بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٢٧٠٢

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک

بر رسی آلودگی هوا و ارزیابی کیفیت هوا در اصفهان

استاد راهنما:

دکتر اسماعیل حسن‌زاده

استاد مشاور:

دکتر عبدالله صداقت‌کردار

پژوهشگر:

سیده آزاده حجازی جویباری

اردیبهشت ماه ۱۳۸۷

۱۳۸۷ /۶/ ۰۰۰۵

۱۰۲۷۰۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری هـای ناشـی از تحقیـق
موضوع این پایان نامه متعلق بـه دانـشگاه
اصفهان است.

۱۳۸۷ /۶/ ۰۰۰۰

شیوه نگارش پایان نامه
رعایت شده است.
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک خانم آزاده حجازی

تحت عنوان

بر رسی آلودگی هوا و ارزیابی کیفیت هوا در اصفهان

در تاریخ ۱۳۸۷/۲/۲ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر اسماعیل حسن زاده با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲- استاد مشاور پایان‌نامه دکتر عبداله صداقت کردار با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر فهیمه حسینی بالام با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر غلامرضا شیران با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

گروه فیزیک
امضای مدیر گروه
ISFAHAN UNIV PHYSICS DEPT

سپاسگزاری:

در اینجا لازم می‌بینم از همه کسانی که در طول این تحقیق یاورم بودند، قدردانی کنم.

با سپاس از کمک‌های

۱- آقای دکتر حسن‌زاده

۲- آقای دکتر صداقت‌کردار

۳- خانم زهره جهانگیری

۴- سازمان محیط زیست اصفهان به ویژه جناب آقای مهندس صادقیان

۵- سازمان هواشناسی کل کشور

۶- از کمک‌های بی‌دریغ و سرشار از مهر همه دوستان خوبم که در طول این دوره از تحصیل صمیمانه در کنارم بودند و در تمام زمینه‌ها یاریم نمودند، سپاسگزارم و برایشان از درگاه ایزدی تمنای سعادت و موفقیت دارم.

با تقدیم

به پدرم که چتر سبز محبتش پشتیبان همیشگی من بوده

و

به مادرم که زمزمه مناجات‌های عاشقانه‌اش برکت زندگی‌ام بوده است.

چکیده

آلودگی هوا از مسائل مهم جهان امروز است که با گسترش روز افزون استفاده نادرست از تکنولوژی اهمیت آن بیش از پیش آشکار می شود. در این تحقیق به تعیین کیفیت هوای اصفهان که از شهرهای بزرگ ایران است، بر اساس اطلاعات آلودگی هوای این شهر از سازمان محیط زیست، پرداخته می‌شود. اطلاعات به کار رفته مربوط به دو ایستگاه آزادی و لاله است. این اطلاعات در دوره یک ساله آوریل ۲۰۰۵ تا مارس ۲۰۰۶ اندازه‌گیری شده‌اند. بعد از بررسی روند آلاینده‌های اصلی در بازه‌های زمانی مختلف، به محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا پرداخته شد و مدلی آماری جهت پیش‌بینی این شاخص ارائه گردید.

از بررسی تغییر آلاینده‌ها در طول ۲۴ ساعت، برمی‌آید که عمده مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن در دو ایستگاه، در ساعت هایی که انتظار افزایش در ترافیک شهری می رود، مشاهده می‌شود. در ماه‌های سرد سال اغلب آلاینده‌های اولیه(مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن) افزایش می یابند. سطح اوزن بر خلاف آلاینده‌های اولیه، کاهش می‌یابد و در ماه‌های گرم سال زیاد می‌شود. افزایش آلاینده‌های اولیه در ماه‌های سرد سال ناشی از وارونگی دمایی است که اغلب در روزهای سرد شکل می‌گیرد. در چنین زمان‌هایی به علت کاهش تابش و دمای هوا شکل‌گیری آلاینده‌های ثانویه‌ای مثل اوزن کند می‌شود.

با محاسبه ضرایب همبستگی بین آلاینده‌های مختلف و پارامترهای هواشناسی مشخص شد، دما و فشار در هر دو ایستگاه، موثرترین عامل در مقدار اکسیدهای نیتروژن و مونوکسیدکربن است. با افزایش دما، ساعت آفتابی و تابش، سطح اوزن افزایش می‌یابد و با افزایش رطوبت نسبی و فشار ایستگاه این مقدار کاهش می‌یابد.

استفاده از متغیرهای آب و هوایی مجزا وضعیت‌های مختلفی را مطرح می‌کند. از آنجا که آلودگی هوا به همه ویژگی-های هواشناسی یک منطقه پاسخ می‌دهد، به کمک روش PCA، از ترکیب پارامترهای مختلف جوی، مجموعه جدیدی از متغیرهای مستقل خطی که بیشترین تغییرات مربوط به مجموعه اصلی را شرح می‌دهند، به دست آوریم. سپس همبستگی این پارامترهای جدید را با سطح آلودگی محاسبه نمودیم و مدل رگرسیونی برای هریک از آلاینده‌ها به دست آوردیم.

در نهایت، روزهای آلوده سال و وضعیت سینوپتیکی جو در این روزها مورد بررسی قرار گرفته است. روزهای آلوده مربوط به ماه دسامبر که آلوده‌ترین ماه سال است مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که حضور سیستم‌های پرفشار در منطقه به وارونگی دمای سطحی و انباشت آلاینده‌ها منجر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، متغیرهای هواشناسی، لایه آمیخته، نمایه قائم دما، اصفهان

فهرست مندرجات

آلودگی هوا و مفاهیم مربوط به آن ۱

۱—۱ مقدمه ۱

۱—۱—۱ تاریخچه ۲

۱—۱—۲ جو زمین و هوای غیر آلوده ۳

۱—۲ آلودگی هوا و عوامل موثر در آن ۷

۱—۲—۱ تعریف آلودگی ۷

۱—۲—۲ انواع مشکلات ناشی از آلودگی هوا ۷

۱—۳ مولفه‌های مسئله آلودگی هوا ۹

۱—۳—۱ چشمه‌های آلودگی هوا ۹

۱—۳—۲ آلاینده‌های هوا ۱۰

۱—۴ استانداردهای آلودگی و شاخص کیفیت هوا ۲۰

۱—۴—۱ روش محاسبه PSI ۲۱

هواشناسی آلودگی هوا ۲۴

۲—۱ هواشناسی خرد و لایه مرزی سیاره‌ای ۲۴

۲—۲ سیستم‌های کلان مقیاس ۲۶

۲–۳ ساختار دما در لایه مرزی و پایداری ۳۰
۲–۳–۱ پایداری جو ۳۳
۲–۳–۲ وارونگی دمایی ۳۵

۲–۴ ساختار سرعت باد و تلاطم در لایه مرزی زمین ۳۸

۲–۵ اثر توپوگرافی پیچیده بر پارامترهای هواشناسی ۴۲

۲–۶ ماکزیمم عمق اختلاط ۴۶

۲–۷ مقیاس‌های مختلف هواشناسی در آلودگی هوا ۴۸
۲–۷–۱ انواع نقشه‌های سینوپتیکی ۵۲
۲–۷–۲ نمودارهای بی‌دررو ترمودینامیکی ۵۳

۲–۸ شرایط هواشناسی در طول بحران‌های مشهور آلودگی ۵۹

روش‌های آماری و نحوه به‌کارگیری آنها ۶۲

۳–۱ روش‌های آماری ۶۲
۳–۱–۱ ماتریس داده‌ها ۶۳
۳–۱–۲ آماره‌های توصیفی و تحلیل ماتریسی ۶۴

۳–۲ روش مولفه اصلی ۶۶
۳–۲–۱ ورودی در روش مولفه اصلی ۶۷
۳–۲–۲ خروجی در روش مولفه اصلی ۶۸
۳–۲–۳ اساس ریاضی روش مولفه اصلی ۶۸
۳–۲–۴ محاسبه مولفه‌های اصلی متغیرهای استاندارد شده ۷۱

۳–۳ تحلیل سری زمانی ۷۲
۳–۳–۱ آماره‌های توصیفی در تحلیل سری زمانی ۷۳

۳–۳–۲ الگوهائی برای سری زمانی ایستا ۷۵
۳–۳–۳ الگوهائی برای سری زمانی ناایستا ۷۸

۳–۴ منطقه مورد مطالعه ۸۰

۳–۵ تاریخچه علمی آلودگی هوا ۸۱

محاسبات و تجزیه و تحلیل آماری ۸۶

۴–۱ مقدمه ۸۶

۴–۲ سری زمانی آلاینده‌ها ۸۷
۴–۲–۱ بررسی میانگین ساعتی آلاینده‌ها ۸۷
۴–۲–۲ بررسی میانگین ماهانه آلاینده‌ها ۹۰

۴–۳ بررسی فرکانس غلظت آلاینده‌ها ۹۴

۴–۴ بررسی روند آلاینده‌ها ۹۶

۴–۵ بررسی همبستگی آلاینده‌ها ۱۰۰
۴–۵–۱ همبستگی بین آلاینده‌های مختلف در هر ایستگاه ۱۰۰
۴–۵–۲ همبستگی متقابل بین آلاینده‌های مختلف در هر ایستگاه ۱۰۷
۴–۵–۳ همبستگی متقابل بین آلاینده‌های دو ایستگاه ۱۲۱

۴–۶ همبستگی بین آلاینده‌های هوا و پارامترهای هواشناسی ۱۲۶

۴–۷ روند تغییرات شاخص استاندارد مواد آلاینده(PSI) ۱۳۴
۴–۷–۱ مدل‌سازی آماری شاخص استاندارد مواد آلاینده(PSI) ۱۴۱

۴–۸ رگرسیون خطی چند متغیری ۱۴۳

۴–۹ محاسبات مربوط به روش مولفه اصلی ۱۴۹

۴–۱۰ رگرسیون خطی چند متغیری با پارامترهای جدید ۱۵۱

نتیجه‌گیری و تفسیر نقشه‌ها ۱۵۳

۵–۱ تحلیل میزان آلودگی هوای اصفهان در دسامبر ۱۵۳

۵–۱–۱ روند تغییرات غلظت آلاینده‌ها در ماه دسامبر ۲۰۰۵ . . . . . ۱۵۶

۵–۲ نتایج ۱۶۳

مراجع ۱۷۱

فصل اول

آلودگی هوا و مفاهیم مربوط به آن

۱—۱ مقدمه

به جرات می‌توان گفت هوا با ارزش‌ترین منبعی است که خداوند برای ادامه زندگی کلیه موجودات به زمین هدیه کرده است. نگهداری و حفظ سلامت جو نیز به عهده انسان نهاده شده است. برای محافظت از این منبع با ارزش حیات، تعادل بین استفاده و نگهداری آن از اهمیت بسیاری برخوردار است و برای تمدن بشر ضروری است.

آلودگیِ ناشی از فعالیت‌های انسان، از مهمترین عوامل تخریب جو است که از زمان برپایی آتش با انسان بوده است، ولی در زمان‌های مختلف آلاینده‌های هوا چه از نظر منابع انتشار و چه از نظر کمیّت و کیفیت متفاوت بوده‌اند. در مناطق شهری گذشته، سوزاندن زغال سنگ و در حال حاضر، مصرف بنزین در خودروها مشکل مهم انتشار آلودگی هوا بوده است. صنایع، نیروگاه‌ها و منابع خانگی و تجاری با انتشار گازهای مخرب لایه اوزن و تولید باران‌های اسیدی مشکلات منطقه‌ای و با انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای، موجب مشکلات جهانی همراه با تغییرات محسوس در اقلیم زمین شده‌اند[۲۶].

۱—۱—۱ تاریخچه

در اینجا اشاره مختصری‌به طور اختصار به تاریخچه آلودگی هوا اشاره می‌شود. دود یکی از قدیمی‌ترین آلاینده‌های هوا است. زمانی که دود ناشی از آتش حاصله از سوختن چوب توسط ساکنین اولیه غارها جای خود را به دود ناشی از کوره‌های زغال‌سوز در شهرهای پرجمعیت داد، زنگ خطری برای برخی از شهرها به صدا در آمد. در سال ٦١ بعد از میلاد، سنکا[1] فیلسوف رومی از هوای روم به عنوان هوای سنگین نام می‌برد. در سال ۱۳۰۰ میلادی ادوارد اول، پادشاه انگلستان، هوای لندن را چنان آلوده به مه و دود می‌بیند که طی فرمانی از سوزاندن زغال سنگ دریایی جلوگیری می‌کند. علی‌رغم هشدارهای ادوارد اول، نابودی گسترده جنگل‌ها، چوب را تبدیل به کالای کمیاب نمود و ساکنان لندن را وادار ساخت تا به‌جای کم کردن مصرف زغال‌سنگ به میزان بیشتری از آن استفاده کنند. در سال ١٦٦١م. آلودگی هوای لندن به حدی رسید که جان اولین[2]، بروشوری را انتشار داد که در آن پیشنهاد کرده بود، صنایع به خارج شهر انتقال یابند و کمربند سبز دور شهر ایجاد شود.

انقلاب صنعتی، در اوایل سده هجدهم و با اختراع موتور پمپ شروع شد. موتورها و توربین‌های بخار به دیگ بخار نیاز دارند. این دستگاه‌ها تا پیش از اختراع راکتور هسته‌ای با سوخت‌های گیاهی یا فسیلی، بخار تولید می‌کردند. در بیشتر قرن نوزدهم زغال، سوخت اصلی دیگ‌های بخار بود، ولی در اواخر قرن، نفت نیز برای تامین نیاز دیگ‌های بخار مورد استفاده قرار گرفت.

در قرن نوزدهم مهم‌ترین مشکل آلودگی هوا، دود و خاکستر حاصل از مصرف زغال‌سنگ برای تولید انرژی در کوره‌ها، دیگ‌های بخار، لکوموتیوها، منازل و شناورها بود. در این زمان انگلیس بیشترین فعالیت را در مورد مسائل آلودگی هوا انجام داد. در سال ۱۸۱۹ م. فشار زیادی به پارلمان وارد شد تا اولین کمیته آلودگی هوا تعیین شود. اما از آنجا که باز هم باید مطالعه و تجربه می‌شد، هیچ کاری عملاً صورت نگرفت. اولین دستور صادر شده در مورد دود سیاه در سال‌های ۱۸۸۰ م. شامل صنایع، لوکوموتیوها و شناورها بود، ولی شامل منابع خانگی نمی‌شد.

طی سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۵ م. تغییرات زیادی در فناوری تولید و مهندسی تجهیزات آلودگی هوا به‌وجود آمد. در شروع این دوره لکوموتیوهای بخار وارد قلب شهرها شدند و در پایان دوره بیشتر خطوط راه‌آهن برقی شدند. شاید مهم‌ترین تغییر در صنعت، افزایش تعداد خودروها بود که تقریباً از هیچ در ابتدای قرن، فقط در امریکا در سال ۱۹۲۵ م. به بیش از ۴ میلیون دستگاه در سال رسید.

در دوره ۱۹۲۵ تا ۱۹۵۰ م. مشکلات آلودگی هوا که امروزه هم با آنها مواجه هستیم، بروز کرد. حادثه دره میوز بلژیک در ۱۹۳۰ م.، دونورا— پنسیلوانیا در ۱۹۴۸ م. و پوزاریکا در مکزیکو از آن جمله بودند. اولین کنفرانس فنی آلودگی هوا سال ۱۹۵۰ م. در واشنگتن برگزار شد. نخستین بررسی

---

[1] Seneca

[2] John Evelyn

آلودگی هوا در مقیاس وسیع، در سال ۱۹۲۶ م. در سالت‌لیک‌سیتی‌یوتا و سپس در سال‌های ۱۹۳۷ م. در نیویورک و ۱۹۳۹ م. در لیستر انگلیس صورت گرفت.

بزرگ‌ترین فاجعه آلودگی در سال ۱۹۵۲ م. در لندن اتفاق افتاد که به تصویب قانون هوای پاک در سال ۱۹۵۶ م. و توسعه اختیارات بازرسی الکالی[۳] انجامید. در طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰ م. مهم‌ترین تغییر صورت گرفته در مورد وسایل گرمایشی خانگی بود. پیش از آن زغال‌سنگ مهم‌ترین منبع گرمایش خانه‌ها بود که با سیستم گرمایش مرکزی و الکتریکی برای بخاری‌ها و شومینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت.

در سال ۱۹۵۵ م. با افزایش روز افزون مشکل مه دود در لس‌آنجلس، اولین قانون فدرال عملی شد. در این قانون، دولت فدرال موظف شد کمک‌های مالی، آموزشی و فنی برای مراکز پژوهشی کنترل آلودگی هوا تامین کند. در سال ۱۹۸۰ م. مرکزهای بزرگ تحقیقات آلودگی هوا در انگلیس، فرانسه، هلند، سوئد، آلمان و ژاپن شروع به‌کار کردند.

به این ترتیب در شهرهای مختلف دنیا، بررسی کیفیت آب، مواد زاید جامد، آلودگی صوتی و مصرف مواد خطرناکی چون آفت‌کش‌ها مورد توجه قرار گرفت. در حال حاضر کنترل آلودگی هوا اغلب جزیی از فرایند تولید است. خودروها، نیروگاه‌ها و کارخانه‌ها در زمان ساخت، تجهیزات کنترلی را نصب می‌کنند[۲۶].

۱—۱—۲ جو زمین و هوای غیر آلوده

اطراف زمین را کره‌ای از هوا به نام جو احاطه کرده است. تکامل تدریجی جو در طی زمانی متجاوز از ۳ تا ۵ بیلیون سال صورت گرفته است و تنها در ده‌ها سال اخیر مقدار اکسیژن و ازت جهانی به سطح کنونی رسیده است.

هوا از تعدادی مولکول گاز تشکیل شده است که نسبت آنها هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی، و نیز از نظر زمان ثابت است. جدول (۱— ۱) نسبت ترکیب گازهای تشکیل دهنده هوای غیر آلوده را که تا حد غلظت یک قسمت در میلیون وجود دارند، نشان می‌دهد. این نسبت‌ها مربوط به هوای خشکِ بدون بخارآب است. غلظت بخار آب، به علت خواص غیر معمول آن، در فشار و دمای زمین بسیار متغیر است.

در واقع چون هوا آمیزه‌ای از گازهاست و چیزی به عنوان مولکول هوا وجود ندارد، وزن مولکولی ندارد، اما می‌توان به اصطلاح یک «وزن مولکولی » را به هوای خشک نسبت داد. که از رابطه (۱—۱) به‌دست می‌آید.

---

[۳] Alkali Act

جدول ۱— ۱ : نسبت مولکول‌های تشکیل دهنده هوای خشک

مولکول	علامت	نسبت حجمی
نیتروژن	N_2	۷۸/۱ درصد
اکسیژن	O_2	۲۰/۹ درصد
ارگون	Ar	۰/۹۳ درصد
دی اکسید کربن	CO_2	۳۷۰ پی پی ام
نئون	Ne	۱۸ پی پی ام
هلیم	He	۵ پی پی ام
متان	CH_4	۱/۷ پی پی ام
هیدروژن	H_2	۰/۳۵ پی پی ام
اکسیدنیترو	N_2O	۰/۳۱ پی پی ام

$$M_a = \sum V_x M_x \qquad (۱—۱)$$

که در آن V_x وM_x به‌ترتیب جزء حجمی و وزن مولکولی هر یک از گازهاست.
با توجه به جدول (۱— ۱) و رابطه (۱—۱) وزن مولکولی هوا به شکل زیر محاسبه می‌شود:

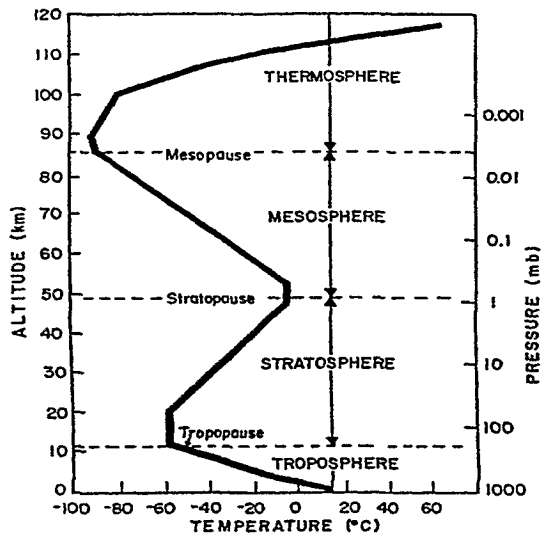
$$M_a = ۲۸/۹۵ mol^{-۱} \qquad (۲—۱)$$

مجموعه این گازها در اطراف کره زمین قشری را به‌وجود آورده است که جو یا اتمسفر زمین می‌نامیم[۲۶]. اتمسفر زمین، کره هوایی را حول زمین تشکیل می‌دهد که از چندین طبقه تشکیل شده است. معمول‌ترین تقسیم‌بندی جو بر اساس دما، انجام می‌شود که در شکل(۱—۱) نشان داده شده است. بر این اساس، طبقات جو، از سطح زمین به سمت خارج به ترتیب عبارتند از:

۱) زیرین سپهر[۴]

نزدیک‌ترین لایه به سطح زمین، زیرین سپهر است. ارتفاع این لایه از ۹ کیلومتری سطح زمین در قطب‌ها تا حدود ۱۶ کیلومتری آن در عرض‌های پایین، تغییر می‌کند. در اینجا دما با ارتفاع، با سرعت ۶/۵ درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر، کاهش می‌یابد. دمای پایین هوا، در انتهای بالایی زیرین‌سپهر، آب زمین را حفظ می‌کند. سطح زمین(هم خشکی و هم دریا)، تحت تابش خورشید گرم می‌شود و این گرما را با همرفت [۵] و تابش امواج بلند به زیرین‌سپهر می‌دهد، در

[۴] Troposphere
[۵] Convection



شکل ۱—۱: نمایه قائم دمایی جو و لایه‌های مختلف آن

نتیجه اختلاط عمودی در این لایه نسبتاً خوب است و بیشتر هوا[۶] در این ناحیه شکل می‌گیرد. آلاینده‌ها نیز در این لایه منتشر می شوند و اغلب تحت فرایندهای زدایش مختلف، از جو زدوده می‌شوند. تنها کلروفلوروکربن‌ها[۷] و دیگر ترکیبات هالوژن هستند که می‌توانند از مرز بین زیرین‌سپهر و آرام‌سپهر(زیرین‌مرز[۸]) بگذرند[۳].

زیرین سپهر، به علت این که در معرض اثرات شدید تابش، همرفت، و تبخیر— چگالش سطح مشترک هوا— زمین قرار دارد، چندین منطقه یا لایه دارد. در پایین‌ترین قسمت، زیست‌سپهر[۹] قرار دارد، که درست در داخل محیط زیست نباتات، حشرات و سایر اشکال حیات واقع است. شرایط آن را به میزان وسیعی پوشش نباتی و پوشش خاک(صحراها، علفزارها یا جنگل‌ها) تعیین می‌کند. در این منطقه حرکت هوا نسبتاً ناچیز است. گازهایی نظیر آمونیاک، متان و رادون که معمولاً به مقادیر ناچیز در جو زمین یافت می‌شوند، گاهی در اینجا مهم هستند. زیست‌سپهر از نظر کاربردهای کشاورزی مورد توجه خاص است. این نامگذاری را معمولاً در مرز هوا— دریا به‌کار نمی‌برند[۲۷].

۲) آرام‌سپهر[۱۰]

این لایه بالای زیرین‌سپهر و تا ارتفاع ۵۰ کیلومتری گسترده است و دمای آن با ارتفاع افزایش

---

[۶] Weather
[۷] CFCs
[۸] Tropopause
[۹] Biosphere
[۱۰] Stratosphere

می‌یابد. قسمت پایینی آرام‌سپهر، در عرض‌های میانی و عرض‌های بالا با یک لایه همدما[۱۱] مشخص می‌شود. در ارتفاعات بالاتر با شکل‌گیری اوزن و جذب تابش توسط آن، دما افزایش می‌یابد. دمای این لایه در ارتفاع ۵۰ کیلومتری، به ماکزیمم مقدار خود(۲۷۰ K) می‌رسد. در اینجا مرز بالایی لایه قرار می‌گیرد که آرام‌مرز[۱۲]، نامیده می‌شود. به علت وجود وارونگی دمایی قوی در آرام‌سپهر، اختلاط هوا در آن خیلی کم است. هر آلاینده‌ای که به این قسمت از جو وارد شود، توسط باد، بدون اینکه در راستای قائم منتقل شود، حول زمین پخش می شود. فقدان ابرها و بارش در این لایه، از زدایش آلاینده‌ها جلوگیری می‌کند، از این رو هواویزهای موجود در آرام‌سپهر به خاطر تاثیر مهمی که بر میزان تابش و بودجه انرژی و در نتیجه آب و هوا می گذارند، مهم هستند.

۳) میان‌سپهر[۱۳]

این ناحیه‌ی جو، از ارتفاع ۵۰ کیلومتری سطح تا ۸۵ کیلومتری آن، گسترش دارد. در این منطقه با افزایش ارتفاع دما کاهش می‌یابد. کمینه دما در آن ۱۷۰ K است که در لایه مرزی، میان‌مرز[۱۴] اتفاق می‌افتد. میان‌مرز سردترین دمای جو را دارد.

۴) گرم‌سپهر[۱۵]

بیرونی‌ترین لایه جو گرم‌سپهر است. این لایه از حدود ۹۰ کیلومتری تا ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین قرار دارد. در این لایه دما به سرعت با ارتفاع افزایش می‌یابد. افزایش دما در اینجا ناشی از تبدیل انرژی خورشیدی به گرمای محسوس[۱۶] است که در نتیجه گسست‌نوری[۱۷] اکسیژن مولکولی و یونش‌نوری[۱۸] مولکول نیتروژن و اکسیژن اتمی است. دما که به صورت انرژی جنبشی مولکول‌ها تعریف می‌شود، در ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری به ۱۵۰۰ K می‌رسد، البته چگالی مولکولی در این ناحیه آنقدر کم است که اگر جسمی در آنجا قرار گیرد، گرم نمی‌شود. کمی پایین‌تر از گرم‌سپهر(حدود ۷۰ کیلومتری زمین) تا حدود ۴۰۰ کیلومتری زمین را یون‌سپهر[۱۹] نیز می‌نامند، زیرا در این ناحیه اتم‌های اکسیژن و مولکول‌های نیتروژن یونیده نوری می‌شوند. یون‌سپهر در ارسال امواج رادیویی راه دور لایه مهمی به شمار می آید. نمایش زیبای فجر شمالی و فجر جنوبی نیز در این قسمت از جو اتفاق می‌افتد[۳].

---

[۱۱] Isothermal
[۱۲] Stratopause
[۱۳] Mesosphere
[۱۴] Mesopause
[۱۵] Thermosphere
[۱۶] Sensible heat
[۱۷] Photodissociation
[۱۸] Photoionization
[۱۹] Ionosphere

۱—۲ آلودگی هوا و عوامل موثر در آن

۱—۲—۱ تعریف آلودگی

کلمه آلودگی[۲۰] از کلمه لاتین Pollutus به معنی ناپاک یا کثیف گرفته شده است. آلودگی هوا معمولاً به صورت شرایط جوی تعریف می‌شود که مواد در غلظت‌هایی بالاتر از حد نرمالشان در جو وجود دارند و انسان‌ها، گیاهان، حیوانات و مواد را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این تعریف شامل همه موادِ خطرناک و بی‌ضرر، جامد، مایع یا گاز، طبیعی و مصنوعی می‌شود، اما بیشترین توجه مربوط به موادی است که آثار ناخوشایندی مثل بوی بد، احساس سوزش، مرگ یا بیماری انسان‌ها، اختلال در رشد یا نابودی گیاهان، از بین رفتن مواد و یا خاصیت آنها، تیرگی دید و تغییرات جوی را موجب می‌شوند. این آثار ناخوشایند، ممکن است تحت تاثیر غلظت زیاد آلاینده‌ها در مدت زمان کوتاه و یا از تاثیر طولانی مدت غلظت کم آلاینده‌ها باشد[۲۷].

انجمن مشترک مهندسین آلودگی هوا و کنترل آن[۲۱] تعریف زیر را برای آلودگی هوا بیان کرده است:

> آلودگی هوا یعنی وجود یک یا چند آلاینده مانند گرد و غبار[۲۲]، مه[۲۳]، گاز، میست‌ها[۲۴]، دود[۲۵]، بخار، ذره، قطره[۲۶]، خاکستر فرار[۲۷] و دمه[۲۸] در هوای آزاد، با کمیت‌ها، ویژگی‌ها و زمان ماند که برای انسان، گیاه و یا زندگی حیوانات خطرناک و برای اموال مضر باشند و یا به طور غیرقابل قبولی مخل استفاده راحت از زندگی و اموال گردند[۲۸].

۱—۲—۲ انواع مشکلات ناشی از آلودگی هوا

مشکلات ناشی از آلودگی هوا از زمانی که اجداد ما شروع به استفاده از آتش نمودند، وجود داشته است. اما با افزایش جمعیت همراه با ازدیاد ورود آلاینده‌ها به جو، این مسئله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. امروزه، سالانه دو بیلیون تن آلاینده وارد هوای جهان می‌شوند. با آنکه کیفیت هوا هر جا که آلاینده بیشتری وارد آن شود بدتر خواهد بود، اما مشکلات ناشی از آلودگی هوا منحصر به منطقه پخش آلاینده‌ها نیست. مشکلات ناشی از آلودگی هوا از نظر زمانی و مکانی به صورت

---

[۲۰] Pollution
[۲۱] The Engineers Joint Council in Air Pollution and its Control
[۲۲] Dust
[۲۳] Fog
[۲۴] Mist
[۲۵] Smoke
[۲۶] Druplet
[۲۷] Fly ash
[۲۸] Fume

جدول ۱— ۲ : انواع مقیاس‌های آلودگی هوا

سازمان‌دهی	مقیاس زمانی hr	مقیاس قائم km	مقیاس افقی km	نوع مشکل
خانواده/حرفه	$۱ _ ۱۰^{-۱}$	تا ۰/۱	$۱۰^{-۱} _ ۱۰^{-۲}$	داخلی
شهر/روستا	$۱۰^{-۱} _ ۱۰$	تا ۳	$۱۰ _ ۱۰^{-۱}$	محلی
شهر/روستا	$۱ _ ۱۰^{۲}$	تا ۳	$۱۰^{۲} _ ۱۰$	شهری
ایالت/کشور	$۱۰ _ ۱۰^{۳}$	تا ۱۵	$۱۰^{۲} _ ۱۰^{۳}$	منطقه ای
کشور/جهان	$۱۰^{۲} _ ۱۰^{۴}$	تا ۳۰	$۱۰^{۳} _ ۱۰^{۴}$	قاره ای
جهان	$۱۰^{۳} _ ۱۰^{۵}$	تا ۵۰	$۱۰^{۴} _ ۲ \times ۱۰^{۴}$	نیمکره ای
جهان	$۱۰^{۳} _ ۱۰^{۶}$	تا ۵۰	۴×۱۰^{۴}	جهانی

جدول(۱— ۲) مقیاس‌بندی می‌شوند.

۱) اولین نوع مشکلات در این دسته‌بندی شامل آلودگی هوای درونی [۲۹] در خانه‌ها و ساختمان‌های تجاری، آلودگی هوای محلی [۳۰] حول کارخانه‌های ایزوله و نیروگاه‌های برق و مکان‌های دفع مواد زائد و آلودگی هوای شهری [۳۱] شامل منابع مختلف آلودگی شهری مثل غبار [۳۲] و دود است.

۲) مشکلات منطقه‌ای [۳۳] و قاره‌ای [۳۴] که شامل جا به جایی اکسیدهای نیتروژن و سولفور از نواحی صنعتی اصلی به نواحی دیگر و تولید باران اسیدی، انتقال منطقه‌ای اوزن و انتقال دود حاصل از سوختن جنگل‌ها است.

۳) سومین قسم مسائل ناشی از آلودگی هوا، آلودگی هوای نیم‌کره‌ای [۳۵] و جهانی [۳۶] و نتایج حاصل از آن در تغییر اقلیم در طول دهه‌ها و قرن‌ها است. بهترین نمونه‌های شناخته‌شده عبارت‌اند از: پیش‌بینی گرم شدن هوای جهان به علت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای، نقصان در اوزن آرام‌سپهر و شکل‌گیری حفره اوزن، ورود ذرات حاصل از انفجارهای

[۲۹] Indoor
[۳۰] Local
[۳۱] Urban
[۳۲] Haze
[۳۳] Regional
[۳۴] Continental
[۳۵] Hemispheric
[۳۶] Global

آتشفشانی و نشر انسانی[۳۷](مربوط به برخورد و تماس بشر با طبیعت) ناشی از هواپیماهای بلندپرواز، به آرام‌سپهر است که موجب سرد شدن اقلیم جهانی می‌شوند.

۱—۳ مولفه‌های مسئله آلودگی هوا

هر کدام از مشکلات آلودگی هوا که در قسمت قبل به آن اشاره شد، سه مولفه مهم دارند.

۱) منابع نشر، که آلاینده‌های هوا را تولید می‌کنند.

۲) جو، که انتقال، پخش، تبدیلات شیمیایی و فرایندهای زدایش در آن اتفاق می‌افتد.

۳) گیرنده‌های نزدیک زمین، که با توجه به میزان آلاینده‌های دریافتی، پاسخ می‌دهند.

اندازه‌گیری یا محاسبه تقریبی انتشار انواع آلاینده‌ها، از منابع مختلف، به اطلاعاتی از شیمی احتراق، مهندسی طراحی تجهیزات و تکنولوژی کنترل آلودگی هوا، درک چگونگی انتشار آلاینده‌ها و انتقالشان از طریق جو به اطلاعاتی از هواشناسی و مکانیک سیالات محیطی، فهم جامع تبدیلات شیمیایی و فرایندهای زدایش(مثل رسوب خشک وزدایش ناشی از بارش) به علومی چون شیمی جو، فیزیک رسوب‌گیری و فرایندهای میکروفیزیکی ابر نیاز دارد. در نهایت درک کاملی از گیرنده‌های مختلف(مثل انسان، حیوانات، گیاهان و مواد) و پاسخ آن گیرنده‌ها به آلاینده‌های هوا نیاز به دانش فیزیولوژی، پزشکی، آسیب‌شناسی گیاهان و علم مواد دارد. بنابراین آلودگی هوا مشکلی مربوط به علوم مختلف است که مطالعه و حل آن تنها با تلاش دانشمندان رشته‌های مختلف ممکن می‌شود.

۱—۳—۱ چشمه‌های آلودگی هوا

چشمه‌های مختلف آلودگی هوا به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱) چشمه‌های صنعتی و شهری

۲) چشمه‌های کشاورزی و دیگر منابع روستایی

۳) نشر طبیعی

این دسته‌بندی یکتا یا استاندارد نیست و تنها به منظور نمایش انواع منابع آلوده‌کننده به کار می‌رود. هر کدام از دسته‌های فوق را می‌توان به چند زیردسته تقسیم کرد که در ادامه آورده شده‌اند.

[۳۷] Anthropogenic