

جدول ۲.۵ تعداد اتوبوس‌های عادی در حال کار درجا در پایانه آزادی به تاریخ ۸۹/۵/۱۹

حداکثر تعداد اتوبوس‌ها ۴۳ است. باید توجه داشت که در روزهای مختلف این عدد می‌تواند تغییر کند اما برای اینکه تقریبی از ظرفیت سیستم پالایش قسمت اتوبوس‌های عادی داشته باشیم این عدد قابل اعتماد است. با این حساب ظرفیت سیستم پالایش بدین گونه بدست می‌آید:

دبی جریان گاز خروجی از اگزوز یک اتوبوس ۳۵۹۰ لیتر در دقیقه می‌باشد. در نتیجه برای ۴۳ اتوبوس دبی کل جریان گاز آلوده برابر است با ۱۵۴۳۷۰ لیتر در دقیقه یا ۲/۵۷۲۸۳ مترمکعب در ثانیه.

به طور خلاصه سیستم پالایش باید جریانی با این مشخصات را تصفیه کند:

$$Q \text{ (دبی)} = 2.57283 \frac{m^3}{s}$$

$$CO : \frac{5}{3.590} = 1.3927 \frac{g}{m^3}$$

$$NO_x : \frac{8.75}{3.590} = 2.4373 \frac{g}{m^3}$$

$$HC : \frac{1.375}{3.590} = 0.3830 \frac{g}{m^3}$$

$$PM : \frac{0.1875}{3.590} = 5.2228 \times 10^{-5} \frac{g}{m^3}$$

### ۳.۵ پیشنهاد چند طرح و مقایسه فن آوری های زیست پالایش و کاتالیست کانورتور

برای مهار دود آگزوز خودروها و انتقال آنها به سیستم تصفیه باید از طریق لوله‌هایی که به آگزوز اتوبوس‌ها وصل می‌شوند آلاینده‌ها را به سمت سیستم پالایش هدایت کنیم. برای این کار دو حالت را می‌توان در نظر گرفت. یکی اینکه برای هر خط اتوبوس‌رانی و روی سکوی کنار هر خط یک سیستم تصفیه‌ی کوچک با ظرفیت محدود به تعداد اتوبوس‌های همان خط تعبیه شود. دیگر آن که یک سیستم تصفیه‌ی بزرگ برای کل قسمت اتوبوس‌های عادی در نظر گرفته شود و با ایجاد یک شبکه‌ی نسبتاً پیچیده‌ای از لوله‌ها، آلاینده‌ها را به سیستم پالایش هدایت کنیم. روش دوم احتمالاً نیازمند لوله‌کشی زیرزمینی و هزینه‌های آن خواهد بود و شاید

همین امر پروژه را از لحاظ اقتصادی زیر سوال ببرد. در روش اول اگرچه باید جهت نگهداری سیستم نه به یک محل (همچون طرح اول) بلکه به چند محل مراجعه کرد اما مسیر لوله‌کشی آن کوتاه خواهد بود و از طرف دیگر چون برای هر قسمت مساحت نسبتاً کوچکی را اشغال می‌کند بررسی و کنترل وضعیت سیستم آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود.

در ادامه به مقایسه‌ی مصرف مواد اولیه و هزینه برای دو سیستم زیست‌پالایش و کاتالیست کانورتور جهت استفاده در سیستم پالایش پایانه می‌پردازیم.

### ۱.۳.۵ تحلیل مصرف مواد اولیه

مصرف مواد اولیه در یک سیستم پالایش می‌تواند به دو بخش تقسیم شود:

۱. مصرف مواد اولیه‌ی مرتبط با ساخت تجهیزات به کار رفته در سیستم

۲. مصرف مواد اولیه در حین عملکرد سیستم

برای زیست‌پالاینده‌ها مصرف مواد اولیه‌ی مرتبط با ساخت تجهیزات شامل ساخت لوله‌ها و بستر زیستی و برای اکسیدکننده‌های حرارتی شامل عایق کاری، مشعل‌ها و ... می‌شود. میزان مصرف مواد اولیه در حین عملکرد سیستم را می‌توان به سه بخش مهم تقسیم کرد: ۱. کربن ۲. آب ۳. انرژی

۱. مصرف کربن در زیست‌پالاینده‌ها به میزان قابل توجهی کمتر از اکسیدکننده‌های حرارتی است که در آنها از گاز طبیعی جهت حفظ دمای واکنش استفاده می‌کنند.

۲. مصرف آب در بیوفیلتر از بیوتریکلینگ فیلتر بیشتر است و این عمدتاً به خاطر تخلیه‌ی آب (blowdown) در بیوفیلتر است. تمامی سیستم‌های تصفیه‌ی زیستی جریان گاز ورودی را مرطوب

می‌کنند. بسته به نرخ جریان گاز، دما و میزان رطوبت گاز ورودی اتلاف مقداری آب به خاطر مرطوب کردن گازی ورودی اجتناب ناپذیر است. در زیست‌پالاینده‌های چندفازی اگر ذرات جامدی در گاز ورودی وجود داشته باشند مقداری آب به هنگام تصفیه‌ی آنها تلف می‌شود. در هر حال مصرف آب در زمان کارکرد در سیستم‌های زیست‌پالاینده از سیستم‌های اکسیدکننده‌ی حرارتی بیشتر است. برای مسئله‌ی خاص ما باید در نظر داشت که در محصولات احتراق و در نتیجه در خود جریان آلوده آب وجود دارد و این نیاز سیستم به آب را، اگر از نوع زیست‌پالایش باشد، کاهش می‌دهد.

۳. انرژی مصرفی در سیستم‌های اکسیدکننده‌ی حرارتی بسیار بیشتر از زیست‌پالاینده‌ها است و این معمولاً به خاطر مصرف گاز طبیعی است. مصرف گاز طبیعی به طور قابل توجهی هزینه‌ی عملکرد سیستم‌های اکسیدکننده‌ی حرارتی را بالا می‌برد. حتی هنگامی که مقدار VOC ورودی آنقدر زیاد است که احتراق بتواند با خود آنها صورت گیرد، تغییرات در ترکیبات VOC ورودی باعث نیاز به گاز طبیعی می‌شود و بنابراین هزینه‌ی عملکرد بالا می‌رود.

### ۲.۳.۵ مقایسه هزینه فن‌آوری‌های پالاینده

هر فن‌آوری پالاینده محدودی کاری و شرایط خاص خود را دارد. با توجه به این مطلب نمی‌توان هزینه‌ی یک فن‌آوری در یک شرایط کاری مخصوص به آن را با هزینه‌ی فن‌آوری دیگر با شرایط کاری دیگری مقایسه کرد. از این رو برای بررسی هزینه‌ی فن‌آوری زیست‌پالایش تنها می‌توان از نتایج پژوهش‌هایی استفاده کرد که در آنها هزینه‌ی این فن‌آوری با سایر فن‌آوری‌های مشابه در یک مسئله‌ی خاص مورد مقایسه قرار گرفته باشد. در زیر به دو نمونه از این پژوهش‌ها اشاره می‌کنیم.



۱. در سال ۱۹۸۷ تعدادی چاه نظارت برای مشخص کردن میزان هیدروکربن‌های نفتی حل شده در خاک و آب‌های زیر زمینی در کالیفرنیا آمریکا حفر شد. پس از آن و در سال ۱۹۹۴ در یک پژوهش [۱۱] در ارتباط با حذف ترکیبات آلی فرار از گازهای خروجی حاصل از حفر چاه‌های بازبینی، از سیستم‌های مختلف از جمله زیست‌پالایش استفاده شد. در این پژوهش همچنین بین فن‌آوری‌های مختلف یک تحلیل اقتصادی صورت گرفت. فن‌آوری‌های مورد بررسی شامل رایج‌ترین روش‌های حذف VOCs می‌شوند؛ یعنی: ۱. اکسیدکننده‌های کاتالیزوری ۲. اکسیدکننده‌های حرارتی ۳. جذب سطحی کربن ۴. زیست‌پالایش

اطلاعات مربوط به هزینه‌های روش‌های مختلف از طریق داده‌های فروشندگان تجهیزات و نیز استفاده‌ی تجربی از این سیستم‌ها بدست آمده است. برای این تحلیل موارد زیر مفروض بودند:

۱. دبی گاز تصفیه نشده برابر است با 50 cfm
۲. غلظت متوسط هیدروکربن‌های نفتی برابر است با 200 ppm
۳. دبی گاز آلاینده تقریباً ثابت و پیوسته است
۴. کمیننه بازدهی حذف VOCs، ۷۵ درصد است
۵. هزینه‌ی تعمیر برای این چهار سیستم در نظر گرفته نشده است

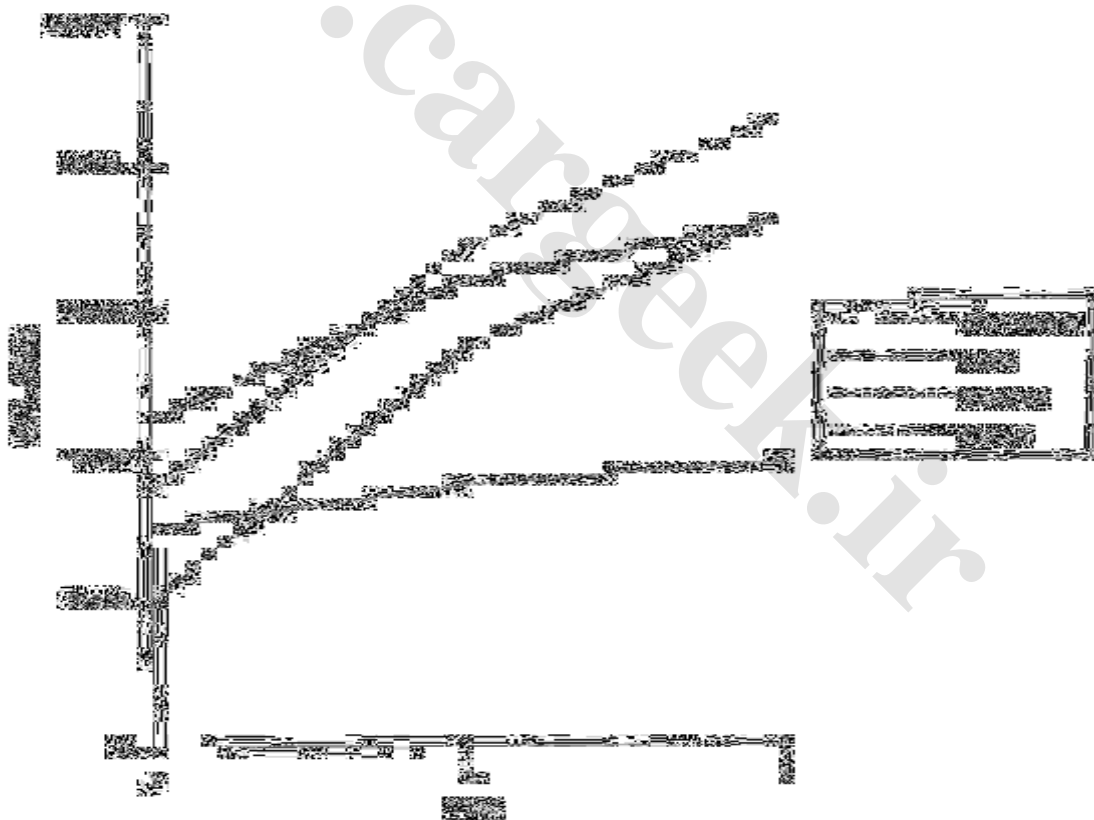
لازم به ذکر است که این مقایسه در زمانی صورت گرفته است که غلظت هیدروکربن‌ها در حد ذکر شده است. در اوایل حفر چاه‌ها غلظت آلاینده‌ها اغلب چندین هزار ppm است و تنها اکسیدکننده‌های حرارتی یا کاتالیزوری برای حذف آنها مناسب اند.

هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم‌های زیست‌پالایش، اکسیدکننده‌ی کاتالیزوری، اکسیدکننده‌ی حرارتی و جذب سطحی کربن به ترتیب ۳۰۰۰۰، ۴۵۰۰۰، ۳۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ دلار برآورد شد. هزینه‌ی سالانه‌ی سیستم جذب سطحی کربن در ابتدا ۲۰۰۰۰ دلار در سال و پس از مدتی که به کنترل نیاز نداشته باشد به ۱۵۰۰۰ دلار در



سال کاهش خواهد یافت. هزینه سالانه زیست‌پالایش، اکسیدکننده کاتالیزوری و اکسیدکننده حرارتی به ترتیب ۳۰۰۰، ۹۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ دلار تخمین زده شد. این هزینه‌ها در طول یک دوره ۳ ساله ثابت‌اند.

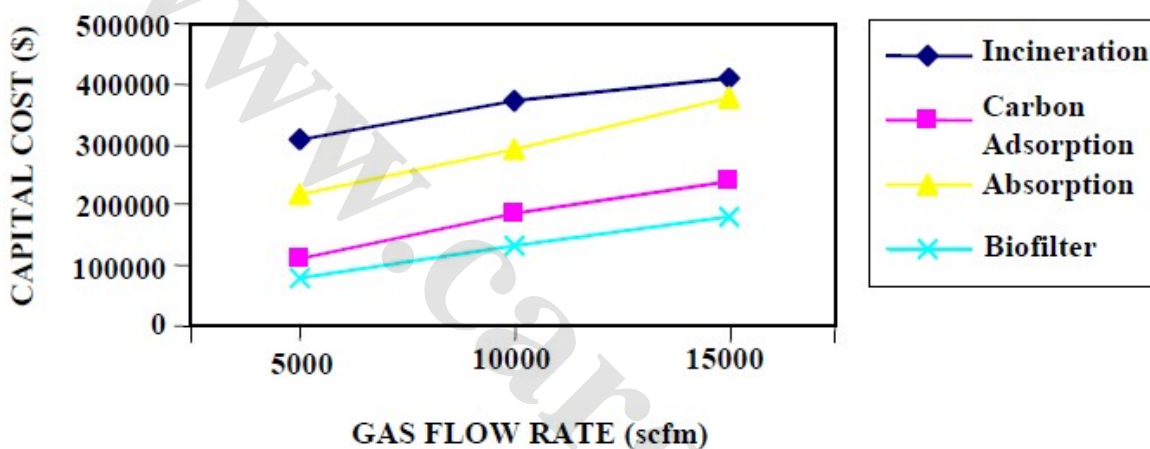
شکل ۷.۵ نشان دهنده هزینه کل برای هر چهار نوع فن‌آوری در طی یک دوره ۳ ساله است. کل هزینه اولیه و عملکرد سه ساله برای زیست‌پالایش، اکسیدکننده کاتالیزوری، اکسیدکننده حرارتی و جذب سطحی کربن به ترتیب بدین قرار اند: ۳۹۰۰۰، ۷۲۰۰۰، ۸۶۰۰۰ و ۷۲۵۰۰ دلار. این مقایسه هزینه‌ها نشان می‌دهد که برای تصفیه جریان گاز آلوده‌ای که آلاینده‌های را می‌توان با زیست‌پالایش حذف کرد و غلظت و دبی آن آلاینده‌ها در محدوده‌ی کارکرد سیستم زیست‌پالایش است، استفاده از این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌ها می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای شود.



شکل ۷.۵ هزینه کل برای هر چهار نوع فن‌آوری در طی یک دوره ۳ ساله

در پژوهشی دیگر که برای حذف ایزوپنتان انجام شده است برای جریانی با غلظت آلاینده ۱۰۰۰ ppm و بازدهی حذف ۹۵ درصد از ۴ فن آوری استفاده شد: ۱. اکسیدکننده‌های کاتالیزوری ۲. اکسیدکننده‌های حرارتی ۳. جذب سطحی کربن ۴. زیست‌پالایش

در این‌جا منظور از زیست‌پالایش، بیوتریکلینگ فیلتر است. در این پژوهش نشان داده شد که کم‌هزینه‌ترین فن آوری، فن آوری زیست‌پالایش است (شکل ۸.۵).



شکل ۸.۵ مقایسه‌ی هزینه‌ی ۴ فن آوری جهت حذف آلاینده‌ی ایزوپنتان

واضح است که در شرایط یکسان زیست‌پالایش‌ها به لحاظ هزینه مقرون به صرفه‌تر اند.

### ۳.۳.۵ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

۱. در این‌که زیست‌پالاینده‌ها برای تصفیه گازهای حاصل از احتراق موتورهای دیزل گزینه‌ای مهم اند و می‌توانند در طرح پالایش آلاینده‌های تولید شده در پایانه‌ها مؤثر واقع شوند شکی نیست. اما ریزجانداران، که قلب یک زیست‌پالاینده را تشکیل می‌دهند، در برابر جریان‌های مختلف گاز، واکنش‌های متفاوت نشان می‌دهند. در آزمایشات مختلف حذف یک نوع آلاینده‌ی خاص توسط زیست‌پالاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اما جای آن وجود دارد که آزمایش‌هایی انجام شود تا مشخص شود که شرایط مطلوب برای یک زیست‌پالاینده جهت تصفیه‌ی جریان گاز حاصل از احتراق، که هم‌زمان دارای انواع آلاینده‌هاست، چیست.
۲. یکی از معایب استفاده از کاتالیست کانورتورها برای کار در یک پایانه این است که برای تأمین حداقل دمایی که یک کاتالیست کانورتور در آن کار می‌کند باید یک سیستم گرمایش داشته باشیم که معمولاً با سوخت فسیلی، مثلاً گاز طبیعی، کار می‌کند و این خود هزینه‌بر است و حتی تولید آلاینده می‌کند. پیشنهاد می‌شود که امکان استفاده از یک سیستم گرمایشی با استفاده از انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع

۱. دبیری، مینو؛ آلودگی محیط زیست؛ نشر اتحاد؛ چاپ سوم ۱۳۸۲
2. Manufacturers of emission control association; Catalytic oxidation for the control of hazardous organic air pollutants; 1995
3. E. Roberts Alley & associates; Air quality control handbook; McGraw-Hill; 1998
4. Environmental Protection Agency (EPA), center of air pollution; Catalytic incinerator fact sheet; 1999
5. R. Nicolai, K. Janni, and D. Schmidt; Biofiltration-Mitigation odor and gas emissions from animal operations; Mitigating Air Emissions From Animal Feeding Operations Conference; 2008
6. Karl B. Schnelle Jr & Charles A. Brown; Air Pollution Control Technology Handbook; CRC Press; 2001
7. Jeffrey A. Lacey, Brady D. Lee, William A. Apel; Comparison of NOx Removal Efficiencies in Compost Based Biofilters Using Four Different Compost Sources; 94th Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association; June 24, 2001
8. Rakesh Govind; New biofiltration technology for MATC compliance; *Panel & Engineered Lumber International Conference & Expo*; Atlanta; 2009
9. Rakesh Govind; Biofiltration: An innovative technology for the future; RESOURCE magazine (published by the American Society of Agricultural Engineers) ; MAY 1999
10. Priti Ganeshan; PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL ACCOUNTING OF AIR BIOFILTRATION FOR CARBON MONOXIDE REMOVAL; MS thesis; University of Maryland; 2005
11. Ronald A. Zurlinden, Charles Carmel; Biofiltration control of volatile organic compounds at a petroleum release site; ON PETROLEUM HYDROCARBONS AND ORGANIC Conference-HOUSTON, TEXAS; November 2-4, 1994
12. William C. Stewart, Tracy Ashlock Barton; High VOC Loadings in Biofilters - Petroleum and Industrial Applications; Gas Industry Air Toxics Conference - San Antonio, TX - May 24-26, 1999
۱۳. ویلارد پالکراپک؛ موتورهای احتراق داخلی؛ ترجمه‌ی سپهر صنایع؛ انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران؛ چاپ دوم؛ ۱۳۸۶
۱۴. سازمان حفاظت محیط زیست؛ ضوابط و استانداردهای زیست محیطی؛ انتشارات دایره‌ی سبز؛ چاپ اول؛ ۱۳۸۲