





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست

پایش پارامترهای کیفی هوای شهر مشهد با استفاده از شبکه

عصبی مصنوعی

نگارنده:

محمد دهقان نیری

استاد راهنما:

دکتر رمضان واقعی

آذرماه ۱۳۹۸

تقدیم بہ

پدرم

کوہی استوار و حامی من در تمام طول زندگی

تقدیم بہ مادرم

سنگ صبری کہ الفبای زندگی بہ من آموخت

تقدیم بہ خواہرم

کہ وجودش شادی بخش و صفایش مایہ آرامش من است

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدای بزرگ را که از دانش خود در وجود بشر دمیده تا گوشه‌ای از راز هستی بر انسان آشکار شود. بی‌تردید انجام این

پژوهش جز بایاری الطاف بی‌پایان خداوند، همیاری خانواده و اساتید فرهیخته ممکن نبود.

به رسم ادب خود را ملزم می‌دانم از مصمم قلب تشکر و سپاس خالصانه خود را از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر

رمضان واقعی عرض دارم که بابر باری تمام از هیچ دریغ نکردند.

تعهدنامه

اینجانب محمد دهقان نیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع پایش پارامترهای کیفی هوای شهر مشهد با

استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تحت راهنمایی دکتر رمضان واقعی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

شهر مشهد به عنوان دومین کلان شهر کشور دارای ۳,۵ میلیون نفر جمعیت است. آلاینده‌گی زیاد حاصل از منابع و آلاینده‌های گوناگون معضل آلودگی هوا و به دنبال آن اهمیت ارائه راه حل برای این مسئله را در این شهر بزرگ دوچندان می‌کند. در این پژوهش یک مدل بر اساس رگرسیون چندگانه (خطی) و یک مدل دیگر بر اساس شبکه عصبی مصنوعی (غیرخطی)، به منظور پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های CO ، PM_{10} و O_3 بر حسب شرایط آب و هوایی برای شهر مشهد ارائه شده است. داده‌های هواشناسی این تحقیق شامل رطوبت نسبی، جهت باد، درجه حرارت، بارندگی و فشار هوا است که از اداره هواشناسی مشهد (ایستگاه هواشناسی مشهد) گرفته شدند و داده‌های مربوط به وارونگی دما و ترافیک هم با استفاده از نرم افزارهای مربوط به آن‌ها در مدل لحاظ گردیدند. داده‌های آلودگی هوا (غلظت آلاینده‌های مذکور) از مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد تهیه شده است. در این تحقیق داده‌های آلودگی هوا در سال ۹۵ و ۹۶ برای ایستگاه آلودگی هوای سجاد شهر مشهد به دست آمده است. از کل داده‌ها ۱۵ درصد برای تست شبکه، ۱۵ درصد داده‌ها برای اعتبار سنجی شبکه و ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه انتخاب شدند. سپس میزان ضریب همبستگی بین آلاینده‌های هوا و عناصر اقلیمی بررسی شد که نشانگر تاثیر زیاد سرعت باد (با ۳۸٪) و دمای هوا (با ۲۹٪/۲) بر میزان آلودگی هوا است. شبکه‌ها با یک، دو، سه و چهار لایه پنهان برای هر آلاینده اجرا شده و نتایج به دست آمده که برای مدت دو سال می‌باشند، به صورت جدول و گراف ارائه شدند. این نتایج تایید کننده توانایی بیشتر مدل شبکه‌های عصبی (با خطای RMSE برابر ۰/۱۳۷ برای CO) نسبت به روش‌های خطی رگرسیون چندگانه (با خطای RMSE برابر ۰/۵۷۲ برای CO) هستند. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از لایه‌های پنهان بیشتر و تعداد نرون‌های بیشتر در لایه‌های شبکه عصبی، لزوماً منجر به عملکرد بهتر نمی‌شود. پیش‌بینی مربوط به ۵ روز بعد با میانگین خطای ۰/۹۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۸ به ترتیب برای CO ، PM_{10} و O_3 با استفاده از روش سری زمانی صورت گرفت.

کلمات کلیدی: آلودگی هوا، پیش‌بینی، رگرسیون چندگانه، شبکه عصبی

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- بیان مسئله
۳	۳-۱- ضرورت و توجیه انجام پژوهش
۳	۴-۱- هدف تحقیق
۵	فصل دوم
۶	۲-۱- مقدمه
۸	۲-۲- ساختار اتمسفر زمین
۱۱	۳-۲- آلودگی محیط زیست
۱۲	۳-۲-۱- آلودگی هوا
۱۲	۳-۲-۲- آلاینده
۱۲	۳-۲-۲-۱- آلاینده های هوا
۱۵	۳-۲-۲-۲- طبقه بندی آلاینده های هوا
۱۷	۳-۲-۳- تقسیم بندی آلوده کننده های هوا بر اساس منبع انتشار
۱۸	۴-۲- آلاینده های شاخص آلودگی هوا
۱۸	۴-۲-۱- مونوکسید کربن
۲۰	۴-۲-۲- ذرات معلق

۲۰	۲-۴-۱- ذرات معلق در هوا
۲۱	۲-۴-۲ اثرات ذرات معلق
۲۴	۲-۴-۳- اکسیدکننده‌های فتوشیمیایی
۲۶	۲-۴-۴- اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان
۲۶	۲-۴-۴-۱- دستگاه تنفس
۲۶	۲-۴-۴-۲- دستگاه گردش خون
۲۷	۲-۴-۴-۳- دستگاه عصبی
۲۷	۲-۴-۴-۴- حساسیت‌زایی
۲۸	۲-۵- حوادث مهم و فاجعه‌آمیز آلودگی هوا
۲۹	۲-۶- اثرات آلودگی هوا
۲۹	۲-۶-۱ اثرات مخرب آلودگی هوا بر سایر جانداران
۲۹	۲-۶-۲ اثرات آلودگی هوا بر آثار تاریخی
۳۰	۲-۶-۳- باران‌های اسیدی
۳۱	۲-۶-۴ اثرات آلودگی هوا بر اقلیم جهانی
۳۲	۲-۷- استانداردهای مربوط به آلودگی هوا
۳۲	۱-۷-۲ شاخص آلودگی هوا
۳۶	۲-۸- تاریخچه مطالعات پیشین
۴۵	۳- فصل سوم
۴۶	۱-۳- مقدمه
۴۶	۳-۲- خصوصیات منطقه مورد مطالعه

۴۶	۳-۲-۱- موقعیت جغرافیایی
۴۷	۳-۲-۲- اقلیم
۴۸	۳-۲-۳- جمعیت
۴۹	۳-۳- داده‌های هواشناسی
۴۹	۳-۴- داده‌های مربوط به آلاینده‌های شاخص آلودگی هوا
۵۲	۳-۵- نرم‌افزارهای مورد استفاده
۵۳	۳-۶- مدل‌های مورد استفاده
۵۳	۳-۶-۱- رگرسیون خطی چندگانه (MLR)
۵۴	۳-۶-۲- شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
۵۴	۳-۶-۲-۱- مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی
۵۶	۳-۶-۲-۲- ساختار شبکه‌های عصبی
۵۸	۳-۶-۲-۳- مزایای شبکه عصبی
۵۹	۳-۶-۲-۴- پرسپترون چندلایه
۶۱	۳-۷- پارامترهای مورد استفاده در مدل
۶۱	۳-۷-۱- پارامترهای هواشناسی
۶۴	۳-۷-۲- پارامترهای ترافیکی
۶۵	۳-۷-۳- پارامترهای زمانی
۶۵	۳-۷-۴- غلظت آلاینده
۶۵	۳-۷-۵- وارونگی دما
۶۶	۳-۷-۶- وارونگی سطحی یا تشعشعی

۶۶	۳-۷-۷- وارونگی فرونشستی
۶۹	فصل چهارم
۷۰	۱-۴- مقدمه
۷۰	۴-۲- پارامترهای اقلیمی و نتایج حاصل از آن
۷۳	۴-۳- بررسی تغییرات آلودگی هوای شهر مشهد
۷۳	۴-۴- بررسی همبستگی عوامل اقلیمی و غلظت آلاینده‌ها
۷۴	۴-۵- مدل سازی آلودگی هوا با توجه به پارامترهای اقلیمی
۸۲	۴-۶- مراحل ساخت شبکه عصبی
۸۳	۴-۷- پیش‌بینی بر اساس شبکه عصبی
۸۵	۴-۷-۱- پیش‌بینی آلاینده CO
۹۵	۴-۷-۲- پیش‌بینی آلاینده PM ₁₀
۱۰۵	۳-۷-۴- پیش‌بینی آلاینده O ₃
۱۱۹	۵- فصل پنجم:
۱۲۰	۵-۱- مقدمه
۱۲۰	۵-۲- نتیجه گیری
۱۲۱	۵-۳- پیشنهادات
۱۲۳	۶ منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱: نمایی از موقعیت شهر مشهد در کشور و استان خراسان رضوی ۴۷
- شکل ۳-۲: روند تغییرات جمعیت شهر مشهد (آمارنامه مشهد، ۱۳۹۵) ۴۸
- شکل ۳-۳: موقعیت ایستگاه‌های پایش آلودگی مشهد ۵۲
- شکل ۳-۴: ارتباط بین غلظت آلاینده CO در روز پیش‌بینی (d) و روز قبل آن (d-1) ۶۷
- شکل ۴-۱: تغییرات درصد رطوبت در طول سالهای ۹۵ و ۹۶ ۷۰
- شکل ۴-۲: تغییرات میزان بارندگی (mm) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶ ۷۰
- شکل ۴-۳: تغییرات درجه حرارت (°C) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶ ۷۱
- شکل ۴-۴: تغییرات فشار هوا (Hpa) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶ ۷۱
- شکل ۴-۵: تغییرات سرعت باد (m/s) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶ ۷۲
- شکل ۴-۶: شمای کلی استفاده از پارامترهای ورودی در مدل جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها ۷۵
- شکل ۴-۷: تغییرات غلظت آلاینده CO در سال‌های ۹۵ و ۹۶ ۷۷
- شکل ۴-۸: تغییرات غلظت آلاینده PM₁₀ در سال‌های ۹۵ و ۹۶ ۷۸
- شکل ۴-۹: تغییرات غلظت آلاینده O₃ در سال‌های ۹۵ و ۹۶ ۷۸
- شکل ۴-۱۰: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی شده در مدل رگرسیون برای CO ۷۹
- شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی شده در مدل رگرسیون برای PM₁₀ ۷۹
- شکل ۴-۱۲: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی شده در مدل رگرسیون برای O₃ ۸۰
- شکل ۴-۱۳: درصد تاثیر پارامترهای اقلیمی در پیش‌بینی غلظت روزانه مونوکسید کربن ۸۱
- شکل ۴-۱۴: آرایش لایه‌ها و نرون‌ها برای CO با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه ۹۰

شکل ۴-۱۵: آرایش لایه ها و نرون ها برای CO با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه ۹۰

شکل ۴-۱۶: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۹۱

شکل ۴-۱۷: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۹۲

شکل ۴-۱۸: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۳ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۹۲

شکل ۴-۱۹: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۹۳

شکل ۴-۲۰: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای

CO ۹۴

شکل ۴-۲۱: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان

برای CO ۹۴

شکل ۴-۲۲: نمودار خطای میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های

پنهان برای CO ۹۵

شکل ۴-۲۳: آرایش لایه ها و نرون ها برای PM₁₀ با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه ۱۰۰

شکل ۴-۲۴: آرایش لایه ها و نرون ها برای PM₁₀ با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه ۱۰۰

شکل ۴-۲۵: پیش‌بینی آلاینده PM₁₀ با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۱۰۱

شکل ۴-۲۶: پیش‌بینی آلاینده PM₁₀ با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۱۰۲

شکل ۴-۲۷: پیش‌بینی آلاینده PM₁₀ با ۳ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۱۰۲

شکل ۴-۲۸: پیش‌بینی آلاینده PM₁₀ با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی ۱۰۳

شکل ۴-۲۹: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای

PM₁₀ ۱۰۳

شکل ۴-۳۰: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان

برای PM₁₀ ۱۰۴

شکل ۴-۳۱: نمودار خطای جذر میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف

- ۱۰۴ لایه‌های پنهان برای PM_{10}
- شکل ۴-۳۲: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای
- ۱۰۹ آلایندۀ O_3
- شکل ۴-۳۳: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای
- ۱۱۰ آلایندۀ O_3
- شکل ۴-۳۴: پیش‌بینی آلایندۀ O_3 با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی
- ۱۱۱ شکل ۴-۳۵: پیش‌بینی آلایندۀ O_3 با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی
- ۱۱۲ شکل ۴-۳۶: پیش‌بینی آلایندۀ O_3 با ۳ لایه پنهان برای شبکه عصبی
- ۱۱۲ شکل ۴-۳۷: پیش‌بینی آلایندۀ O_3 با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی
- شکل ۴-۳۸: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای
- ۱۱۳ O_3
- شکل ۴-۳۹: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان
- ۱۱۳ برای O_3
- شکل ۴-۴۰: نمودار خطای جذر میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف
- ۱۱۴ لایه‌های پنهان برای O_3
- شکل ۴-۴۱: پیش‌بینی غلظت آلایندۀ پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای CO
- ۱۱۵
- شکل ۴-۴۲: پیش‌بینی غلظت آلایندۀ پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای PM_{10}
- ۱۱۶
- شکل ۴-۴۳: پیش‌بینی غلظت آلایندۀ پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای O_3
- ۱۱۷

فهرست جداول

۱۰	جدول ۱-۲: ترکیبات طبیعی هو
۲۰	جدول ۲-۲: اثرات مونوکسید کربن بر بدن انسان
۲۸	جدول ۳-۲: حوادث مهم آلودگی هوا
۳۳	جدول ۴-۲: شاخص استاندارد آلاینده (AQI)
۳۴	جدول ۵-۲: استانداردهای کیفی هوای امری
۳۵	جدول ۶-۲: استانداردهای هوای پاک در ایران در سالهای ۸۸-۹۰
۵۰	جدول ۱-۳: نام و موقعیت ایستگاههای سنجش آلودگی هوای مشهد
۵۲	جدول ۲-۳: نام و کاربرد نرم افزارهای مورد استفاده
۷۲	جدول ۱-۴: همبستگی آلاینده ها و پارامترهای هواشناسی در سال ۹۶
۷۴	جدول ۲-۴: همبستگی بین پارامترهای هواشناسی
۷۶	جدول ۳-۴: خصوصیات آماری پارامترهای استفاده شده در شبکه عصبی
۸۵	جدول ۴-۴: مقادیر R برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO
۸۶	جدول ۵-۴: مقادیر MAE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO
۸۶	جدول ۶-۴: مقادیر RMSE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO
۸۷	جدول ۷-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای آلاینده CO
۸۷	جدول ۸-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک دو پنهان برای آلاینده CO
۸۷	جدول ۹-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای

جدول ۴-۱۰: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان

جدول ۴-۱۱: مقادیر R برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای PM₁₀ ۹۵

جدول ۴-۱۲: مقادیر MAE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای PM₁₀

جدول ۴-۱۳: مقادیر RMSE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای

جدول ۴-۱۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای

جدول ۴-۱۵: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای

جدول ۴-۱۶: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای

جدول ۴-۱۷: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان

جدول ۴-۱۸: مقادیر R برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O₃ ۱۰۵

جدول ۴-۱۹: مقادیر MAE برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O₃ ۱۰۵

جدول ۴-۲۰: مقادیر RMSE برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O₃ ۱۰۶

جدول ۴-۲۱: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای

جدول ۴-۲۲: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای

آلاینده O₃ ۱۰۷

جدول ۴-۲۳: پارامترهای آماری به ازای ساختاره های مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای

آلاینده O₃ ۱۰۷

جدول ۴-۲۴: پارامترهای آماری به ازای ساختاره های مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان

برای آلاینده O₃ ۱۰۸

جدول ۴-۲۵: مقادیر اصلی و پیش بینی شده برای ۵ روز آینده CO ۱۱۵

جدول ۴-۲۶: مقادیر اصلی و پیش بینی شده برای ۵ روز آینده PM₁₀ ۱۱۶

جدول ۴-۲۷: مقادیر اصلی و پیش بینی شده برای ۵ روز آینده O₃ ۱۱۷

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

باوجود بحران آلودگی هوا در شهرهای بزرگ ایران و شدید شدن آن در سال‌های اخیر، مدل کاربردی برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوای این کلان‌شهرها به کار گرفته نمی‌شود. به‌منظور برنامه‌ریزی برای کاهش آلودگی هوا و اعمال راهکارهای کنترلی، مجریان و مدیران شهری و زیست‌محیطی نیاز دارند ابزاری برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا و برای حل این معضل زیست‌محیطی ابداع کنند. داشتن تصویری روشن از آینده و وضعیت آلودگی هوا، بدون تردید کمک بسیاری به برنامه‌ریزی و تصمیم‌سازی در جهت جلوگیری از وقوع بحران و یا دست‌کم کاهش اثرات مخرب آن دارد [۱].

مشکلات ناشی از آلودگی هوا در کلان‌شهرها به‌ویژه شهر مشهد به دلیل وجود بارگاه مقدس امام رضا(ع) و حجم ترافیکی سنگین ناشی از ترابری در اکثر ایام سال، استفاده از خودروهای غیراستاندارد، احتراق ناقص سوخت‌های مورد استفاده خودروها و بی‌توجهی که طی سال‌های گذشته نسبت به آلودگی هوا و عدم تحقیق مناسب در آن صورت گرفته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین جهت، بررسی و پیش‌بینی وضعیت آلودگی هوای این شهر از بعد آلاینده‌های مختلف می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های جامعی که در راستای کنترل و کاهش آلودگی هوا در این شهر انجام می‌پذیرد، بسیار موثر باشد.

۱-۲- بیان مسئله

روش‌های خطی و رگرسیون چندگانه دریافتن ارتباط‌های موجود بین پارامترهای هواشناسی و اثر آنها بر غلظت آلاینده‌های هوا دارای کارکرد مناسبی نیستند، از طرف دیگر استفاده از شبکه‌ی عصبی که یک مدل ماشینی برگرفته از شیوه‌ی کارکرد سیستم عصبی زیستی برای پردازش داده‌ها باهدف یادگیری و ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه‌ی پردازش اطلاعات است روشی قابل اطمینان و موثر است.

از آنجاکه آلاینده‌های هوا باعث بروز بیماری‌هایی از قبیل مشکلات قلبی، رفتارهای عصبی، مشکلات

تنفسی، و مشکل در خونرسانی می شوند و خساراتی از قبیل باران اسیدی، کاهش رشد گیاهان، نابودی جنگل‌ها، وارونگی دما و اثر گلخانه‌ای را در پی دارند. پیش‌بینی دقیق میزان آلاینده‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار در شناخت آلودگی محتمل هوا در آینده و مدیریت برنامه‌ریزی و کنترل این معضل زیست‌محیطی است. لذا استفاده از مدل‌های ریاضی با دقت بالاتر از جمله شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی آلاینده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

۳-۱- ضرورت و توجیه انجام پژوهش

پیش‌بینی آلودگی هوا در نواحی شهری به‌ویژه کلان‌شهرهایی که در آن‌ها استفاده از وسایل نقلیه به‌وفور دیده می‌شود در سلامتی انسان با تأثیرات مخرب فراوان همراه است. غلظت‌های آلودگی بالا تأثیرات سوء همچون آسم، برونشیت، تنگی نفس، سکته قلبی، و آلرژی‌های مختلف تنفسی و حتی مرگ زودرس گروه‌های حساس و آسیب‌پذیر جامعه از جمله افراد مسن و افرادی که به تنگی نفس دچار هستند را در پی دارد، که به روش‌های گوناگونی می‌تواند آثار زیان‌بار درازمدت و کوتاه‌مدتی بر سلامت انسان بگذارد. این آلودگی بیش از هر آلودگی دیگر جان انسان‌ها را گرفته است، لذا ارائه‌ی راه‌حل‌های کارآمد برای رسیدن به این مهم الزامی است [۳].

۴-۱- هدف تحقیق

به کمک مدل‌های پیش‌بینی آلودگی هوا که وسیله بسیار موثری برای مدیریت آلودگی هوای شهرهای بزرگ است می‌توان راهبردهای مناسب و کم‌هزینه‌ای ابداع کرد. با این طرح نمی‌توان مقدار خروجی آلاینده‌ها را کم کرد اما می‌توان از رسیدن به حالت بحرانی که زیان‌های جانی و مالی فراوانی دارد جلوگیری نمود. توسط این برنامه می‌توان زمان حداکثر آلودگی هوا را پیش‌بینی کرد تا با تغییر زمان‌بندی برخی فعالیت‌ها میزان آلودگی در زمانی که به‌عنوان حالت بحرانی پیش‌بینی شده کاسته شود. تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌ها و متدهای مختلف برای پیش‌بینی آلودگی هوا صورت گرفته است. در سال‌های اخیر کاربرد هوش مصنوعی به‌جای روش‌های کلاسیک آماری در بسیاری از

علوم رایج شده است. یکی از انواع مختلف هوش مصنوعی شبکه‌های عصبی مصنوعی است. به‌طور معمول برای استفاده از شبکه عصبی از داده‌های ورودی استفاده می‌شود، شبکه عصبی از این داده‌ها برای رسیدن به هدف نهایی که دست‌یابی به بهترین جواب است استفاده می‌کند.

هدف این تحقیق ارائه مدلی است که بتواند با ایجاد ارتباطی موثر بین پارامترهای هواشناسی شامل جهت باد، سرعت باد، رطوبت، بارندگی، فشار هوا و برخی دیگر از عوامل دخیل، با میزان آلودگی هوا، غلظت آلاینده‌های کربن مونوکسید، ذرات PM_{10} و اوزون را برای یک بازه زمانی خاص پیش‌بینی کند.

در این پایان‌نامه با دو روش رگرسیون خطی (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) مدل‌سازی و پیش‌بینی آلودگی هوا صورت گرفت و این دو روش باهم مقایسه شد و درصد تأثیر هریک از آلاینده‌ها در آلودگی بررسی گردید. از پارامترهای هواشناسی و غلظت آلاینده‌های هوای یک ایستگاه سنجش آلودگی هوا در شهر مشهد به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده شده است.

فصل دوم

مبانی نظری و مطالعات پیشین

۱-۲- مقدمه

پیش‌بینی آلودگی هوا در نواحی شهری به دلیل تأثیر آن بر روی سلامتی انسان، یکی از موضوعات مهم در تحقیقات محیط‌زیست است. آلاینده‌های باغلظت بالا، تأثیرات سوء و مرگ زودرس گروه‌های حساس و آسیب‌پذیر جامعه از جمله افراد مسن و کسانی که به تنگی نفس دچار هستند را به دنبال دارد.

اهمیت آلودگی هوا را می‌توان از افزایش خطر ابتلا به بسیاری از بیماری‌ها مانند بیماری‌های تنفسی و قلبی درک کرد. اما با انتشار گزارش جدید سازمان بهداشت جهانی^۱ در اکتبر ۲۰۱۳، توجه همگان به این بحران زیست‌محیطی بیش‌ازپیش معطوف گردید. در این گزارش سرطان‌زا بودن آلودگی هوا اثبات و اعلام گردید. در کنار این حقیقت تلخ باید اشاره کرد که در ایران سالانه حدود ۵۰۰۰۰ نفر بر اثر سرطان جان خود را از دست می‌دهند که بر اساس پیش‌بینی سازمان بهداشت جهانی این میزان تا سال ۱۳۹۹ به حدود ۱۱۰۰۰۰ نفر افزایش می‌یابد. جمع‌بندی این گزارش‌ها، اهمیت این خطر زیست‌محیطی را بیشتر کرده و محققان را به چاره‌اندیشی وامی‌دارد.

آلودگی هوا ساختار پیچیده‌ای دارد، با این وجود تلاش‌هایی برای پیش‌بینی آن صورت گرفته است. برای پیش‌بینی و مدل‌سازی آلاینده‌های هوا معمولاً دو روش در نظر گرفته می‌شود که شامل روش‌های قطعی یا روش‌هایی که بر اساس "فرایند"، پدیده‌ای را شبیه‌سازی می‌کنند و روش‌های تجربی - آماری است. در روش‌های قطعی از مدل‌های اتم‌سفری استفاده می‌شود که در آنان تلاش می‌کنند تا با استفاده از روابط فیزیکی و شیمیایی حاکم بر تولید و انتشار آلاینده‌ها مدلی برای شبیه‌سازی به دست آورند. این روش نیازی به حجم زیاد داده‌های اندازه‌گیری شده و واقعی ندارد، در عوض نیاز دارد تا اطلاع دقیق و کاملی از منابع تولیدی آلاینده‌ها، نحوه انتشار آنان و فرایندهای

^۱ World Health Organization

فیزیکی و شیمیایی حاکم بر آنان، وجود داشته باشد. این دانش به طور کامل وجود ندارد و نیاز به در نظر گرفتن تقریب‌ها و ساده‌سازی‌هایی در مدل‌سازی است که منجر به بروز خطا می‌گردد.

در روش دوم که مدل‌های آماری هم از آن دسته است، به حجم زیادی از داده‌ها نیاز است تا مدل بتواند از بین این داده‌ها به درکی صحیح از روابط بین آن‌ها برسد. یکی از انواع این گونه مدل‌های آماری، مدل‌های رگرسیونی هستند که از آن‌ها در مدل‌سازی آلودگی هوا استفاده شده است. یکی از معضلات عملکردی مدل‌های رگرسیونی، ضعف در همانندسازی سیستم‌ها با ساختار غیرخطی است. از آنجاکه رابطه میان آلاینده‌های هوا و پدیده‌های هواشناسی بسیار پیچیده و غیرخطی هستند، مدل‌های رگرسیونی خطی توانایی بالایی برای این گونه مدل‌سازی ندارند. برخلاف مدل‌های رگرسیون خطی، روش‌های رگرسیون غیرخطی توانایی بالایی در پیش‌بینی و مدل‌سازی ساختارهای پیچیده دارند که از آن جمله می‌توان به شبکه‌های عصبی اشاره کرد که اخیراً استفاده‌های زیادی از آن در بخش‌های مختلف زیست‌محیطی به خصوص برای مدل‌سازی‌های اتمسفری و آلودگی هوا شده است.

[۸].

شبکه عصبی مصنوعی از ساختار بیولوژیکی عصب انسان الهام گرفته و توانایی بهتری در برخورد با سیستم‌های پیچیده‌تر یا ساختارهای غیرخطی دارد. شبکه‌های عصبی، سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی جدیدی برای یادگیری ماشینی جهت پیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. امروزه دامنه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بسیار وسیع شده است. این شبکه‌ها برای تخمین و تقریب، کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند. از این روش نوین محاسباتی می‌توان در بسیاری علوم استفاده کرد. این روش بر جمع‌آوری سابقه تاریخی از داده‌های منطقه‌ای برای تشکیل پایگاه داده‌ای، استوار است و نیاز به حجم مناسبی از داده‌های ورودی واقعی دارد [۹]. با این توضیح و با توجه به اهمیت آلودگی هوا، هم‌چنین با توجه به پیچیدگی نحوه انتشار آلاینده‌ها و گستردگی منابع تولیدی و در شهرهای بزرگ که منجر به سخت‌تر شدن پیش‌بینی آن می‌گردد، شبکه‌های عصبی می‌توانند برای این مطالعه رویکرد مناسبی باشند.

در این تحقیق برای درک بهتر موضوع در بخش اول تحلیلی از آلودگی هوا، منابع آن و تاثیرات مختلفی که بر انسان و محیط می‌گذارد، صورت گرفته است. سپس به معرفی مدل رگرسیون و شبکه عصبی به عنوان دو روش و ابزار پیش‌بینی آلودگی هوا پرداخته شده و به دنبال آن در بخش سوم به صورت مبسوط روش انجام پژوهش بیان شده است. در بخش بعدی نتایج پژوهش بیان شده و مقایسه‌ی بین این نتایج بررسی شده است. در آخر نتایج تحقیق مورد تحلیل قرار گرفته و پیشنهادهای لازم برای بهبود پژوهش در این زمینه آورده شده است.

۲-۲- ساختار اتمسفر زمین

اتم‌سفر پوششی است که حیات را بر روی سیاره زمین می‌پروراند و آن را در برابر محیط پرخطر فضای کیهانی حفظ کرده است. اتم‌سفر در حفظ تعادل حرارتی زمین نقش اساسی دارد زیرا تابش‌های مادون قرمز تابیده شده از خورشید و نیز انرژی خاصی را که از زمین به شکل تابش‌های مادون قرمز بازتاب می‌شوند، را جذب می‌نماید و بدین ترتیب عمل تعدیل حرارتی مهمی را انجام می‌دهد و از پیدایش گرما و سرمای شدید که در سطح سیارات فاقد اتم‌سفر اتفاق می‌افتد، جلوگیری می‌کند. در بیان عملکرد ضروری اتم‌سفر همین بس که بسیاری از تابش‌های کیهانی رسیده از فضا را جذب و موجودات زنده را در مقابل تاثیر مخرب این تابش‌ها حفاظت می‌کند. اتم‌سفر، بسیاری از تابش‌های خورشیدی را مانند تابش‌های ماوراءبنفش که جذب آن اثرات زیان باری بر حیات جانداران روی زمین دارد را جذب می‌کند.

شناخت اتم‌سفر و ترکیبات آن‌ها دارای اهمیت قابل توجهی در درک معضل آلودگی هوا و کنترل این پدیده است. اتم‌سفر تا حدود ۲۰۰۰ کیلومتر در بالای زمین امتداد می‌یابد. خصوصیات اتم‌سفر، با تغییر ارتفاع، تغییر می‌کند و با صعود در آن غلظت آن‌ها کمتر می‌شود. سایر عوامل موثر در این تغییرات عبارت از فصل، زمان و حتی فعالیت‌های خورشیدی هستند. دمای اتم‌سفر ممکن است از مقادیر بسیار کم مانند ۱۳۸- درجه سانتی‌گراد تا بیش از ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد متفاوت باشد. فشار اتم‌سفری از یک اتم‌سفر در سطح دریا به ۰/۰۰۱ اتم‌سفر در یک صد کیلومتر بالاتر از سطح دریا کاهش

می‌یابد. به دلیل همین تغییرات، کیفیت شیمیایی اتمسفر با تغییر ارتفاع تغییرات عمده‌ای نشان می‌دهد. ساختار اتمسفر را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرارداد. یکی از معیارهایی که بر اساس آن لایه‌های جو طبقه‌بندی می‌شوند دمای هواست. لایه‌بندی حرارتی^۱ از نظر تغییرات هوا و اثرات مستقیم گرما بسیار دارای اهمیت است. لایه‌بندی دیگر نیز در ارتباط با یونیزاسیون یا وجود ذرات باردار اتمی در جو انجام می‌گیرد که به نوبه خود مهم تلقی می‌شود. اما آنچه به عنوان مبنا پذیرفته شده همان لایه‌بندی حرارتی است [۱۰].

اتمسفر از لایه‌های مختلفی تشکیل شده است که از پایین به بالا به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. بیوسفر یا تروپوسفر: پایین‌ترین و نزدیک‌ترین لایه اتمسفر به سطح زمین است. این لایه قسمت اعظم هوا را دارا است. تروپوسفر ۹۰٪ از مولکول‌های اتمسفر را شامل می‌شود و در عرض‌های متوسط جغرافیایی دارای ضخامت حدود ۱۲ کیلومتر است. ضخامت این لایه در قطب حداقل بوده و در استوا به بالاترین مقدار خود می‌رسد. در قطبین به حدود ۵-۶ کیلومتر و در استوا به حدود ۱۸ کیلومتر می‌رسد. خصوصیت عمده آن کاهش دما با افزایش ارتفاع است.

این کاهش دما به دلیل دور شدن از زمین که منعکس‌کننده حرارت خورشیدی است، روی می‌دهد. به‌طور متوسط به ازای هر صد متر افزایش ارتفاع در شرایط خشک یک درجه سانتی‌گراد و در شرایط مرطوب با ۰/۶ سانتی‌گراد، کاهش دما روبرو می‌شویم. مجموعه پدیده‌های جوی که هوا نامیده می‌شوند در این لایه قابل بررسی هستند. مرز بین این لایه و لایه بعد را تروپوپاز^۲ می‌گویند. تروپوسفر تنها لایه است که موجودات زنده به راحتی می‌توانند در آن حیات داشته باشند.

جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی هوا در تروپوسفر را در وضعیت طبیعی نشان می‌دهد. غلظت گازهای ارائه شده در جدول نسبتاً ثابت بوده و یا به‌کندی تغییر می‌کند. باین حال موادی نظیر بخار آب (بیش از ۱۰٪ حجمی)، گرد و غبارها، گرده گیاهان، باکتری‌ها، کلرید سدیم، دی‌اکسید نیتروژن ناشی

^۱ Thermal stratification

^۲ Tropopause

از تخلیه الکتریکی، ازون ناشی از تخلیه الکتریکی، دی اکسید گوگرد و سایر گازها و ذرات حاصل از فعالیت‌های آتش‌فشانی و یا انسانی نیز در این لایه وجود دارد و غلظت آن متغیر است.

جدول ۱-۲: ترکیبات طبیعی هوا [۱۳]

نوع گاز	درصد حجمی در هوای خشک
نیتروژن	۷۸/۰۹
اکسیژن	۲۰/۹۸
آرگون	۰/۹۳
دی اکسید کربن	۰/۰۳۱۸
نئون	۰/۰۰۱۸
هلیوم	۰/۰۰۰۵۲
متان	۰/۰۰۰۱۵
کریپتون	۰/۰۰۰۱
اکسید نیتروژن	۰/۰۰۰۰۲۵
هیدروژن	۰/۰۰۰۰۵
گزنون	۰/۰۰۰۰۰۸

۲. استراتوسفر: این لایه تا حدود ۵۰ کیلومتری از سطح زمین ادامه می‌یابد. در این لایه به ازای صعود کردن درجه حرارت افزایش می‌یابد. علت این افزایش حضور ازون است، ازون انرژی را به صورت نور ماوراء بنفش جذب می‌کند و باعث افزایش دما می‌شود. اهمیت این لایه جوی، به واسطه وجود ازون در این لایه است که قادر به جذب بسیار زیاد اشعه ماوراء بنفش خورشید است. قسمت اعظم لایه ازون

در این لایه قرار گرفته است.

۳. مزوسفر: این لایه تا ارتفاع حدود ۸۰ کیلومتری از سطح زمین ادامه دارد. قسمت پایینی آن به دلیل قرار گرفتن آن در مجاورت استراتوسفر گرم‌تر است و تحت تاثیر دمای آن قرار می‌گیرد. با افزایش ارتفاع درجه حرارت آن کاهش می‌یابد که به علت بروز کاهش در مقدار ترکیبات جذب تشعشع، به‌خصوص ازون است. مرز این لایه با لایه بعدی مزوپاز^۱ نامیده می‌شود.

۴. ترموسفر یا یونوسفر: این لایه از حدود ۸۰ کیلومتری سطح زمین شروع و تا ارتفاع متوسط بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ کیلومتری برحسب عرض جغرافیایی مختلف ادامه دارد با افزایش ارتفاع درجه حرارت آن نیز افزایش می‌یابد که علت آن جذب تابش‌های پرنرژی با طول‌موج کمتر از ۲۰۰ نانومتر توسط گونه‌های شیمیایی موجود در این لایه است. لایه بالای ترموسفر را مگنتوسفر یا پروتوسفر نیز می‌نامند، زیرا حوزه مغناطیسی زمین در این قسمت بر قوه جاذبه زمین غالب بوده و بیشترین کنترل را روی رفتار ذرات موجود یعنی پروتون‌ها دارد.

۵. اگزوسفر: آخرین لایه اتمسفر است که از ارتفاع ۵۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتری شروع و تا خلاء مطلق ادامه پیدا می‌کند. در این لایه مولکول‌های گازی شکل در اثر دریافت تشعشعات خورشیدی برانگیخته هستند و به همین دلیل به آن اگزوسفر می‌گویند. [۱۳].

۲-۳- آلودگی محیط زیست

آلودگی محیط زیست عبارت از پخش شدن یا ترکیب مواد خارجی با آب، هوا، خاک یا زمین به میزانی که کیفیت فیزیکی شیمیایی یا بیولوژیک آن را تغییر دهد. به‌طوری‌که برای انسان یا سایر موجودات زنده و یا گیاهان و آثار و ابنیه زیان‌آور باشد.

^۱ Mesopause

۲-۳-۱- آلودگی هوا^۱

در مراجع مختلف تعاریف گوناگونی برای آلودگی هوا ارائه شده است. انجمن مشترک مهندسين آلودگی هوا و کنترل آن، آلودگی هوا را به صورت زیر تعریف نموده است.

آلودگی هوا عبارت از وجود یک یا چند آلاینده در هوای آزاد مانند گازها، بخارات، گرد و غبار، بو، دود غلیظ و میست با مشخصات، کمیت و زمان ماند کافی که برای زندگی انسان، حیوان و گیاه خطرناک و برای اموال مضر باشد و یا به طور غیرقابل قبول مانع استفاده راحت از زندگی و اموال گردد.

بر اساس آیین نامه جلوگیری از آلودگی هوای ایران، آلودگی هوا عبارت است از وجود یک یا چند ماده آلوده کننده در هوای آزاد به مدت زمان و اندازه ای که کیفیت آن را به طوری که مضر به حال انسان، حیوان، گیاه یا آثار وابسته قبلش باشد تغییر می دهد.

اداره استاندارد هندوستان آلودگی هوا را چنین تعریف می کند: آلودگی هوا عبارت از ورود مواد ناشی از فعالیت های انسانی با غلظت و زمان ماند کافی که سلامت و رفاه افراد تحت تاثیر آن قرار گرفته و مانع استفاده راحت از اموال می گردد.

۲-۳-۲- آلاینده

از نظر سلامت عمومی و بوم شناختی عبارت از هر ماده فیزیکی، شیمیایی و زیستی است که مقدار اضافی قابل تشخیص آن برای موجودات زنده زیان آور و یا به هر صورت نامطلوب باشد. زمانی یک کنش به عنوان آلوده کننده تلقی می شود که از آستانه تحمل تجاوز نماید. تعیین آستانه تحمل خود امری مشکل است زیرا با توجه به این که آستانه تحمل در مورد گیاهان، جانوران، و یا انسان در نظر گرفته شده باشد، شدت کنش و مدت زمان تحمل آن بسیار متفاوت است.

۲-۳-۱- آلاینده های هوا

آلوده کننده های مختلفی که ممکن است از منابع طبیعی و یا مصنوعی وارد اتمسفر گردند را با

^۱ Air Pollution

اصطلاحات زیر تعریف می‌نمایند:

آئروسول‌ها: اصطلاحات ذرات معلق آئروسول و ذرات پراکنده اغلب به‌جای یکدیگر به کار می‌روند. ذرات معلق در هوا به آن دسته از مواد پراکنده جامد یا مایع اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها از قطر یک مولکول (میلی‌متر $0/0002$) بزرگ‌تر و از ۵۰۰ میلی‌متر کوچک‌تر باشند. این مواد به‌عنوان شاخه‌ای از مواد آلاینده دارای تنوع و پیچیدگی زیادی هستند و اندازه ذرات و ترکیب شیمیایی آن‌ها مانند غلظتشان در هوا از ویژگی مهم این مواد به شمار می‌رود. آئروسول‌ها با توجه به منشأ و حالت فیزیکی نام‌های مختلف دارند که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر تعریف می‌شوند.

غبار^۱: ذرات جامد معلق که در جریان فعالیت‌های نظیر سایش و پودر کردن مواد به وجود آمده باشند گرد (غبار) اطلاق می‌شود. این ذرات بزرگ‌تر از کلئوئید هستند و ممکن است به‌طور موقت در هوا با محیط گازی دیگر به حالت تعلیق درآیند. ذرات گردوغبار تمایل به چسبندگی ندارند، مگر اینکه تحت تاثیر نیروی الکتریسیته ساکن قرار گیرند.

فیوم^۲: به ذرات جامدی که از فرآیند سرد کردن و تراکم بخارات حاصل شوند فیوم اطلاق می‌شود. که اغلب با اکسیداسیون همراهاند، فیوم‌ها به یکدیگر جذب می‌شوند و یا به هم می‌پیوندند. این اصطلاح به‌طور عامیانه برای اشاره به انواع آلوده‌کننده‌ها به کار می‌رود.

قطره^۳: ذرات کوچک مایع که دارای اندازه و وزن مخصوص‌اند و در شرایط سکون رسوب می‌کنند، ولی در شرایط متلاطم به حالت تعلیق درمی‌آیند.

مه^۴: به ذرات مایع (قابل رویت) در فضا، مه می‌گویند.

میست^۵: اصطلاح میست به ذرات بزرگ مایع با پراکندگی و با غلظت کم گفته می‌شود در

^۱ Dust

^۲ Fume

^۳ Droplet

^۴ Fug

^۵ Mist

هواشناسی پراکندگی رقیق قطره‌های آب با تراکم کم و اندازه کافی برای نشست را میست می‌گویند.

ذره^۱: جزء کوچک جدا شده از توده یک ماده جامد ذره نامیده می‌شود.

مه دود^۲: مه دود کلمه‌ای مرکب که از دو بخش مه و دود تشکیل شده است. این واژه برای ذرات معلق استفاده می‌شود. ولی امروز به‌طور معمول از آن برای بیان آلودگی هوا استفاده می‌شود.

خاکستر فرار^۳: به ذرات بسیار کوچک خاکستر که در اثر احتراق مواد سوختنی وارد جریان گاز دودکش می‌شوند، اطلاق می‌شود.

دوده^۴: به اجتماع ذرات کربن اشباع شده که با مواد قیری آمیخته‌اند و اصولاً در اثر احتراق ناقص مواد کربن دار به وجود می‌آیند، اطلاق می‌شود.

آبروسل بیولوژیکی^۵: ذرات جامد یا مایعی‌اند که از موجودات زنده بیولوژیکی (ویروس‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، و غیره) تشکیل شده‌اند. اندازه‌ی آبروسل‌ها کوچک‌تر از یک میکرون تا ۱۰۰ میکرون متغیر است.

برای ایجاد ذهنیت از ذرات ریزی که معمولاً در محیط زندگی و صنعتی وجود دارند لازم است نمونه‌ای از چند گروه از هواویزها ذکر شود.

• اسماگ: $20 < \text{قطر ذره} < 0.001$ میکرومتر

• مه: $70 < \text{قطر ذره} < 2$ میکرومتر

• میست: $200 < \text{قطر ذره} < 70$ میکرومتر

• باران: $800 < \text{قطر ذره}$ میکرومتر

^۱ Particle

^۲ Smog

^۳ Fly ash

^۴ Soot

^۵ Bio aerosol

اگرچه ذرات معلق شکل ندارند ولی اندازه آن‌ها را می‌توان از طریق قطر آثرو دینامیکی (معادل سرعت ذرات مورد نظر سقوط می‌کند) محاسبه کرد. اکثر ذرات معلق دارای قطر معادل بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون هستند. ذرات ریزتر از این حد دارای حرکات ارتعاشی تصادفی خاصی (حرکت براونی^۱) هستند که معمولاً تا اندازه‌ای بزرگ‌تر از ۰/۱ میکرون رشد می‌کنند. ذرات بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون ته‌نشین می‌شوند [۱۵].

۲-۲-۳-۲- طبقه‌بندی آلاینده‌های هوا

آلاینده‌های هوا را می‌توان به طرق مختلف و با توجه به منبع آلاینده، منشأ آلاینده، ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی طبقه‌بندی کرد.

تقسیم‌بندی آلوده‌کننده‌های هوا بر اساس منابع تولید:

الف- منابع طبیعی

انتشار آلاینده‌ها از این بخش با توجه به فرایندها و مکانیسم‌های مختلف در طبیعت یک پدیده دائمی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار کمی انتشار آلاینده‌های طبیعی بسیار بیشتر از منابع مصنوعی و ساخت دست بشر است. آلاینده‌های منتشر از منابع طبیعی شامل موارد زیر است:

طوفان و گردوغبار: اغلب طوفان‌ها مقادیر فراوان مواد معلق را به فضا می‌فرستند، این ذرات علاوه بر آلوده کردن فضا، ابزار خوبی برای انتقال انواع میکروب‌ها هستند.

کوه‌های آتش‌فشان: هنگام فعالیت مواد متنوعی از جمله اسید کلریدریک، اسید فلوئیدریک، اسید سولفیدریک و متان توسط کوه‌های آتش‌فشان وارد فضا می‌گردد که می‌توانند در ایجاد باران اسیدی نقش بسزایی داشته باشد. همچنین ممکن است باعث بروز بیماری در حیوانات شود که می‌تواند باعث فلج شدن حیوانات گردد که در اثر وجود فلوئور در مواد خروجی آتش‌فشان اتفاق می‌افتد.

دود و خاکستر آتش‌سوزی‌های جنگلی: به هنگام آتش‌سوزی در جنگل که به دلایل مختلفی

^۱ Brownian motion

از جمله غفلت انسان‌ها، نگهبانان جنگل، صاعقه و غیره ممکن است رخ دهد، آلاینده‌هایی از قبیل ذرات، مونوکسید کربن، دود، هیدروکربورها، اکسیدهای ازت، خاکستر و غیره به هوا منتشر می‌شوند.

شهاب‌های آسمانی: شهاب‌های آسمانی گاز و مواد مختلفی از خود در فضا باقی می‌گذارند که طبق تخمین سالانه بالغ بر ۲۰۰ تن برآورده گردیده است.

منابع گیاهی حیوانی: منابع گیاهی و حیوانی مانند کود گل، ذرات بیولوژیک (مانند باکتری‌ها، ویروس‌ها) و گازهای ناشی از فساد و تخمیر مواد، چنانچه در فضای اطراف منتشر گردند در آلوده نمودن هوا مؤثرند.

چشمه‌های آب گرم معدنی: با ایجاد گازهای سولفورسید سبب آلودگی هوا می‌شوند.

(ب) منابع مصنوعی:

- وسایل نقلیه موتوری
- صنایع نیروگاه‌ها
- سیستم‌های گرم‌کننده منبع خانگی و تجاری
- زباله سوزها

تقسیم‌بندی آلوده‌کننده‌های هوا بر اساس منشأ، ترکیب و حالت ماده

الف) بر اساس منشأ تولید: (Sources of Production)

آلاینده‌ها بر اساس منشأ تولید به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

آلوده‌کننده‌های اولیه: (Primary Pollutants) شامل عواملی هستند که مستقیماً به اتمسفر وارد شده و به شکلی که انتشار یافته‌اند در اتمسفر وجود خواهند داشت. مانند NO_x ، HC ، CO ، SO_x و غیره.

آلوده‌کننده‌های ثانویه: (Secondary Pollutants) شامل موادی است که در اثر واکنش‌های

فتوشیمیایی تولید می‌شوند مانند PAN, Fog, Smog.

ب) بر اساس ترکیب شیمیایی: (Chemical Composition)

معدنی (Inorganic): مانند مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، کربنات‌ها، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای ازت، هیدروژن فلوراید، هیدروژن کلراید.

آلی (Organic): مانند هیدروکربن‌ها، آلدئیدها، ستون‌ها، کربوکسیلیک اسیدها، الکل‌ها، اترها، استرها، آمین‌ها و ترکیبات آلی سولفور.

ج) بر اساس حالت ماده: (State of Matter)

ذرات: (Particles) ذرات جامد و مایع (آئروسول) مانند غبار، فیوم، دود، خاکستر فرار، میست، اسپری و غیره.

گازها: مانند اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای ازت، هیدروکربن‌ها، اکسیدان‌ها

۲-۳-۲-۳- تقسیم‌بندی آلوده‌کننده‌های هوا بر اساس منبع انتشار

منابع انتشار آلاینده‌های هوا به دو گروه کلی ثابت و متحرک تقسیم می‌گردند. منابع ثابت همان‌طور که از اسم آن برمی‌آید شامل صنایع، نیروگاه‌ها و مراکز تجاری و مسکونی هستند. در مقابل، منابع متحرک انواع وسایل نقلیه از موتورسیکلت تا هواپیما و کشتی را شامل می‌گردند.

به‌طور کلی دلیل عمده آلودگی هوا مصرف و احتراق سوخت‌های فسیلی است که در منابع ساکن یا متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی عواملی مانند نوع سوخت، نوع فرایندها و تجهیزات به کار گرفته‌شده در هر منبع نیز می‌تواند بر میزان و شدت تولید آلاینده‌های هوا تأثیرگذار باشد. در برخی از صنایع، علاوه بر آلاینده‌های ناشی از مصرف سوخت و مواد خام، قسمتی از تولیدات حد واسط و نهایی هم به هوا وارد می‌شوند. به‌عنوان مثال در صنعت تولید آلومینیوم، فلوراید و ذرات هیدروکربن‌های چندهسته‌ای آروماتیک، در صنایع فلزی سرب و در تا سیسات زباله سوز، فلزات سنگین و ترکیبات خطرناکی از قبیل دی‌اکسیدها تولید و در هوا منتشر می‌شوند. با شناخت و بررسی فرآیند و نیز

اندازه‌گیری‌های لازم، می‌توان انواع آلاینده‌ها، غلظت آن‌ها و ضرایب انتشار مربوط به هریک را تعیین نمود [۱۷].

۲-۴- آلاینده‌های شاخص آلودگی هوا

در ادامه به معرفی برخی آلاینده‌های شاخص پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱- مونوکسید کربن

مونوکسید کربن گازی بی‌رنگ و بی‌بو با وزن مولکولی ۲۸ گرم بر مول، نقطه ذوب ۲۰۷- درجه سانتی‌گراد و نقطه جوش ۱۹۲- درجه سانتی‌گراد است. موتورهای بنزینی، وسایل حرارتی، محفظه‌ها و کوره‌های گازسوز، نفت‌سوز، و یا زغال‌سوز، آتش‌سوزی جنگل‌ها، سوزاندن زباله‌های شهری مهم‌ترین منابع تولیدکننده این گاز به شمار می‌آیند. اتومبیل به‌تنهایی تولیدکننده بزرگ‌ترین منبع آلودگی (۶۵٪) است.

به‌طورمعمول غلظت مونوکسید کربن در هوا معادل ۰/۰۱ تا ۰/۲ قسمت در میلیون است. غلظت این گاز در مناطق شهری معمولاً کمتر از ۱۷ ppm است، اما در محیط‌های بسته و کارگاه‌ها غلظت آن غالباً از ۱۰۰ ppm هم تجاوز می‌نماید [۱۰].

احتراق ناقص سوخت‌های کربن‌دار تحت شرایط نامناسب منجر به تولید مونوکسید کربن به‌جای دی‌اکسید کربن (CO_2) می‌گردد و این حالت در اثر عدم‌کفایت چهار متغیر ضروری احتراق به وجود می‌آید که عبارت‌اند از: ۱. اکسیژن کافی، ۲. درجه حرارت کم شعله، ۳. زمان ماندن گازهای تولیدشده در درجه حرارت‌های بالا، ۴. به هم آمیختگی هوا و سوخت در اتاقک احتراق. متان منبع بیش از ۷۷ درصد مونوکسید طبیعی اتمسفر است که در نتیجه تجزیه مواد آلی دفن شده در باتلاق‌ها، کشتزارهای برنج و مناطق گرمسیری جهان حاصل می‌شود. اقیانوس‌ها دومین منبع تولید مونوکسید کربن طبیعی اتمسفر محسوب می‌شود. به‌طوری‌که گیاهان پست دریایی و سایر منابع بیولوژیکی سهم قابل‌ملاحظه‌ای در تولید مونوکسید کربن موجود در آب‌ها را دارند، سپس این گاز در اتمسفر آزاد

می شود. گاز CO با میل شدید ترکیب با اکسیژن علاوه بر حذف و یا کم کردن مقدار اکسیژن در هوا در دستگاه تنفس نیز به دلیل میل ترکیب شدید باهموگلوبین موجب نارسایی اکسیژن به خون شده و به این دلیل موجب بروز مسمومیت و انواع ناراحتی ها می شود. مطالعات نشان می دهد که بیش از ۷۰ درصد مونوکسید کربن منتشرشده در هوا در جریان عملیات حمل و نقل و حرکت خودروها تولید می شود. بر این اساس تغییرات ساعتی غلظت مونوکسید کربن در هوای شهر تعیین کننده الگوی ترافیکی شهر است. غلظت روزانه CO بستگی کامل به میزان ترافیک دارد و بالاترین میزان تراکم CO در محل هایی دیده می شود که بار سنگین ترافیک دارند. تمایل هموگلوبین برای جذب CO بیشتر از اکسیژن است به طوری که هموگلوبین خون ما با مونوکسید کربن ۲۵۰ بار سریع تر از اکسیژن ترکیب می شود. بنابراین حتی در غلظت های پایین مونوکسید کربن، مقدار اکسیژن منتقل شده به بدن به مقدار بسیار زیادی کاهش می یابد. این گاز با مقادیر بالاتر از استاندارد، زندگی افراد پرخطر بیماران قلبی ریوی، افراد مسن، کودکان و زنان باردار را به خطر می اندازد و در افراد سالم نیز باعث ایجاد سردرد، سرگیجه، خستگی زیاد و تحریک اعصاب می شود هم چنین در میزان های هشدار و خطر نیز باعث مرگ سریع افراد می گردد. وقتی یک زن باردار در معرض مونوکسید کربن قرار می گیرد، غلظت کربوکسی هموگلوبین در خون جنین وی بالاتر از خون مادر خواهد بود. با این تفاوت که این افزایش در میزان کربوکسی هموگلوبین خون جنین نسبت به مادر با تأخیر صورت می گیرد. افزایش میزان کربوکسی هموگلوبین خون جنین باعث ایجاد عوارضی مانند؛ وزن کم هنگام تولد، به دنیا آمدن زودتر از موعد، مرگ داخل رحمی جنین، تأخیر رشد جنینی، سندرم مرگ ناگهانی کودک، تأخیر در تشکیل سیستم عصبی، ناهنجاری های جنینی از قبیل؛ لب شکری، کام شکری و ناهنجاری های قلبی و عروقی و عوارض درازمدت شامل؛ اختلالات در یادگیری، حافظه و رفتار می گردد. جدول (۲-۲) اثر مونوکسید کربن را روی انسان با توجه به غلظت و زمان به طور خلاصه نشان می دهد.

جدول ۲-۲: اثرات مونوکسید کربن بر بدن انسان [۱۸]

غلظت بر حسب ppm	زمان	اثرات
۵	۲۰ دقیقه	مرکز اعصاب واکنش نشان می‌دهد
۳۰	۸ ساعت	تیزی بینی و تیزهوشی شخص صدمه می‌بیند
۱۰۰	۲ تا ۴ ساعت	سردرد خفیف
۲۰۰	۲ تا ۴ ساعت	فشار در پیشانی
۵۰۰	۲ تا ۴ ساعت	سردرد شدید، ضعف و تهوع
۱۰۰۰	۲ تا ۴ ساعت	تیرگی صورت با امکان بیهوشی ضربان شدید قلب
۲۰۰۰	۱ تا ۲ ساعت	مرگ

۲-۴-۲- ذرات معلق

در مبحث ذیل خصوصیات و انواع ذرات معلق ارائه شده و اثرات و تبعات این آلاینده‌ها بیان می‌گردد.

۲-۴-۲-۱- ذرات معلق در هوا

ذرات به صورت مایع و جامد به قطر کمی بیش از $2/00000$ میکرون تا ۵۰۰ میکرون از آلاینده‌های بسیار مهم هوا به شمار می‌روند. زمان تعلیق این ذرات در هوا ممکن است از چند ثانیه تا چندین ماه به طول انجامد. از لحاظ فیزیکی ذرات خواص گوناگون و از لحاظ شیمیایی، خواص بسیار متفاوتی دارند. گرد و غباری که از زمین توسط باد در هوا منتشر می‌شود و همچنین خاکسترهای آتش‌فشانی،

ترشحات نمکی، ویروس‌ها، باکتری‌ها، هاگ‌ها و گروه نباتات را می‌توان از جمله منابع طبیعی آلودگی هوا دانست. این مواد قبل از ظهور انسان در اتمسفر زمین وجود داشته، ولی فعالیت‌های بشر در بعضی موارد باعث ازدیاد غلظت آن در هوا گردیده است. ذرات آلاینده‌ای که محصول اجتماع بشر هستند به‌طور معمول به چهار طریق ایجاد و وارد هوا می‌گردند:

سوزاندن یا حرارت دادن: دود که از آشکارترین ذرات آلوده‌کننده به شمار می‌رود از سوختن ناقص مواد به وجود آمده و مخلوطی از کربن و مواد قابل احتراق دیگر را دربر می‌گیرد. بخاری که هنگام ذوب فلزات متصاعد می‌گردد، دوباره در هوای سرد متراکم شده و ذراتی مانند فلز یا اکسیدها را به‌وجود می‌آورد.

واکنش‌های شیمیایی: در نتیجه به‌کارگیری بسیاری از روش‌های شیمی صنعتی از قبیل تهیه اسیدسولفوریک و یا تصفیه نفت خام ذراتی در هوا منتشر می‌شود.

گردوغبار: بخش مهمی از ذرات کدر کننده هوا را تشکیل می‌دهد که غالباً در اثر عملیات ساختمانی بوجود می‌آیند [۱۴].

۲-۴-۲-۲- اثرات ذرات معلق

اثرات ذرات معلق بر روی گیاهان

گرد و غبار هنگامی که با نم باران و یا رطوبت ترکیب شود، تشکیل یک لایه ضخیمی را در طبقات فوقانی سطوح برگ‌ها می‌دهد که به‌سادگی پاک نمی‌شود و تنها نیروی خارجی لازم است تا آن را جابجا کند. گردوغبار موجود در این لایه ضخیم از ورود نور لازم جهت فتوسنتز گیاه جلوگیری کرده و عمل تبادل CO_2 با اتمسفر را دچار اختلال می‌کند رشد چنین گیاهانی محدود می‌شود. اثری که ذرات معلق به‌طور غیرمستقیم بر روی گیاهان و جانوران دارد، خورده شدن گیاه آلوده به ذرات معلق توسط جانوران و وارد شدن لایه ضخیم آلوده بر روی سطح گیاه که عمده‌تاً حاوی ترکیبات شیمیایی مضر است به بدن جانور است.

اثرات ذرات معلق بر روی انسان

از نظر آلوده‌کننده‌های هواگرد و غبار بعد از مونوکسید کربن در ردیف دوم قرار دارد. توانایی سیستم دفاعی دستگاه تنفس انسان در برابر ذرات معلق بستگی بسیار زیادی به اندازه ذرات دارد. ورود ذرات معلق آلوده‌کننده به بدن انسان منحصراً از راه مجاری تنفسی است و اثرات آن‌ها فوراً کار این قسمت را مختل می‌کند. دامنه نفوذ ذرات معلق به دستگاه تنفسی مربوط به اندازه و بزرگی آن‌هاست. هر انسان در شبانه‌روز به‌طور متوسط ۲۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ بار تنفس می‌نماید و در هر تنفس به‌طور متوسط ۵۰۰۰۰ ذره گرد و غبار (در شبانه‌روز حدود یک میلیارد ذره) به درون ریه‌های او وارد می‌شود. با توجه به این نکته که این ذرات محمل‌هایی برای ویروس‌ها و باکتری‌ها هستند، می‌توان تصور نمود که تنفس هوای معمولی هم ممکن است زیان‌آور باشد. ذرات معلق آلاینده که در اثر فعالیت‌های خودروها (فرسایش لاستیک، لنت موتور و دیسک و کلاچ) به وجود می‌آیند قطری کمتر از ۱۰ میکرون داشته و در هنگام دم وارد دستگاه تنفس انسان شده و در بروز آلرژی، سرطان ریه و تشدید بیماری‌های ریوی نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند.

ذرات بزرگ‌تر در ناحیه فوقانی تنفسی ته‌نشین می‌شوند. ذرات قابل استنشاق به داخل ریه نفوذ می‌نمایند. برخی ذرات ممکن است وارد جریان خون شوند.

تأثیرات تنفسی ذرات عبارت‌اند از: تحریک و سوزش راه هوایی، سرفه، خلط عملکرد کاهش‌یافته ریه، التهاب راه هوایی و حملات آسمی، برونشیت و برونشیت مزمن.

آلودگی ذره‌ای روی قلب تأثیر می‌گذارد: آلودگی ذره‌ای مرتبط با تغییراتی است که نشان می‌دهد قلب به‌صورت سالمی که باید باشد نیست. این تغییرات عبارت‌اند از:

- آریتمی و تغییرات در ضربان قلب
- تغییرات در انعطاف ضربان قلب
- تغییرات در محتوا و مقدار خون (پروتئین واکنشی) و فیبرینوژن (ویسکوزیته پلاسما).

برخی مطالعات نشان می‌دهند که قرار گرفتن در برابر مواد ذره‌ای آلوده ممکن است باعث حملات قلبی شود و ذرات مرتبط با مرگ ناشی از بیماری قلبی هستند.

اثرات ذرات معلق بر روی مقدار کل اشعه خورشیدی:

آلودگی توسط ذرات معلق تقریباً مقدار تابش نور خورشید را به سطح زمین کاهش می‌دهد. مواد آلوده‌کننده بعضی از پرتوهای فرعی ساطع شده از خورشید را جذب و برخی را به فضا برمی‌گردانند و نتیجه این امر عبارت است از:

۱. کاهش بینایی بر اثر کاهش نور مرئی در دسترس

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.

علیرغم افزایش CO₂ اتمسفر در طی چند دهه گذشته که می‌بایست موجب افزایش دمای زمین شود. ملاحظه می‌گردد که دمای متوسط زمین از دهه ۱۹۴۰ به‌طور نامحسوس کاهش یافته است. افزایش انعکاس اشعه خورشیدی توسط ذرات معلق بیش از آن حدی است که توسط اثر آب‌وهوایی CO₂ اتمسفر جبران شود.

طبق بررسی‌های صورت گرفته در چند دهه اخیر، افزایش آلودگی هوای کلان‌شهرها و مناطق صنعتی، موجب افزایش بیش از حد غلظت هواویزها در جو و کاهش مقدار بارش در ابرهای همرفتی به دلیل ایجاد جزیره گرمایی و فرایند فراباور سازی ابر شده است. هواویزهای آلاینده هوا که وارد ابرهای کوهساری می‌شوند؛ باعث کاهش سرعت هم‌آمیزی ابرها و برفک زنی در بارش‌های یخی می‌شوند. غلظت زیاد هواویزهای محیطی می‌توانند بین ۱۵ تا ۲۵ درصد مقدار بارش سالانه در این مناطق را کاهش دهد [۱۹].

۲-۴-۳- اکسیدکننده‌های فتوشیمیایی

اکسید کننده های فتوشیمیایی نتیجه واکنش بین دی اکسید ازت و نور خورشید است. متداول ترین این گروه ازون است. ازون یکی از فراوان ترین اکسیدکننده های فتوشیمیایی است که به این دلیل اهمیت دارد که استانداردهای کیفیت هوا بر اساس آن تنظیم شده اند. ازون گازی است بی رنگ با اندکی مزه شیرین؛ علاوه بر ازون تعدادی از اکسیدکننده های فتوشیمیایی دیگر نیز در مه دود فتوشیمیایی دیده می شود که به ^۱PANs (پروکسیل استیل نیترات) موسوم هستند.



زمانی که اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن های نسوخته و نور خورشید در کنار هم و یکجا جمع می شوند، مواد اولیه برای تشکیل و تولید آلاینده های ثانویه از جمله ازون فراهم شده است. همچنین ازون در سطح زمین در اثر تخلیه الکتریکی (مانند جوشکاری و رعدوبرق صاعقه) تولید می شود. ازون از اشکال دیگر اکسیژن است که در آن، به جای حالت عادی دواتمی، سه اتم با یکدیگر قرار می گیرند. این ترکیبی نسبتاً ناپایدار را به وجود می آورد و اتم سوم خود را به آسانی از دست می دهد و لذا چیزهای مختلف را آسان تر از اکسیژن معمولی اکسید می کند. ازون به لحاظ شیمیایی بسیار فعال بوده و عمر متوسط آن در هوا کوتاه است. یک ترکیب سه اتمی اکسیژن است که در آن سه اتم در یک نظم ناپایدار قرار می گیرند و یک اکسیدکننده قوی است و با بسیاری از مواد مختلف در هوا ترکیب می شوند در لایه های پایین هوا و در ارتفاع تنفسی ما ازون یک آلاینده است که بر اثر واکنش های فتوشیمیایی در شرایط وجود نور آفتاب، اکسیدهای ازت، هیدروکربن ها و اکسیژن دواتمی به وجود می آید.

گاز ازون با فرمول شیمیایی O_3 یکی از گازهای جزئی تشکیل دهنده جو است، ازون به صورت

^۱ Acyl peroxy nitrates

ناهمگن در جو پراکنده شده است و ۱۰٪ از آن در تروپو سفر و ۹۰٪ دیگر در استراتو سفر واقع شده است. ازون تروپوسفری (ازون سطحی) و ازون استراتوسفری (لایه ازون)، دو نقش متفاوت را در جو از خود بروز می‌دهند به‌طوری‌که ازون موجود در استراتوسفر با جذب تابش‌های خطرناک خورشید (تابش ماورای بنفش) از رسیدن این پرتوهای مرگبار به سطح زمین جلوگیری می‌کند و این مأموریت لایه ازون آن قدر حیاتی است که بعد از اکسیژن و آب لازمه حیات کره زمین شناخته شده است. ازون سطحی به‌واسطه اینکه با زیست‌کره در تماس مستقیم است اثرات ناخوشایند بسیاری برای انسان، گیاهان، اجسام و ترکیبات نفتی از جمله آسفالت به وجود آورده است. بعلاوه این گاز یکی از عوامل تبدیل آلاینده‌های اولیه به آلاینده‌های ثانویه بوده و همچنین به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای موجب افزایش دمای سطح زمین می‌شوند [۱۵].

اثرات ازون بر روی انسان

- ازون راه‌های تنفسی را تحریک می‌نماید و آزرده می‌سازد.
- ازون به‌طور کامل در لایه سطحی واکنش می‌دهد و مولکول‌های اکسیژن واکنش‌پذیری را تشکیل می‌دهد.
- ورود و هجوم به سلول‌های سفید خون.
- آسیب به سلول‌هایی که راه‌های هوایی را می‌پوشانند.
- تاثیر ۲۴ ساعت بعد از قرار گرفتن در معرض آن بیشتر است.
- نگرانی درمورد قرار گرفتن مجدد در برابر آن.

علائم و نشانه‌ها:

- سرفه
- سینه خراش‌دار و دردناک

- درد با نفس کشیدن عمیق

- خستگی

۲-۴-۴- اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان

۲-۴-۴-۱- دستگاه تنفس

دستگاه تنفس را می‌توان اولین قربانی اثرات آلاینده‌های هوا دانست. زیرا برخلاف پوست، پوشش مخاط شش‌ها به‌خصوص در ناحیه کیسه‌های هوایی که کار تبادل گازها را انجام می‌دهند، بسیار نازک می‌باشند و در نتیجه مقاومت زیادی در مقابل آلاینده‌های هوا ندارد. شواهد محکم و مستدلی وجود دارد که آلودگی هوا ابتدا به سرطان ریه را افزایش می‌دهد. طبق نتایج تحقیقات انجام شده، مرگومیر ناشی از سرطان ریه در بین سیگاری‌های مناطق شهری بین ۲۶ تا ۱۲۳ درصد بیش از سیگاری‌های مناطق روستایی است. این اختلاف برای غیر سیگاری‌ها از این ارقام هم بیش‌تر است. گرچه در شهرها عوامل متعددی در ایجاد سرطان ریه دخالت دارند، ولی قطعاً آلودگی هوا در این امر اثر بسزایی دارد. زیرا یک فرد نرمال در روز کمتر از چهار کیلوگرم آب و غذا مصرف می‌کند، ولی بیش از بیست کیلوگرم هوا جهت تامین اکسیژن موردنیاز خود تنفس می‌نماید. علاوه بر تاثیر آلودگی هوا در ایجاد سرطان ریه، نتایج مطالعات مختلفی وجود ارتباط بین سرطان معده و آلودگی هوا را نشان داده است. برونشیت و سایر عفونت‌های دستگاه تنفسی نیز از جمله بیماری‌هایی هستند که توسط هوای آلوده، تشدید شده یا به وجود می‌آیند. آلاینده‌های اسیدی و اکسیدکننده‌های قوی همانند دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و اوزون می‌توانند با تخریب مخاط دستگاه تنفسی سیستم دفاعی آن عوامل افزایش عفونت‌ها را فراهم سازند [۲۰].

۲-۴-۴-۲- دستگاه گردش خون

بخشی از آلاینده‌های هوا که در ریه جذب می‌شوند، ممکن است وارد خون شده و در بدن منتشر گردند و در اندام‌ها و بافته‌ای بدن موجب بروز اثرات سوء شوند.

مونوکسید کربن یکی از آلاینده‌های هوا است که اثر عمده خود را روی خون می‌گذارد. این گاز که فاقد هرگونه اثر ظاهری مشخص مانند: بو، مزه و رنگ است، از احتراق ناقص سوخت‌ها حاصل می‌شود و یکی از آلاینده‌های شایع در هوای شهرها است. میل ترکیبی این گاز باهموگلوبین خون ۲۰۰ مرتبه بیش‌تر از اکسیژن است و پس از تنفس به‌سرعت باهموگلوبین خون ترکیب نسبتاً پایداری به نام کربوکسی هموگلوبین را تشکیل می‌دهد و در نتیجه پتانسیل خون را در انتقال اکسیژن به اندام‌ها کاهش می‌دهد. کمبود اکسیژن در اندام‌های حساس و اثر گذار مانند مغز سبب اختلالات عصبی و مغزی شده که این خود عوارض متعددی را به بار می‌آورد.

۲-۴-۳- دستگاه عصبی

دستگاه عصبی از مراکزی است که به وسیله طیف گسترده‌ای از عوامل آلاینده محیط تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به علت درصد بالای چربی در بافت عصبی اغلب مواد شیمیایی آلی پس از ورود به بدن، در این بافت تجمع یافته و اثرات خود را در آنجا ظاهر می‌سازند. هیدروکربن‌های آلی نظیر ترکیبات نفتی، بخارات روغن‌ها، گاز طبیعی و حلال‌های آلی پس از ورود به بدن، بر روی سیستم عصبی، اثرات رخوت آور و بی‌حس‌کننده بر جای می‌گذارند. غلظت‌های بسیار بالای ذرات سرب که البته اغلب در تماس با محیط‌های صنعتی شدید بروز می‌کند، می‌تواند فلج شدن سیستم عصبی و اعضای بدن و همچنین کاهش یادگیری در کودکان را باعث گردد. امروزه مطالعات زیادی به اثرات سرب بر کاهش قدرت یادگیری و هوش کودکان معطوف گشته است و تقریباً همه این مطالعات تماس کودکان با هوای آلوده خیابان‌ها را یکی از عوامل کاهش قدرت یادگیری و هوش کودکان ذکر کرده‌اند.

۲-۴-۴- حساسیت‌زایی

ترکیبات شیمیایی، ذرات، گازها و بخارات موجود در هوا بسیار متنوع و از نظر غلظت متغیر می‌باشند به‌طوری‌که هر مکانی برحسب منبع آلوده‌کننده موجود، آلودگی هوای خاص خود را دارد. همین تنوع در آلاینده‌های هوا موجب شده است تا افراد مختلف، واکنش‌های فیزیولوژی خاصی را نسبت به آن‌ها نشان دهند. تعداد زیادی از حساسیت‌ها مانند تحریکات سیستم تنفسی و حملات

آسمی، آبریزش بینی و التهابات پوست و مخاط در افراد ساکن شهرها به هنگام خارج شدن آنها از مناطق آلوده، به طور خودبه خودی بهبودی حاصل کرده و یا بالعکس هنگام ورودشان به شهرهای آلوده، این گونه عوارض آلرژیک بروز می کنند.

۲-۵- حوادث مهم و فاجعه آمیز آلودگی هوا

طی چند دهه گذشته در جهان حوادث متعددی در نتیجه ازدیاد ناگهانی آلودگی هوا در مناطق مختلف اتفاق افتاده که باعث مرگ هزاران نفر شده است. نمونه ای از این رخدادها در جدول (۲-۳) آمده است.

جدول ۲-۳: حوادث مهم آلودگی هوا

موقعیت	زمان	تعداد مرگ و میر
دره میوز	۱۹۳۰/۱۲/۰۱	۶۳
دونورا	۱۹۴۸/۱۰/۲۶	۱۷
لندن	۱۹۴۸/۱۱/۲۶	۷۰۰-۸۰۰
پوزاریکا (مکزیکو)	۱۹۵۰/۱۱/۲۱	۲۲
لندن	۱۹۵۲/۱۲/۰۵	۳۵۰۰-۴۰۰۰
نیویورک	۱۹۵۳/۱۱/۲۲	۱۷۵-۲۶۰
لندن	۱۹۵۶/۱۱/۱۲	۱۰۰۰
لندن	۱۹۵۷/۱۲/۰۲	۷۰۰-۸۰۰
لندن	۱۹۵۹/۰۱/۲۶	۲۰۰-۲۵۰
لندن	۱۹۶۲/۱۲/۰۵	۷۰۰
لندن	۱۹۶۳/۰۱/۰۷	۷۰۰
نیویورک	۱۹۶۳/۰۱/۰۹	۲۰۰-۴۰۰
نیویورک	۱۹۶۳/۱۱/۲۳	۱۷۰

۲-۶- اثرات آلودگی هوا

در ادامه به معرفی برخی اثرات زیان بار آلودگی هوا بر جانداران، آثار تاریخی و آثار جهانی آن پرداخته می‌شود.

۲-۶-۱- اثرات مخرب آلودگی هوا بر سایر جانداران

اکثر جانوران و خصوصاً پستانداران به علت شباهت فیزیولوژیکی با انسان، بعضی از اثرات آلودگی هوا را مشابه آنچه در مورد انسان ذکر شد، نشان می‌دهند. البته بر اساس مطالعات چنین به نظر می‌رسد که مقاومت آن‌ها نسبت به انسان در مقابل برخی آلاینده‌های هوا بیشتر است. تاثیر آلودگی هوا بر روی گیاهان شاید از ملموس‌ترین اثرات آن باشد. در موارد متعدد مشاهده شده است که آلودگی هوا، پوشش گیاهی منطقه‌ای را به کلی نابود کرده است. در ایالات متحده مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته و به خوبی نشان داده شده است که آلودگی هوا کاهش میزان محصولات، از بین رفتن برخی گونه‌های گیاهی و تغییر پوشش گیاهی را سبب می‌گردد. نمونه‌های از این اثرات مخرب در جنگل‌های جنوب کالیفرنیا (در اثر مه دود فتوشیمیایی لس‌آنجلس) و در جنگل‌های داکتون تنسی (در اثر آلودگی‌های مختلف کارخانه‌ها ذوب فلزات) گزارش شده است. در کانادا نیز بخشی از جنگل‌های واقع در ایالت انتاریو به علت وجود آلاینده‌های دی‌اکسید گوگرد در اتمسفر و بارش باران‌های اسیدی از بین رفته‌اند. در بخش‌های از کشور آلمان نیز وسعت زیادی از جنگل‌ها قربانی باران‌های اسیدی شده‌اند [۱۷].

۲-۶-۲- اثرات آلودگی هوا بر آثار تاریخی

آلودگی هوا طیف وسیعی از اثرات مخرب را بر بناهای تاریخی بر جای می‌گذارد. آثار تاریخی نقاط مختلف دنیا و موزه‌ها از این گونه اثرات در امان نبوده‌اند. در نقاطی مثل شهر لندن در انگلستان که این اثرات را به خوبی مطالعه کرده‌اند، محاسبه شده است که میزان این گونه خسارات در ۷۰ سال

اخیر، که عمدتاً از آلودگی هوا بوده است، معادل کلیه خساراتی است که در طی هزاران سال گذشته به آثار تاریخی این شهر وارد آمده است. مهم‌ترین آلاینده هوا که عامل اصلی خوردگی به حساب می‌آید، دی‌اکسید گوگرد است. این گاز در اثر ترکیب با آب و رطوبت تبدیل به اسیدسولفوریک می‌شود و موجب خوردگی و تسریع در فساد فلزات و تخریب سنگ‌های آهکی و سایر اجزای بناهای تاریخی را فراهم می‌سازد؛ همچنین به علت خاصیت اکسیدکنندگی شدید، این ماده باعث خوردگی، تخریب و کم شدن دوام البسه، کاغذ، چرم و سایر مواد می‌گردد. علاوه بر دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن و ازون نیز در محو کردن رنگ‌ها و کاهش دوام فلزات، البسه و منسوجات تأثیر بسزایی دارند. از طرف دیگر ازون به عنوان فاسد کننده اصلی لاستیک مطرح است. ازون با حمله به باندهای دوگانه پلیمرهای هیدروکربنه موجود در لاستیک، باعث حذف آن و در نتیجه ترک خوردن و فساد لاستیک و کاهش عمر آن می‌شود. اگر همه این هزینه‌ها را (هزینه جایگزین کردن، نگهداری، تمیزکاری و مرمت) جمع نموده و هزینه‌های اضافی ناشی از کاهش رشد و محصول گیاهان و تغییرات حاصله در اکوسیستم‌های طبیعی به آن افزوده شود به ارقام بسیار هنگفتی خواهیم رسید. گرچه خسارت اصلی آلودگی هوا یعنی آسیب به سلامت انسان قابل قیمت‌گذاری نیست.

در سال ۱۹۷۱ انجمن کیفیت محیط‌زیست آمریکا با در نظر گرفتن هزینه‌های بهداشتی، جمع خسارات سالیانه ناشی از آلودگی هوا را معادل ۱۶/۱ میلیارد دلار برآورد نمود که ۶ میلیارد دلار آن را خسارت بهداشتی تشکیل می‌داد و بقیه شامل ۴/۹ میلیارد دلار ضرر به اشیاء و گیاهان و ۵/۹ میلیارد دلار زیان به کاهش ارزش دارایی‌ها می‌گردد. این در حالی است که بانک جهانی در جدیدترین گزارش خود خسارات سالیانه آلودگی هوا در ایران را ۱۴۴۲۰ میلیارد ریال معادل ۱/۶ درصد تولید ناخالص داخلی اعلام کرده است [۲۲].

۲-۶-۳- باران‌های اسیدی

یکی از آثار و نتایج آلودگی هوا باران اسیدی است که در اثر افزایش میزان دی‌اکسید گوگرد و

دی اکسید نیتروژن در هوا به وجود می آید. این دو ماده در جو با بخار آب واکنش شیمیایی ایجاد می کنند و به صورت اسیدسولفوریک و اسید نیتریک در می آیند. این ذرات اسیدی می توانند مسافت های طولانی را به وسیله باد طی کنند و سرانجام به صورت باران اسیدی بر سطح زمین فروریزند. چنین بارش هایی ممکن است به صورت برف یا باران یا مه باشد. باران های اسیدی باعث از بین رفتن بناها و آثار تاریخی (به خصوص ساختمان ها و مجسمه هایی که از سنگ مرمر یا آهک ساخته شده اند) می گردد. بارش باران های اسیدی برخاک سبب کاهش PH محیط خاک شده و از این طریق مستقیماً بر موجودات و میکروارگانیسم های خاکزی تأثیر می گذارد. از طرف دیگر به علت کاهش PH، عناصر غذایی و بسیاری از عناصر سنگین به صورت محلول در می آیند. حلالیت عناصر غذایی (از قبیل نیتروژن و فسفر) احتمال از دست دادن آن ها را از طریق روان آب ها افزایش داده که این امر کاهش حاصلخیزی خاک را به دنبال دارد. عناصر سنگین نیز به علت حل شدن، توانایی جذبشان توسط گیاهان زیاد شده و از این طریق می توانند سمیت گیاه و یا سایر موجودات را در طی زنجیره غذایی موجب گردند. مسئله آلودگی آب ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. امروزه بسیاری از سفره های آب سطحی و زیرزمینی به مقدار قابل توجهی از آلاینده ها خصوصاً فلزات سنگین آلوده شده اند که رفع آلودگی آن ها نیاز به هزینه های هنگفت و مدت زمان طولانی دارد. اسیدی شدن آب های جاری و یا سایر منابع آب های سطحی جمعیت آبریان را به شدت تحت تأثیر قرار داده و از تنوع و تراکم آن ها می کاهد. به علاوه اسیدی شدن منابع آب بر نوع کاربری های این منابع نیز تأثیرگذار است. به علاوه، کاهش PH در محیط های آبی نیز می تواند انحلال ترکیبات برخی فلزات را افزایش دهد. تجمع این فلزات در بدن آبریان نه تنها بر رشد آن ها تأثیر می گذارد بلکه می تواند موجب ایجاد مسمومیت در مصرف کنندگان این آبریان را فراهم سازد [۲۰].

۲-۶-۴- اثرات آلودگی هوا بر اقلیم جهانی

آلودگی هوا طی ۱۰۰ سال گذشته سبب بروز برخی مشکلات در کره زمین شده است. یکی از این

مشکلات گرمایش جهانی کره زمین در اثر افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، متان، اکسیدهای نیتروژن و کلروفلوروکربن‌ها در اتمسفر است. گازهای گلخانه‌ای در اثر جذب طول‌موج‌های بلند حرارتی سبب به دام افتادن حرارت در اتمسفر و در نتیجه افزایش دمای سطح زمین می‌شوند. افزایش دمای کره زمین می‌تواند ذوب شدن یخ‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها، و نیز تغییرات اقلیمی (از قبیل وقوع خشک‌سالی‌ها، سیل‌ها، بادهای گرم و توفان‌ها) را در پی داشته باشد.

از دیگر مشکلات ناشی از آلودگی هوا تخریب لایه اوزون است. لایه اوزون در استراتوسفر تابش‌های ماورا بنفش (UV) خورشیدی را جذب کرده و موجودات زنده را از خطرات این تشعشعات محفوظ می‌دارد. به دلیل انتشار برخی آلاینده‌ها مانند اسیدکلریدریک، اکسیدهای نیتروژن و کلروفلوروکربن‌ها، بخشی از اوزون موجود در استراتوسفر تخریب شده و در نتیجه میزان بیشتری از اشعه مضر UV به سطح زمین می‌رسد. این امر باعث ایجاد سرطان‌های پوستی، آسیب‌های بینایی و از بین رفتن گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی می‌شود.

مشکل دیگر آلودگی هوا در بعد جهانی، بارش باران‌های اسیدی است که اثرات مخرب آن بر روی اکوسیستم‌ها، انسان، آثار و ابنیه‌های تاریخی و سایر موجودات زنده در بخش‌های قبل مورد بحث قرار گرفت.

۷-۲- استانداردهای مربوط به آلودگی هوا

۷-۲-۱- شاخص آلودگی هوا

شرط اول حفاظت از محیط‌زیست و جلوگیری از آلودگی هوا و تخریب ناشی از فعالیت‌های انسان داشتن تعریفی مشخص و شفاف از آلودگی هوا و تعیین محدوده‌های مجاز برای ورود آلاینده‌ها به محیط و یا تعیین غلظت‌های مجاز آن‌ها در محیط است. بدیهی است که بسیاری از فعالیت‌های عمرانی و توسعه‌ای به‌طور اجتناب‌ناپذیری با آلودگی و تخریب محیط‌زیست همراه است و در عمده موارد نمی‌توان این آثار منفی را به‌طور کامل حذف کرد اما می‌توان با تعیین حدود مجاز برای آلودگی‌ها، این اثرات را به نحو چشمگیری کاهش داد. به همین جهت، به‌منظور کنترل آلودگی هوا،

استانداردهایی در کشورهای مختلف تدوین شده است. این استانداردها به دو گروه تقسیم می شوند. گروه اول استانداردهای کیفی هوا هستند که کیفیت هوا را از نظر تأثیر بر سلامت انسانها بیان می کنند. گروه دوم استانداردها مربوط به میزان مجاز خروج آلایندهها از منابع آلوده کننده هوا هستند. این استانداردها نشان می دهند که منابع آلودگی از قبیل کارخانهها، آگزوز خودروها و غیره تا چه حدی مجاز به انتشار آلایندهها در گازهای خروجی خود هستند.

برای بیان کیفیت نسبی هوا در هر زمان جهت اطلاع رسانی به عموم مردم، از شاخصی به نام شاخص کیفیت هوا استفاده می شود. شاخص گفته شده که بر اساس غلظت های موجود بعضی از آلایندهها در اتمسفر محاسبه می گردد، عددی بدون واحد را به دست می دهد که نشان دهنده وضعیت کیفی هوا را در لحظه اندازه گیری آلایندههاست. بر اساس این شاخص، وضعیت کیفی هوا در یکی از شش گروه کیفیتی ارائه شده در جدول (۲-۴) طبقه بندی می شود. حد مجاز این شاخص عدد ۱۰۰ است و روش محاسبه آن بر اساس درون یابی خطی یا غیرخطی است.

جدول ۲-۴: شاخص استاندارد آلاینده (AQI)^۱

Air Quality Index (AQI) Categories and Ranges								
Category	AQI	8-hr O ₃ (ppm)	1-hr O ₃ (ppm)	24-hr PM _{2.5} (µg/m ³)	24-hr PM ₁₀ (µg/m ³)	8-hr CO (ppm)	24-hr SO ₂ (ppm)	1-hr NO ₂ (ppm)
Good	0-50	0.000-0.064	—	0.0-15.4	0-54	0.0-4.4	0.000-0.034	—
Moderate	51-100	0.065-0.084	—	15.5-40.4	55-154	4.5-9.4	0.035-0.144	—
Unhealthy for Sensitive Groups	101-150	0.085-0.104	0.125-0.164	40.5-65.4	155-254	9.5-12.4	0.145-0.224	—
Unhealthy	151-200	0.105-0.124	0.165-0.204	65.5-150.4	255-354	12.5-15.4	0.225-0.304	—
Very Unhealthy	201-300	0.125-0.374	0.205-0.404	150.5-250.4	355-424	15.5-30.4	0.305-0.604	0.65-1.24
Hazardous	301-400	use 1-hr	0.405-0.504	250.5-350.4	425-504	30.5-40.4	0.605-0.804	1.25-1.64
	401-500	use 1-hr	0.505-0.604	350.5-500.4	505-604	40.5-50.4	0.805-1.004	1.65-2.04

به طور کلی اثرات آلودگی هوا بر افراد با توجه به نوع آلاینده و مدت زمان تماس آن با بدن، همچنین خصوصیات فرد مورد تماس از قبیل سن، جنسیت، وضعیت جسمی و ... متغیر است. با توجه به این موضوع و اهمیت تأثیر آلایندههای مختلف بر انسان، کشورهای مختلف، استانداردهای کیفی هوا را تدوین کرده اند. این استانداردها بر اساس نوع آلایندهها، غلظت آنها در محیط و مدت زمان تماس با

^۱ Air quality index

غلظت‌های مختلف تنظیم شده است. استانداردهای کیفی هوا شامل استانداردهای اولیه و ثانویه است. استانداردهای اولیه سطحی از غلظت آلاینده را در برمی‌گیرد که بر سلامت افراد جامعه تأثیرگذار است و از این جهت بسیار سخت‌گیرانه بوده و اساس سیاست‌گذاری‌های کنترلی را تشکیل می‌دهد. استانداردهای ثانویه انعطاف‌پذیر است و در تدوین آن‌ها بر زیبایی‌شناختی محیط و حفاظت از ساختمان‌ها، مزارع و حیوانات توجه شده است. در جدول (۵-۲) و (۶-۲) نمونه‌هایی از استانداردهای کیفی هوا در کشورهای مختلف ارایه شده است.

جدول ۵-۲: استانداردهای کیفی هوای آمریکا [21]

غلظت	میانگین زمان سنجش	اولیه/ثانویه	نوع آلاینده
۹Ppm	۸ ساعته	اولیه	مونوکسید کربن
۳۵Ppm	۱ ساعته		
۳۱۵µg/m ³	۳ ساعته	اولیه	سرب
۱۰۰Ppb	۱ ساعته	اولیه ثانویه	دی‌اکسید نیتروژن
۵۳Ppb	سالانه	اولیه ثانویه	
۰/۰۷۵Ppm	۸ ساعته	اولیه/ثانویه	ازون
۱۵µg/m ³	سالانه	اولیه/ثانویه	ذرات معلق (PM _{2.5})
۳۵µg/m ³	۲۴ ساعته		
۱۵۰µg/m ³	۲۴ ساعته	اولیه ثانویه	ذرات معلق (PM ₁₀)
۷۵Ppb	۱ ساعته	اولیه	دی‌اکسید گوگرد
۰/۵Ppm	۳ ساعته	ثانویه	

در ایران نیز کمیسیون امور زیربنایی، صنعت و محیط‌زیست بنا به پیشنهاد سازمان حفاظت محیط‌زیست استانداردهای هوای پاک (استانداردهای کیفی هوا) تا سال ۱۳۹۰ را به شرح جدول (۲-۶) تصویب نموده است. بر اساس آیین‌نامه اجرایی ماده ۶۲ قانون چهارم توسعه اقتصادی،

اجتماعی و فرهنگی بایستی توسط سازمان حفاظت محیط زیست، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور و وزارتخانه های نفت، صنایع و معادن، بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، راه و ترابری و کشور تهیه و به تصویب هیئت وزیران رسانده شود.

جدول ۲-۶: استانداردهای هوای پاک در ایران در سال های ۸۸-۹۰ [۲۲]

نوع آلاینده	۱۳۸۸		۱۳۸۹		۱۳۹۰
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
مونوکسید کربن					
	۱۰۰۰۰	۹	۱۰۰۰۰	۹	۱۰۰۰۰
	۴۰۰۰۰	۳۵	۴۰۰۰۰	۳۵	۴۰۰۰۰
دی اکسید گوگرد					
	۸۰	۰/۰۳	۵۰	۰/۰۱۹	۲۰
	۳۶۵	۰/۱۴	۲۵۰	۰/۰۹۴	۱۰۰
دی اکسید نیتروژن					
	۱۰۰	۰/۰۵	۶۰	۰/۰۳۱	۴۰
ذرات معلق (PM_{10})					
		-	۴۰	-	۲۰
	۱۵۰		۹۰		۵۰
ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$)					
		-	۱۲	-	۱۰
	۱۵۰		۳۰		۲۵
اوزون					
	-	-	۱۴۰	۰/۰۷۱	۱۰۰
	۱۶۰	۰/۰۸	-	-	-
سرب					
	-	-	۰/۵	-	۰/۵

۲-۸- تاریخچه مطالعات پیشین

با ملاحظه اثراتی که آلودگی هوا بر انسان و محیط زیست می گذارد، ضرورت توجه به پدیده آلودگی هوا و سیاست گذاری به منظور کاهش غلظت گازهای سمی در هوای کلان شهرها توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. رضایی و صیادی در سال ۱۳۹۲ بر اساس بررسی های صورت گرفته به این نتیجه رسیدند که ذرات معلق و کربن مونوکسید بیشترین سهم را به عنوان آلاینده های مسئول آلودگی هوا در شرایط غیراستاندارد بر عهده دارند و لذا اصلی ترین عوامل بروز بیماری های مختلف در انسان به شمار می روند [۴۹].

Yang, Z در سال ۲۰۱۷ هوای دو شهر بزرگ در چین را مورد بررسی قرار داد و همچنین غلظت آلاینده ها را در این دو شهر با استفاده از روش شبکه ی عصبی و CEEMD^۱ (تجزیه تجربی گروه مکمل) ، اندازه گیری و پیش بینی نمود. روش هیبرید یا ترکیبی برای شبکه ی عصبی کارآمد بود و نهایتاً نتیجه گرفت داشتن یک سیستم دقیق علمی برای اندازه گیری آلاینده ها و پیش بینی موثر آن تاثیر بسزایی در پایش آلودگی هوا در این شهرها می گذارد [۱].

Stefania در سال ۲۰۱۶ حذف آلاینده های فرار با استفاده از شبکه ی عصبی مصنوعی را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. در این تحقیق که مواد زائد فرار متانول و هیدروژن سولفید مورد بررسی قرار گرفتند، نتیجه گرفته شد مدل شبکه ی عصبی در ارزیابی عملکرد بیوراکتور برای تصفیه پساب کارآمد و نتیجه بخش بوده است [۲۳].

Postolache و همکارانش در سال ۲۰۰۱ با بهره گیری از شبکه های پرسپترون چندلایه و تابع شعاعی به پیش بینی غلظت CO پرداختند و نتایج به دست آمده نشانگر توانایی شبکه های عصبی در پیش بینی این آلاینده بوده است که در این مطالعه به نتایج کارآمدی در مورد نحوه ی انتخاب تعداد لایه های پنهان در شبکه دست یافتند [۲۴].

^۱ complete ensemble empirical mode decomposition

وکیلی و همکاران به بررسی تاثیر تشعشع آفتاب در آلودگی ذرات جامد معلق با استفاده از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرداختند و قابلیت استفاده از شبکه عصبی مصنوعی چندلایه برای پیش‌بینی کل تابش خورشیدی روزانه در تهران را بررسی کردند و همچنین اهمیت استفاده از پارامترهای ورودی متفاوت برای ایجاد یک مدل دقیق‌تر و قابل‌اعتماد را مورد تحلیل قرار دادند [۲۵].

ثقه‌الاسلامی و همکاران به مدل‌سازی و پیش‌بینی تشکیل ازون هوای شهرستان مشهد با استفاده از شبکه‌ی عصبی-فازی پرداختند که با استفاده از قوانین سیستم ANFIS به نتایجی با درصد خطای $1/8$ تا $2/4$ رسیدند و به این مسئله دست یافتند که الگوریتم پس انتشار نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های ترکیبی خواهند داشت. در نهایت طرح‌های ترافیکی کارآمد را با توجه به نحوه‌ی تولید و پخش آلاینده‌ی ازون در روزهای مختلف سال ارائه داده شد [۲۶].

عمده روش‌هایی که تاکنون در پژوهش‌ها درمورد پیش‌بینی آلودگی هوا صورت گرفته شامل روش‌های آماری، زمین‌آماري، شبکه عصبی مصنوعی و سری‌های زمانی است. فرایند برآورد ارزش‌های کمی، برای نقاط بدون داده به کمک نقاط مجاور و معلوم را درون‌یابی می‌گویند. این فرایند به دلیل محدودیت داده‌های نقطه‌ای و ضرورت تدوین نقشه از کل یک پهنه، به‌منظور تهیه نقشه‌های هم‌ارزش (هم‌باران، هم‌دما و غیره) صورت می‌گیرد [۲۸].

شوره دلی و همکاران (۱۳۸۷) در تحقیق خود به‌پیش‌بینی کوتاه‌مدت سری‌های زمانی آلودگی هوا با کمک شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، خط حافظه‌دار تاخیر و ANFIS با روش‌های ترکیبی آموزشی مبتنی بر PSO^1 پرداختند. در این تحقیق داده‌های آلودگی هوا به‌صورت سری‌های زمانی و در بازه نیم‌ساعته می‌باشند. آن‌ها برای پیش‌بینی داده‌ها، ابتدا به آنالیز پیش‌بینی پذیری داده‌ها پرداختند و با کمک شبکه‌های فوق‌الذکر اقدام به پیش‌بینی آلودگی هوا نمودند. و در نهایت این روش‌ها را باهم مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی ترکیبی بر اساس PSO و فیلتر کالمن برای

¹ particle swarm optimization

آموزش شبکه ANFIS توانایی مناسبی در بهبود عملکرد پیش‌بینی داراست [۳۰].

بوداق و چرخستانی در سال ۱۳۹۰ از این مدل جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوای تهران بهره بردند و با مقایسه این روش با رگرسیون خطی بر توانایی روش شبکه عصبی در پیش‌بینی میزان آلودگی هوای تهران تاکید کرده‌اند [۳۱].

فلاحتی و سهیلی در سال ۱۳۹۲ با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به بررسی عوامل موثر بر سلامت، طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۷، پرداخته‌اند. روش به‌کارگیری شبکه عصبی در مطالعه مذکور روش پرسپترون چندلایه است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد شهرنشینی، به‌عنوان عامل تشدیدکننده آلودگی هوا، بیشترین تاثیر را بر امید به زندگی و سلامت افراد داشته است [۳۲].

Gardner در سال ۱۹۹۸ در یک مقاله مروری، کاربرد ANN را در علوم هوایی مورد تجزیه و تحلیل قرارداد، که در آن کاربرد ANN به‌ویژه شبکه MLP در پیش‌بینی میزان غلظت آلودگی به‌خوبی شرح داده‌شده است [۵].

Niska و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در بلژیک از MLP با یک‌لایه مخفی بهره‌گیری کردند. میزان خطا با بهره‌گیری از الگوریتم پس انتشار خطا کمتر شد و برای اجرای آموزش متعادل، از داده‌های تایید و تست استفاده کردند در آن بررسی از داده‌های ده مرکز اندازه‌گیری آلودگی هوا، در سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۷ بهره‌گیری شد. برای ورودی شبکه از داده‌های آب و هواشناسی بهره‌گیری شد و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مدل‌های خطی مورد مقایسه قرار گرفت نتایج به دست آمد نشان داد که شبکه سه لایه پرسپترون، برای پیش‌بینی غلظت آلودگی‌های هوا مناسب است [۳۳].

Mok و Tam نیز در سال ۱۹۹۸، آلودگی هوا در شهر بزرگ ماکائو را با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در این بررسی آنان با به‌کارگیری شبکه سه لایه، دوره‌های زمانی آلودگی را در شهر ماکائو با بهره‌گیری از MLP مدل‌سازی کردند [۹].

در سال ۲۰۰۷ Nagendra و همکارانش با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی غلظت CO

در دهلی پرداختند که نتایج آن‌ها نشانگر آن بوده است که شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی کوتاه‌مدت آلودگی هوا کارایی بالایی دارد [۳۴].

رحیمی و صدر موسوی (۱۳۸۸) طی تحقیقی با عنوان پیش‌بینی غلظت ازون با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی MLP (پرسپترون چندلایه) در شرایط آب‌وهوایی شهر تبریز به این نتیجه رسیدند که شبکه‌های عصبی MLP می‌تواند بین پارامترهای آب و هوایی و داده‌های غلظت در محیط‌های شهری ارتباط برقرار کند و شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های خطی رگرسیون کارایی بیشتری در پیش‌بینی ازون دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی در مدل رگرسیون چندگانه ۰/۴۵ و در شبکه عصبی ۰/۹۱ به دست آمد. همچنین در این پژوهش دما با ۱۷/۵۳٪ بیشترین تاثیر را در مقایسه با دیگر پارامترهای اقلیمی در پیش‌بینی غلظت ازون داشت و از این نظر سرعت باد و رطوبت نسبی در رده‌های بعدی تأثیرگذاری قرار گرفتند [۳۵].

Prybutok و Yi برای پیش‌بینی میزان غلظت O_3 در یک ناحیه صنعتی در شمال آمریکا از شبکه عصبی MLP (پرسپترون چندلایه) استفاده کردند. در مدل آن‌ها ۹ متغیر ورودی برای پیش‌بینی ماکزیمم غلظت O_3 به‌صورت روزانه بکار رفته است. این متغیرها شامل غلظت O_3 در صبح، ماکزیمم درجه حرارت روز، CO_2 ، NO و NO_2 و سرعت و جهت باد بوده است. از نتایج این پژوهش توانایی قابل‌توجه MLP در مقایسه با روش‌های خطی بوده است. همان‌طور که گفته شد، در این تحقیق شبکه MLP را با داده‌های آب و هوایی و متغیرهای شیمیایی آموزش داده شده و با متد سری‌های زمانی غلظت O_3 را پیش‌بینی کردند [۳۶].

Chelani و همکاران (۲۰۰۲) مدل پیش‌بینی غلظت دی‌اکسید گوگرد در سه محل متفاوت از شهر دهلی را با شبکه عصبی سه لایه، با یک‌لایه پنهان، ارائه کردند. آن‌ها این کار را با استفاده از مدل رگرسیونی چند متغیره نیز عملی ساختند و نتایج به‌دست‌آمده از این دو مدل را برای پیش‌بینی غلظت دی‌اکسید گوگرد، باهم مقایسه کردند. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی آن‌ها نشان‌دهنده برتری مدل شبکه عصبی بود [۳۷].

Sahin و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی با استفاده از شبکه عصبی سه لایه و رگرسیون غیرخطی، مدلی برای غلظت دی‌اکسید گوگرد در شهر استانبول ترکیه ارائه کردند، نتایج این تحقیق نیز نشان‌دهنده برتری شبکه عصبی نسبت به رگرسیون غیرخطی بود [۳۸].

Kuhonen (۲۰۰۵) از شبکه SOM (شبکه خود سازمانده) برای مدل‌سازی NO₂ استفاده کرد و نتایج آن را با شبکه MLP مقایسه کرد. ایشان از داده‌های سال‌های ۱۹۹۳-۱۹۹۹ برای مدل‌سازی استفاده کردند و تعداد ۲۴ نرون در لایه مخفی MLP انتخاب گردید. همچنین از هر دو شبکه برای پیش‌بینی غلظت NO₂ برای سال ۱۹۹۸ استفاده کرد و از نتایج به‌دست‌آمده میانگین گرفت. نتایجی که از مقایسه، به دست آمد برتری شبکه MLP را نمایان ساخت [۳۹].

Corani برای پیش‌بینی غلظت میانگین روزانه ازون و PM₁₀ در میلان ایتالیا، مدل‌هایی با استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون خطی ایجاد کرد. نتایج این تحقیق نیز نشان‌دهنده برتری شبکه عصبی نسبت به رگرسیون غیرخطی بود. بر اساس نتایج شبکه عصبی ضریب همبستگی بین نتایج مدل و داده‌های حقیقی برای ازون و ذرات معلق به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۹ اعلام گردید. در استفاده از مدل‌های رگرسیونی عواملی مانند نرمال نبودن وابسته (متغیر هدف) و همبستگی زیاد متغیرهای مستقل (متغیرهای ورودی به مدل برای پیش‌بینی متغیر وابسته) باعث ناپایداری مدل گردید و صحت نتایج به‌دست‌آمده از این روش را زیر سوال برد [۴۰].

Gardner و در Ling در سال ۱۹۹۹ تلاش کردند مدل مناسبی برای پیش‌بینی ساعتی غلظت‌های نیتروژن دی‌اکسید (NO₂) و اکسیدهای نیتروژن (NO₃)، در بخش مرکزی لندن ارائه دهند. نتیجه مطالعه آنان منجر به ارزیابی توانایی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی شد. در این مطالعه از پارامترهای هواشناسی از جمله دید، فشار، دمای هوا و سرعت باد به‌عنوان پارامترهای ورودی استفاده شد. در این مطالعه، ۸ مدل رگرسیون خطی با ورودی‌های مختلف با ۸ مدل شبکه عصبی با ورودی‌های متناظر با مدل‌های رگرسیون خطی، مقایسه شده و نشان داده شد که با ورودی‌های یکسان، نتایج به‌دست‌آمده از شبکه‌های عصبی بهتر از مدل‌های رگرسیون خطی

متناظرشان است [۳۹].

Perez و همکاران در سال ۲۰۰۰، مدل شبکه عصبی چندلایه روبه جلو را به عنوان مدلی برای پیش بینی میانگین غلظت ۲۴ ساعته ذرات معلق کوچک تر از $2.5 \mu m$ (PM_{2.5}) از روز قبل ارائه کرده و در نهایت آن را با مدل رگرسیون خطی مقایسه کردند. محدوده خطا در مدل ارائه شده حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد بود که به منظور کم کردن خطا در این مطالعه، اثر کاهش نویز در داده ها، بازآرایی داده ها، افزایش مجموعه داده های آموزشی و گنجاندن متغیرهای هواشناسی (سرعت باد و رطوبت نسبی) به عنوان متغیرهای ورودی پیشنهاد گردید [۴۱].

نوع مدل چلانی و همکارانش در سال ۲۰۰۲، مدلی برای پیش بینی روزانه غلظت SO₂ در سه محل متفاوت از شهر دهلی با استفاده از شبکه عصبی سه لایه ارائه دادند. آن ها این کار را با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره نیز عملی ساخته و نتایج حاصل از این دو تکنیک را باهم مقایسه کردند. در نهایت شبکه عصبی در پیش بینی این آلاینده نسبت به مدل رگرسیون عملکرد بهتری از خود نشان داد.

Kukkonen و همکارانش در سال ۲۰۰۳ از شبکه های عصبی به منظور پیش بینی روزانه غلظت PM₁₀ و NO استفاده کردند. در این مطالعه، مقایسه ای میان ۵ مدل شبکه عصبی (استفاده از چندین نوع مدل MLP)، رگرسیون خطی و یک مدل قطعی صورت گرفت. داده های ورودی در این مطالعه شامل جریان ترافیک (حجم ترافیک و متوسط سرعت رانندگی)، غلظت های PM₁₀ و NO و داده های هواشناسی است. در نهایت شبکه های عصبی در پیش بینی این دو آلاینده نسبت به دو روش دیگر دارای عملکرد بهتری است [۴۲].

در مطالعه دیگری که توسط Grivas و Chaloulakou در سال ۲۰۰۶ صورت گرفت، مدلی بر اساس الگوریتم ژنتیک (GA) و شبکه عصبی MLP به منظور پیش بینی ساعتی غلظت PM₁₀ ارائه گردید. در این مطالعه، GA به منظور انتخاب متغیرهای ورودی به کار گرفته شد. داده های استفاده شده در این مطالعه شامل داده های ساعتی غلظت PM₁₀، داده های هواشناسی از قبیل دما، رطوبت

نسبی، سرعت و جهت باد می‌باشند. درنهایت به‌منظور ارزیابی مدل مقایسه‌ای بین مدل ارائه‌شده، MLP و رگرسیون خطی چندگانه صورت گرفت که نتایج نشان‌دهنده برتری مدل ارائه‌شده نسبت به سایر مدل‌ها است [۴۳].

Osowski و Siwek در سال ۲۰۱۲ به‌منظور بهبود صحت پیش‌بینی میانگین غلظت آلاینده PM_{10} برای روز بعد از تبدیل موجک در کنار گروهی از شبکه‌های عصبی استفاده کردند. شبکه‌های عصبی به کار گرفته‌شده در این مطالعه عبارت‌اند از Elman، RBF^1 ، MLP و SVM^2 همچنین متغیرهای ورودی استفاده شده در این مطالعه عبارت از: سرعت باد در دو جهت، دما، رطوبت، نوع روز، فصل سال و مقدار آلاینده PM_{10} در روز قبل از پیش‌بینی است. درنهایت هرکدام از این مدل‌ها با تبدیل موجک به‌منظور پیش‌بینی آلاینده مدنظر همراه می‌شوند و تعدادی نتایج پیش‌بینی حاصل می‌کنند، که در انتها نتایج پیش‌بینی حاصل از هر یک از مدل‌ها به‌عنوان ورودی به شبکه MLP یا رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) داده می‌شود [۴۴].

Sousa و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با استفاده از شبکه عصبی روبه‌جلو همراه با آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA^3) به پیش‌بینی ساعتی غلظت O_3 برای روز بعد پرداختند. متغیرهای ورودی استفاده شده در این مطالعه عبارت از: غلظت‌های ساعتی NO ، NO_2 و O_3 ، میانگین ساعتی دما، سرعت باد و رطوبت نسبی هستند. درنهایت مقایسه‌ای بین مدل توسعه‌یافته با مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی روبه‌جلو همراه با داده‌های اصلی صورت گرفت، که مدل ترکیبی در پیش‌بینی این آلاینده نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری از خود نشان داد [۴۵].

Feng و همکارانش در سال ۲۰۱۵، مدلی ترکیبی برای بهبود صحت پیش‌بینی میانگین روزانه غلظت $PM_{2.5}$ در دو روز جلوتر ارائه دادند. در این مدل از آنالیزی بر اساس مسیرهای توده‌های هوایی

¹ Radial Basis Function

² Support Vector Machine

³ Principal component analysis

و تبدیل موجک، برای بهبود صحت پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط مدل شبکه عصبی استفاده می‌شود. با استفاده از آنالیز مسیرهای توده‌های هوایی، جهت و مکان منابع آلاینده‌های هوا شناسایی شده و در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از این مدل متغیر جدیدی برای در نظر گرفتن به‌عنوان ورودی مدل شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تبدیل موجک، سری زمانی مربوط به غلظت $PM_{2.5}$ به چندین سری زمانی تجزیه می‌شود و در نهایت بر روی هر کدام از سری‌های زمانی با استفاده از شبکه عصبی MLP پیش‌بینی صورت می‌گیرد و در انتها نتایج حاصل از هر یک از سری‌های زمانی به‌منظور کسب نتیجه نهایی با یکدیگر ادغام می‌گردند [۴۶].

سعیدی و ذوقی (۱۳۸۷) برای پیش‌بینی روزانه غلظت دی‌اکسید گوگرد در یک ناحیه شهری تهران و محاسبه میزان تاثیر پارامترهای هواشناسی بر غلظت آلاینده‌ها از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. در این مطالعه با استفاده از خواص شبکه عصبی سعی شد که با کمترین خطا مقدار آلاینده SO_2 به‌صورت روزانه پیش‌بینی شود. پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده نسبت به مقادیر پایش شده دارای ضریب همبستگی بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۹ است. از بین داده‌هایی که به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شد (یعنی روزهای هفته، روزهای ماه، سال اندازه‌گیری پارامترهای آلودگی هوا، سرعت وزش باد، رطوبت نسبی هوا، درجه حرارت، مقدار غلظت آلاینده در روز قبل)، مقدار غلظت آلاینده در روز قبل و سال اندازه‌گیری پارامترهای آلودگی هوا بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی دارند.

تقوی (۱۳۹۱) در از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان بررسی توزیع زمانی غلظت آلاینده مونوکسید کربن هوای شهر مشهد به مدل‌سازی آلاینده مونوکسید کربن شهر مشهد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی MLP پرداخته و با روش رگرسیون خطی مقایسه نمود. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق آمار مربوط به غلظت منواکسید کربن و نیز مقادیر متغیرهای هواشناسی در مقیاس روزانه، شامل پوشش ابری برحسب هشتم، سرعت باد (m/s) میانگین دما ($^{\circ}C$)، بارندگی (mm)، درصد رطوبت، تشعشع برحسب m/kw و فشار برحسب mbar در سال ۱۳۸۹ بودند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی توانایی بیشتری را نسبت به روش رگرسیون خطی در پیش‌بینی غلظت مونوکسید کربن دارد.

به‌طوری‌که ضریب همبستگی و میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE) در شبکه عصبی به ترتیب با ۰/۶۱ و ۰/۰۶۹ و برای مدل رگرسیونی به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۱ به دست آمد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، مهم‌ترین عوامل هواشناسی موثر بر غلظت مونوکسید کربن در شهر مشهد به ترتیب سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی می‌باشند [۴۹].

فصل سوم

شرح مدل پیشنهادی

۱-۳- مقدمه

در این فصل به بیان خصوصیات منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. از بین آلاینده‌های شاخص هوا سه آلاینده که در شهر مشهد بیشتر از سایر آلاینده‌ها مشکل‌ساز هستند انتخاب شدند. از این رو مدل پیشنهادی به‌منظور پیش‌بینی میانگین روزانه غلظت آلاینده‌های CO، PM₁₀ و O₃ با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون پرداخته می‌شود. برای پیش‌بینی و مدل‌سازی آلودگی هوای مشهد و عوامل تأثیرگذار در ابتدا نیاز به شناخت خصوصیات شهر مشهد به لحاظ موقعیت جغرافیایی، وضعیت اقلیمی و جمعیت‌شناسی است. همچنین آمار و اطلاعات مربوط به پارامترهای هواشناسی، پارامترهای کیفی هوا و آلاینده‌های مورد نیاز است. این اطلاعات با مراجعه به مراکز مربوطه گردآوری شد. در ادامه این بخش به تفصیل به بحث پیرامون موارد فوق پرداخته می‌شود.

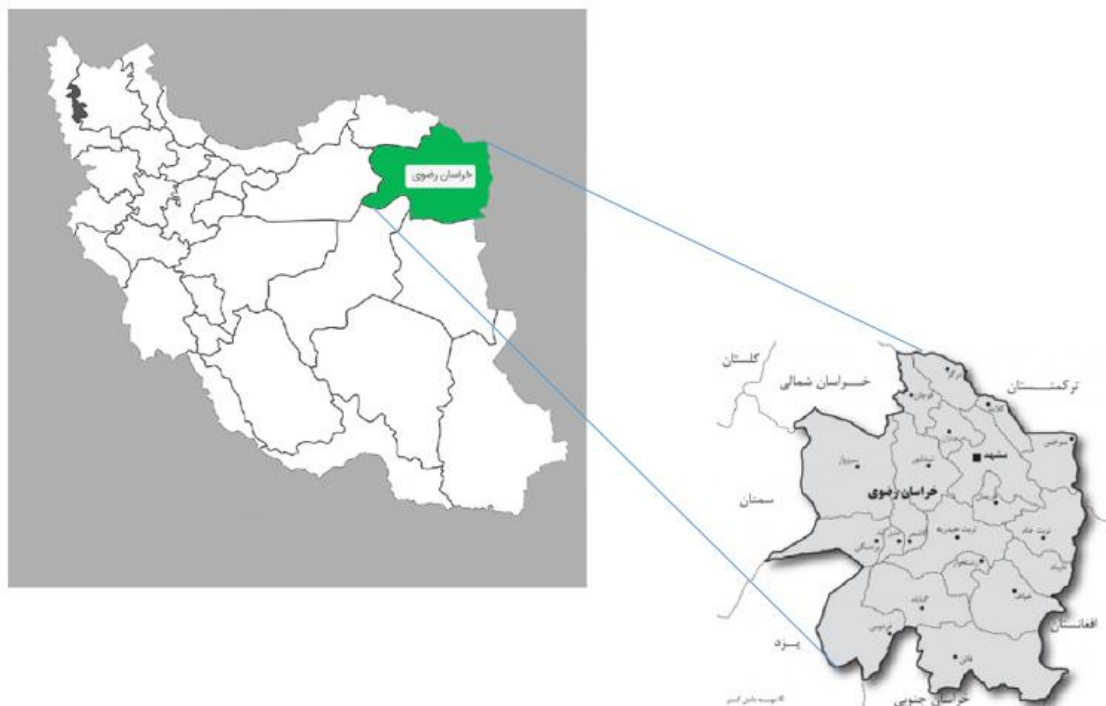
۳-۲- خصوصیات منطقه مورد مطالعه

در ادامه به بررسی خصوصیات مختلف شهر مشهد از جمله موقعیت جغرافیایی، اقلیم و جمعیت پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱- موقعیت جغرافیایی

مشهد شهری در شمال شرقی ایران و مرکز استان خراسان رضوی است. ارتفاع میانگین این شهر از سطح دریا ۹۸۰ متر و مساحت تقریبی آن ۲۰۴ کیلومترمربع گزارش شده است. شهرستان مشهد از نظر جغرافیایی در محدوده طول جغرافیایی ۵۹° ۱۵' تا ۶۰° ۳۶' و عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۳' تا ۳۷° ۸' و در ۹۴۵ کیلومتری شرق تهران واقع گردیده است. شهر مشهد قسمتی از دشت مشهد و حوضه آبریز کشف‌رود است که از شمال و جنوب در میان رشته‌کوه‌های هزار مسجد و بینالود محصور شده است. وجود بارگاه امام هاشم شیعیان، علی بن موسی الرضا (علیه‌السلام)، جایگاه و موقعیت ویژه‌ای به این شهر داده و آن را به‌صورت یک کلان‌شهر مذهبی درآورده است. در شکل (۱-۳) موقعیت

شهر مشهد در تقسیمات سیاسی استان خراسان رضوی و کشور نشان داده شده است.



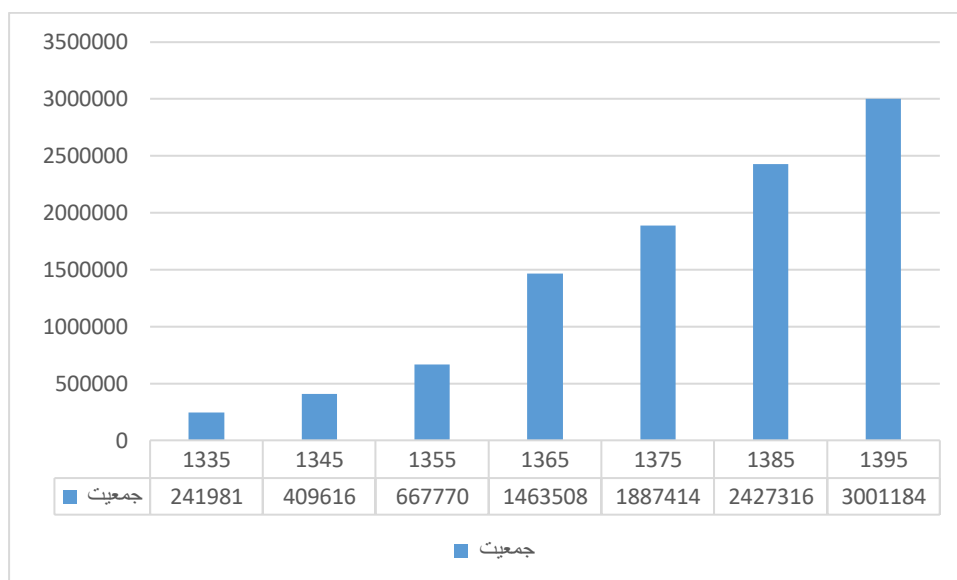
شکل ۳-۱: نمایی از موقعیت شهر مشهد در کشور و استان خراسان رضوی

۳-۲-۲- اقلیم

دشت مشهد میان دو رشته ارتفاعات هزار مسجد-کپه داغ در شمال و محور بینالود-شاه جهان در جنوب قرار دارد. این منطقه به لحاظ موقعیت جغرافیایی، در گذرگاه عبور هوای خزر به شمال شرق کشور قرار دارد. حضور ارتفاعات گوناگون و تنوع توپوگرافی و تغییرات ارتفاع در سطح منطقه از عوامل اصلی تنوع شرایط اقلیمی آن محسوب می‌گردد. اقلیم منطقه مشهد عمدتاً متأثر از ارتفاع البرز شرقی است که ضمناً در کنار اراضی پست کشف رود، بسیار متغیر شده است. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های اقلیمی این منطقه تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و مرطوب است. شهر مشهد تحت تأثیر جریان‌های مرطوب دریای مدیترانه از غرب و جریان‌های سرد از شمال شرقی نیز قرار می‌گیرد [۲۶].

۳-۲-۳- جمعیت

جمعیت شهر مشهد در اولین سرشماری رسمی در سال ۱۳۳۵ هجری شمسی، معادل ۲۴۱۹۸۹ نفر اعلام شد. اما به دلیل مهاجرت روستائیان به شهر، عدم اجرای سیاست‌های کنترل جمعیت و نیز موقعیت فرهنگی و جغرافیایی خاص، جمعیت آن به سرعت افزایش یافته است. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، مشهد با جمعیتی معادل ۳,۰۰۱,۱۸۴ نفر، دومین شهر پرجمعیت کشور محسوب می‌شود. در شکل (۲-۳) روند افزایش جمعیت شهر مشهد در نیم قرن اخیر نشان داده شده است که از آمارنامه مشهد در سال ۱۳۹۵ برداشت شده است.



شکل ۲-۳: روند تغییرات جمعیت شهر مشهد (آمارنامه مشهد، ۱۳۹۵)

وجود مرقد مطهر امام رضا (علیه السلام) و سایر جاذبه‌های و تاریخی گردشگری شهر مشهد باعث شده که هر ساله تعداد بسیار زیادی از هموطنان و همچنین زائرانی از کشورهای دیگر به این شهر وارد شوند. به گونه‌ای که این شهر در سال ۱۳۹۵ پذیرای نزدیک به ۲۸,۰۰۰,۰۰۰ نفر زائر و مسافر بوده است. بدیهی است این جمعیت انبوه ساکن و مسافر، نقش عمده‌ای در ایجاد آلودگی هوا در شهر مشهد دارد.

۳-۳- داده‌های هواشناسی

به‌طور کلی نقش پارامترهای اقلیمی بر میزان پراکنده شدن آلاینده‌های آلودگی هوا و اثرگذاری آن بر کیفیت هوای هر منطقه غیرقابل‌انکار است. تأثیر اقلیم بر کیفیت هوا از بعد آلودگی هوا می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. به‌عنوان مثال بسیاری از مواد آلاینده از جمله مواد معلق موجود در اتمسفر شهرها بر اثر بارش شسته شده و به سطح زمین می‌آیند که نتیجه آن هوای تمیز و صاف است. همچنین وزش بادهای در انتقال هوای آلوده از سطح شهرها و جایگزین ساختن آن با هوای صاف و بدون آلودگی نقش زیادی دارد. در مقابل، وارونگی حرارتی هوا باعث پایداری و ساکن شدن هوا می‌شود که در نتیجه آن مواد آلاینده ناشی از منابع ساکن و متحرک در قشر هوای مجاور سطح زمین محبوس شده و آلودگی را شدت می‌بخشد. این حالت به‌ویژه در فصل زمستان نمایان‌تر است، زیرا در این فصل وارونگی دمای بیشتری اتفاق می‌افتد. در روزهای گرم سال نیز، بر اثر تشعشع خورشیدی و وجود آلاینده‌های هیدروکربنی و اکسیدهای نیتروژن، شرایط برای تشکیل مه دود فتوشیمیایی و آلاینده‌های ثانویه حاصل از آن آماده می‌شود. لذا در بحث‌های مربوط به آلودگی هوا، بررسی آمار و داده‌های مربوط به پارامترهای اقلیمی اهمیت ویژه‌ای دارد و به همین جهت در این تحقیق نیز این آمار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از آنجا که منطقه سجاد در مرکزیت سایر مناطق و ایستگاه‌های ثبت آلودگی قرار دارد، آمار مربوط به آلاینده‌های مورد نظر در مشهد آمار قرائت شده توسط ایستگاه سجاد است.

۳-۴- داده‌های مربوط به آلاینده‌های شاخص آلودگی هوا

داده‌های مربوط به کیفیت هوا به‌وسیله دستگاه‌های سنجش آلودگی هوا که در سطح شهر در محل‌های مشخصی قرار گرفته‌اند توسط اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان خراسان رضوی جمع‌آوری می‌شود. در جدول (۳-۱) نام و موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی بیان شده است.

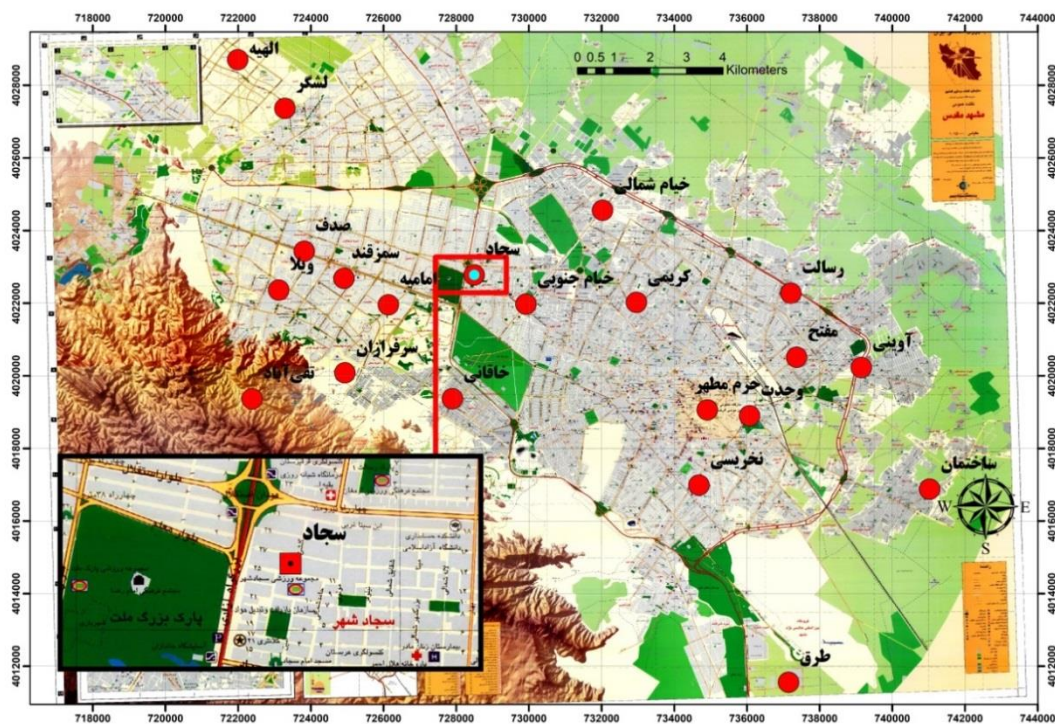
جدول ۱-۳: نام و موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای مشهد

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (Y)	طول جغرافیایی (X)	نوع ایستگاه	وضعیت
۱	خیام جنوبی	۴۰.۲۱۹۷۵	۷۲.۹۹۲۱	ترافیکی (موبایل)	فعال
۲	طرق	۴۰.۱۱۵۵۷	۷۳.۷۱۴۶	بالادست	فعال
۳	ماشین ابزار	۴۰.۴۱۳۰۸	۷۰.۹۱۶۴	پایین دست	فعال
۴	صدف	۴۰.۲۳۴۳۳	۷۲.۳۸۲۰	ترافیکی	فعال
۵	تقی آباد	۴۰.۱۹۳۶۴	۷۲.۲۳۸۴	ترافیکی	فعال
۶	وحدت	۴۰.۱۸۹۰۰	۷۳.۶۰۷۵	ترافیکی	غیرفعال
۷	نخریسی	۴۰.۱۶۹۹۱	۷۳.۴۶۸۲	شهری	فعال
۸	ساختمان	۴۰.۱۶۸۸۰	۷۴.۱۰۲۷	حومه شهری	فعال
۹	رسالت	۴۰.۲۲۲۷۶	۷۳.۷۲۱۰	شهری	فعال
۱۰	لشگر	۴۰.۲۷۳۶۶	۷۲.۳۲۸۸	شهری	فعال
۱۱	ویلا	۴۰.۲۲۳۶۱	۷۲.۳۱۱۸	شهری	فعال
۱۲	سجاد	۴۰.۲۲۷۷۷	۷۲.۸۴۹۸	شهری	فعال
۱۳	سمزقند	۴۰.۲۲۶۸۵	۷۲.۴۹۱۲	شهری	فعال
۱۴	خیام شمالی	۴۰.۲۴۵۶۱	۷۳.۲۰۲۹	ترافیکی	فعال
۱۵	چمن	۴۰.۱۴۷۵۱	۷۲.۷۵۲۶	ترافیکی	فعال
۱۶	الهیه	۴۰.۲۸۷۰۷	۷۲.۱۹۹۱	حومه شهری	فعال
۱۷	کریمی	۴۰.۲۲۰۲۲	۷۳.۲۹۶۰	ترافیکی	فعال
۱۸	مفتح	۴۰.۲۰۵۱۲	۷۳.۷۳۶۸	شهری	فعال
۱۹	آوینی	۴۰.۲۰۲۲۸	۷۳.۹۱۴۹	ترافیکی	فعال
۲۰	خاقانی	۴۰.۱۹۳۷۱	۷۲.۷۸۹۸	شهری	فعال
۲۱	سرفرازان	۴۰.۲۰۰۸۵	۷۲.۴۹۴۰	شهری	فعال
۲۲	امامیه	۴۰.۲۱۹۵۶	۷۲.۶۱۳۵	ترافیکی	فعال
۲۳	حرم مطهر	۴۰.۱۹۰۶۱	۷۳.۴۹۰۹	ترافیکی	فعال

پارامترهای مرتبط در مرکزی که در محل اداره کل محیط زیست استان خراسان رضوی مستقر است توسط این دستگاه‌ها اندازه‌گیری شده و به صورت ساعتی ثبت می‌شود و سپس موارد به سیستم ارسال شده و در آنجا ذخیره و نگهداری می‌شود. موارد اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های سنجش شامل غلظت آلاینده‌های شاخص هوا مانند کربن مونوکسید، دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق و اوزون می‌باشند.

به علت عدم کارکرد برخی از این ایستگاه‌ها در پاره‌ای از روزهای سال، اطلاعات ثبت شده فاقد آمار مربوط به این دوره‌ها است. عمده ایستگاه‌ها از سال ۱۳۸۷ راه‌اندازی شده‌اند ولی به علت عدم کارکرد صحیح آن در دوره‌های مختلف زمانی، آمار کاملی را ارائه نمی‌دهند. به همین دلیل در این پایان‌نامه از بین ایستگاه‌های موجود ایستگاه سنجش سجاد انتخاب شد چراکه کامل‌ترین آمار را در سال‌های مورد نظر ارائه می‌دهد. شکل (۳-۳) ایستگاه سنجش آلودگی هوا سجاد را نشان می‌دهد. آلاینده‌های آلودگی هوا مورد استفاده در این تحقیق شامل مونوکسید کربن، ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر و اوزون هستند.

در این بخش ابتدا به بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر آلودگی هوای مشهد و سپس به منظور پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های مختلف آلودگی هوا از مدل رگرسیون چندگانه (روش خطی) و شبکه عصبی (مدل غیرخطی) استفاده شد و نتایج حاصل از این دو مدل با یکدیگر مقایسه می‌گردد.



شکل ۳-۳: موقعیت ایستگاه های پایش آلودگی مشهد

۵-۳- نرم افزارهای مورد استفاده

در این پایان نامه برای تجزیه و تحلیل داده های گردآوری شده از نرم افزارهایی استفاده شد که نام آن ها و کاربردها در جدول ۳-۲ آمده است.

جدول ۳-۲: نام و کاربرد نرم افزارهای مورد استفاده

نام نرم افزار	کاربرد
Arc GIS	ترسیم نقشه ایستگاه ها
Alyuda NeuroIntelligence	مدل سازی شبکه عصبی
Minitab 17	مدل سازی رگرسیونی
SCATS	بررسی ترافیک عبوری در سطح شهر
RAOB	تجزیه و تحلیل داده های وارونگی دما
Microsoft office Excel 2016	محاسبات آماری و ترسیم نمودارها

۳-۶- مدل‌های مورد استفاده

در این قسمت به تشریح مدل‌های این پژوهش می‌پردازیم که شامل رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه می‌شود.

۳-۶-۱- رگرسیون خطی چندگانه (MLR^۱)

رگرسیون چندگانه روشی برای تعیین ارتباط خطی بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل است. تحلیل رگرسیون روش آماری است که در آن سعی می‌شود رابطه بین تغییرات دو یا چند متغیر کمی تعیین گردد تا با استفاده از آن بتوان مقادیر یک متغیر را بر اساس متغیر یا متغیرهای دیگر پیش‌بینی کرد. معمولاً تغییرات یکی از متغیرهایی که در این رابطه حضور دارند تابع تغییرات سایر متغیرهاست. این متغیر را متغیر وابسته و سایر متغیرها را متغیر مستقل می‌نامند. به متغیرهای وابسته و مستقل به ترتیب متغیرهای پاسخ و پیش‌بینی نیز گفته می‌شود. اگر در بررسی‌ها تنها یک متغیر مستقل وجود داشته باشد، رگرسیون خطی را ساده و اگر چند متغیر موجود باشد، رگرسیون خطی را چندگانه می‌نامند [۳۵].

در به کارگیری مدل آماری مذکور در این تحقیق، رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت ذیل در نظر گرفته شده است:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_kX_k + \varepsilon \quad (۱-۳)$$

که در آن Y متغیر وابسته، $X_1 \dots X_k$ پارامترهای مستقل، ε متغیری تصادفی که توزیع آماری معینی با میانگین صفر دارد و $b_1 \dots b_k$ ثابت‌های معلوم هستند. در تحلیل رگرسیون هدف مشخص کردن پارامترهای معادله رگرسیون و مقایسه مدل با مقادیر متغیر وابسته Y هست.

در مدل رگرسیونی، غلظت آلاینده‌ها به عنوان متغیر پاسخ و عوامل اقلیمی به عنوان متغیرهای

^۱ Multiple linear regression

پیش‌بینی معرفی گردیدند. برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها از مدل چند متغیره استفاده شد، زیرا غلظت آلاینده‌ها تحت تأثیر کلیه پارامترهایی اقلیمی است و استفاده از یک پارامتر هرچند به‌تنهایی ممکن است کارآمد باشد اما کافی نخواهد بود. هم خطی بودن کل پارامترها با یکدیگر با آزمون فاکتور تورم واریانس (VIF^1) موردبررسی قرار گرفت تا چنانچه بین پارامترها هم خطی وجود دارد عوامل هم خطی حذف شوند. با توجه به این که مقدار زیاد VIF^2 نشان‌دهنده وقوع هم خطی بین داده‌ها است پارامتری که دارای VIF بیش‌تر از ۱۰ بود حذف گردید. سپس مراحل مختلف رگرسیون برای ارزیابی و تعیین پارامترهای تأثیرگذارتر موردبررسی قرار گرفت و در نتیجه تأثیرگذارترین پارامتر بر هر آلاینده مشخص گردید.

۳-۶-۲- شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

در ادامه عملکرد شبکه‌های عصبی، وظایف شبکه‌های عصبی و مزایای استفاده از آن‌ها موردبحث و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۳-۶-۲-۱- مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی

امروزه شبکه‌های عصبی کاربردهای زیاد در شاخه‌های مختلف علوم پیدا کرده‌اند و همواره در دو جهت توسعه تئوریک و عملی در حال رشد است. بیشتر پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی به ساختارهای جدید و روش‌های یادگیری جدید مربوط است. آنچه در حال حاضر در مورد کارکرد شبکه‌های عصبی به‌طور قاطع می‌توان گفت آن است که در آینده جایگاه مهمی خواهند داشت. نه به‌عنوان یک جواب و راه‌حل برای هر مسئله بلکه به‌عنوان یک ابزار علمی که بتواند برای راه‌حل‌های خاص و مناسب مورد استفاده قرار بگیرد. چیزی که شبکه‌های عصبی را در آینده محبوب‌تر خواهد نمود سرعت بالای کامپیوترها و الگوریتم‌های یادگیری سریع‌تر است که به استفاده از شبکه‌های عصبی در مسائل صنعتی

¹ Variance inflation factor

² $VIF=1/(1-R^2)$

با محاسبات زیاد کمک می‌کند. باید توجه داشت که در حال حاضر اطلاعات موجود درباره نحوه عملکرد مغز بسیار محدود است و مهم‌ترین پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی، زمانی که اطلاعات بیشتری از چگونگی عملکرد مغز و نرون‌های بیولوژیکی در دست باشد، در آینده مطرح خواهد شد. شبکه‌های عصبی به دو دسته کلی شبکه‌های روبه‌جلو و شبکه‌های بازگشتی تقسیم می‌شوند [۷].

شبکه‌های عصبی مصنوعی متشکل از تعدادی عنصر پردازشی متصل به یکدیگر به نام نرون می‌باشند. شبکه عصبی یک گراف جهت‌دار در نظر گرفته می‌شود که هر گره در آن معادل یک نرون است. تعدادی از این نرون‌ها نقش لایه ورودی و تعدادی نقش لایه خروجی را بازی می‌کنند. به بیان دیگر نرون‌های لایه ورودی، ورودی مسئله را دریافت می‌کنند و نرون‌های لایه خروجی، خروجی شبکه را تولید می‌کنند. دیگر نرون‌ها که بین لایه ورودی و خروجی قرار می‌گیرند لایه‌های مخفی را تشکیل می‌دهند.

اغلب بین نرون‌های موجود در لایه‌های مجاور ارتباطاتی با استفاده از یال‌ها وجود دارند که به هر یال وزنی نسبت داده می‌شود و هنگام آموزش شبکه همین وزن‌ها تغییر می‌کنند. در حالت کلی ممکن است بین هر دو نرون دلخواه یالی وجود داشته باشد و لازم نیست که این ارتباط حتماً بین نرون‌های موجود در لایه‌های مجاور باشد.

در یک شبکه عصبی خروجی گره i ام به صورت رابطه (۲-۳) مشخص می‌گردد.

$$Y_i = f_i \left(\sum w_{ij} X_j + \alpha_i \right) \quad (2-3)$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه به شرح زیر می‌باشند:

Y_i خروجی گره i

X_j ورودی j ام به گره

w_{ij} وزن یال از گره j به گره i

α_i مقدار مربوط به بایاس

f_i تابع تحریک

همان‌طور که رابطه (۲-۳) بیان می‌کند برای محاسبه خروجی هر ترون ابتدا باید مقدار ورودی‌های آن نرون مشخص گردد. بنابراین بدیهی است که برای محاسبه خروجی، باید از لایه ورودی عملیات شروع شود و به سمت لایه خروجی حرکت شود.

در ادامه ساختار شبکه‌های عصبی و شبکه‌های MLP توضیح داده می‌شود، چراکه در این پایان‌نامه از این نوع شبکه عصبی استفاده شده است. این شبکه از مشهورترین انواع شبکه‌های عصبی است که در زمینه‌های مختلف برای حل مسائل مورد استفاده قرار گرفته و کارایی قابل قبولی در حل مسائل از خود نشان داده است.

۳-۶-۲-۲- ساختار شبکه‌های عصبی

عموما نرون‌های یک‌لایه به‌طور یک‌سان عمل می‌کنند، پارامتر اصلی در تعیین رفتار یک نرون تابع تحریک مربوطه به آن و رابط‌های وزنداری است که اطلاعات از طریق آن‌ها دریافت و یا ارسال می‌گردد.

معمولا در هر لایه نرون‌ها دارای تابع تحریک یکسان بوده و طریقه ارتباط آن‌ها به سایر نرون‌ها باهم یکسان است. برای بیان دقیق‌تر مطلب، در شبکه عصبی نرون‌های یک‌لایه یا به‌طور کامل مرتبط هستند، و یا این ارتباط وجود ندارد. اگر هر نرون از یک‌لایه (مثلا لایه پنهان) به نرونی از لایه دیگر (مثلا لایه خروجی) مرتبط باشد، می‌توان گفت هر نرون پنهان به هر نرون خروجی مرتبط شده است. ترتیب نرون‌ها در لایه‌ها و نحوه ارتباط در داخل لایه‌ها و بین لایه‌ها، ساختار شبکه نامیده می‌شود. بسیاری از شبکه‌های عصبی دارای یک‌لایه ورودی هستند به‌طوری‌که پاسخ هر واحد برابر با ورودی اعمال‌شده از خارج شبکه است. اغلب شبکه‌های عصبی به‌صورت یک‌لایه یا چندلایه گروه‌بندی می‌شوند. در تعیین تعداد لایه‌ها، لایه نرون‌های ورودی به‌عنوان یک‌لایه محسوب نمی‌گردد، زیرا هیچ‌گونه محاسبه‌ای در آن‌ها انجام نمی‌گیرد. به عبارت دیگری تعداد لایه‌های یک شبکه برابر با تعداد

ارتباط وزن دار بین لایه‌ها است. این نام‌گذاری بدان جهت رعایت می‌شود که وزن‌ها در یک شبکه حامل اطلاعات مهمی هستند.

معرفی مقادیر اولیه وزن‌ها قبل از آموزش شبکه از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طور کلی آموزش شبکه‌های عصبی به دو طریق صورت می‌گیرد؛ آموزش با ناظر و آموزش بدون ناظر، و همچنین شبکه‌های عصبی وجود دارند که در آن‌ها وزن‌ها دارای مقادیر مشخص و ثابتی هستند و نیازی به آموزش شبکه به طریق تکراری نیست [۹].

شبکه‌های عصبی گوناگون می‌توانند وظایف مختلفی را بر عهده بگیرند که در اینجا به سه مورد وظایف آن اشاره شده است.

- با توجه به تعریف ریاضی و یا مهندسی، شبکه عصبی یک سیستم نگاشت کننده برداری است، به این معنی که نگاشتی از یک بردار ورودی به یک بردار خروجی است.

- یکی از ساده ترین وظایف شبکه‌های عصبی گروه‌بندی الگوها است. بدین معنی که وضعیت تعلق داشتن یا عدم تعلق بردار ورودی (الگو) به یک طبقه و یا گروه مشخص را شبکه تعیین می‌کند.

- شبکه‌های عصبی که بر اساس رقابت عمل می‌کند، بر اساس الگوریتمی خاص و بدون ناظر آموزش می‌بیند. هنگام استفاده از این شبکه، با اعمال بردار ورودی، نرون‌های لایه پردازش کننده باهم رقابت می‌کنند و یکی از نرون‌های این لایه برنده می‌شود. این نوع شبکه‌ها به صورت یک نگاشت کننده برداری عمل می‌کنند.

آموزش اکثر شبکه‌های عصبی با استفاده از مجموعه ای از زوج بردارهای نمونه انجام می‌شود. به‌طوری‌که به هر بردار ورودی یک بردار خروجی مشخص داده می‌شود. با ارائه این مجموعه بردارها به شبکه، وزن‌ها بر اساس الگوریتم یادگیری شبکه اصلاح می‌گردند. این گونه آموزش را آموزش با معلم گویند. در آموزش بدون معلم، بردارهای ورودی به شبکه اعمال می‌گردد بدون اینکه بردارهای خروجی

مربوط به شبکه داده شوند. وزن‌های شبکه به صورتی اصلاح می‌شوند که بردارهای ورودی مشابه در یک گروه‌بندی قرار می‌گیرند. پاسخ شبکه بر اساس نزدیک‌ترین بردار به بردار ورودی خواهد بود.

عملیات اصلی یک شبکه عصبی شامل جمع‌کردن ورودی‌های وزن‌دار شده و اعمال تابع انتقال به این مجموعه برای تعیین خروجی شبکه است. عموماً برای تمامی نرون‌ها یک‌لایه تابع انتقال یک‌سان انتخاب می‌کنند، اگرچه چنین شرطی لزوماً برقرار نیست. در اکثر مواقع، یک تابع تحریک غیرخطی به کار گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن توانایی‌های محدود شبکه‌های تک لایه، برای اینکه حداکثر استفاده از شبکه‌های چندلایه صورت گیرد، نیاز به تابع انتقال غیرخطی است. زیرا عبور اطلاعات از دو یا چندلایه که در آن‌ها نرون‌ها با تابع انتقال خطی عمل می‌نمایند به همان نتیجه‌ای منتهی می‌گردد که به یک شبکه یک‌لایه میسر است و ترکیب توابع خطی همواره تابع خطی خواهد بود. بایاس هر نرون به‌مانند وزنی با مقدار مشخص که از یک نرون مفروض با پاسخ ثابت بر آن تحمیل می‌شود، عمل می‌کند. افزایش بایاس موجب افزایش ورودی نرون می‌گردد. البته می‌توان بایاس را در نظر نگرفت ولی در مقابل باید یک مقدار ثابت آستانه‌ای را همیشه در نرون در نظر گرفت [۲۳].

۳-۶-۲-۳- مزایای شبکه عصبی

از مزایای شبکه عصبی می‌توان موارد زیر را نام برد:

- ۱- خودسازمان‌دهی: یک شبکه عصبی مصنوعی به‌صورت خودکار سازمان‌دهی شده و داده‌های که در طول آموزش دریافت کرده است را پردازش می‌کند.
- ۲- یادگیری تطبیقی: توانایی یادگیری این‌که چگونه وظایف خود را بر اساس اطلاعات داده شده به آن و با تجارب اولیه انجام دهد.
- ۳- عملگرهای بلادرنگ: محاسبات در شبکه عصبی مصنوعی به‌صورت موازی و به‌وسیله سخت‌افزارهای مخصوصی که جهت دریافت نتایج بهینه از قابلیت‌های شبکه عصبی طراحی شده‌اند، انجام می‌شوند.

- ۴- تحمل خطا: چنانچه اختلالی در کار شبکه عصبی به وجود آید، هرچند که مقداری از کارایی آن کاهش می‌یابد ولی بر اساس امکانات موجود به پردازش خود ادامه داده و نتایج را اعلام می‌دارد.
- ۵- دسته‌بندی: شبکه عصبی قادر به دسته‌بندی ورودی‌ها برای دریافت خروجی مناسب است.
- ۶- تعمیم دهی: این خاصیت شبکه را قادر می‌سازد تا تنها با آموزش دیدن با تعداد محدودی از یک نمونه، قانون کلی را به دست آورده و نتایج این آموخته را به موارد مشاهده نشده از قبل، تعمیم دهد.
- ۷- انعطاف‌پذیری پایداری: یک شبکه عصبی قادر است اطلاعات فراگرفته خود را حفظ کند. به‌علاوه قابلیت انعطاف و تطبیق را دارد و بدون از دست دادن اطلاعات قبلی می‌تواند موارد جدید را بپذیرد [۹].

۳-۶-۲-۴- پرسپترون چندلایه

این نوع شبکه یکی از انواع شبکه‌های روبه‌جلو است که در آن نرون‌ها به‌صورت منظم و لایه به لایه قرار گرفته‌اند و هر نرون با نرون‌های موجود در لایه‌های قبلی و نرون‌های لایه بعدی ارتباط دارد. این شبکه از نوع شبکه‌های عصبی با ناظر است، یعنی برای آموزش شبکه لازم است به ازای هر الگوی ورودی، خروجی شبکه محاسبه‌شده و خروجی شبکه با خروجی مطلوب مقایسه گردد.

در ادامه به بررسی الگوریتم آموزش لونبرگ مارکوارت که یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های آموزشی شبکه‌های MLP است، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که این الگوریتم جهت آموزش شبکه عصبی مدل ارائه‌شده در این پایان‌نامه مورد استفاده واقع شده است.

در شبکه عصبی لازم است تابع کارایی شبکه بر اساس پارامترهای شبکه حداقل شود. طبق روش نیوتن تغییرات پارامترهای شبکه در هر گام آموزش برابر با رابطه (۳-۳) است.

$$X_{k+1} = X_k - (\Delta^2 F(X_k))^{-1} (\Delta F(X_k)) \quad (3-3)$$

در رابطه فوق $(\Delta^2 F(x_k))$ ماتریس هسین^۱ و $F(x_k)\Delta$ گرادیان تابع کارایی $F(x)$ در نقطه x_k نسبت به بردار پارامترهای شبکه است. شاخص کارایی در آموزش شبکه‌های چندلایه میانگین مربعات خطا است.

$$F(x) = \sum_{q=1}^Q (t_q - a_q)^T (t_q - a_q) = \sum_{j=1}^Q (e_j, q)^2 = \sum_{i=1}^N (v_i)^2 \quad (3-4)$$

در رابطه فوق t_q مقدار q امین زوج ورودی a_q مقدار q امین زوج ورودی و $e_{j,q}$ j امین عضو از بردار خطا در مورد q امین زوج ورودی v بردار خطا است و $N = QS^M$ است. Q تعداد داده‌های آموزش و S^M تعداد خروجی‌های شبکه است. با انجام تغییراتی در روش نیوتون، الگوریتم لونبرگ مارکوارت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta x_k = - [J^T(x_k)J(x_k) + \mu_k I]^{-1} J^T(x_k)v(x_k) \quad (5-3)$$

μ_k ضریب یادگیری مارکوارت نام دارد که هر چه کوچک‌تر باشد نحوه آموزش به روش گاوس-نیوتون^۲ نزدیک‌تر می‌شود. و هر چه μ_k بزرگ‌تر باشد نحوه آموزش به روش بیشترین شیب نزدیک‌تر می‌شود. J ماتریس ژاکوبین است که مولفه‌های آن به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$[J]_{h,i} = \frac{\partial v_h}{\partial x_i} \quad (6-3)$$

می‌توان از مفهوم فرآیند پس انتشار برای محاسبه جملات ماتریس ژاکوبین استفاده نمود. فرآیند پس انتشار حساسیت‌های شبکه را از لایه آخر به سمت لایه اول محاسبه می‌کند و واژه پس انتشار نیز به واسطه این نحوه محاسبه، در مورد این نوع از شبکه‌ها به کار گرفته می‌شود. برای محاسبه مؤلفه‌های ماتریس ژاکوبین از قاعده مشتق‌گیری زنجیره‌ای به صورت روابط (۳-۵) و (۳-۶) استفاده می‌شود.

^۱ Hessian

^۲ Gauss-Newton

$$[J]_{h,i} = \frac{\partial v_h}{\partial x_i} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial n_{i,q}^m} \times \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{i,j}^m} = S_{i,h}^m \times a_{j,q}^{m-1} \quad (7-3)$$

در صورتی که x_1 بایاس باشد معادله به شکل زیر تغییر می کند:

$$[J]_{h,i} = \frac{\partial v_h}{\partial x_i} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial n_{i,q}^m} \times \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{i,j}^m} = S_{i,h}^m \quad (8-3)$$

که $S_{i,h}^m$ حساسیت مارکوارت نامیده می شود

شرطهای خاتمه الگوریتم پس انتشار لونبرگ مارکوارت به صورت زیر است:

۱- گرادیان کمتر از مقدار پیش تعریف شده شود.

۲- خطای مجموع مربعات از حد معینی کم تر گردد.

۳- تعداد تکرار به مقدار پیش فرض برای آن برسد.

۷-۳- پارامترهای مورد استفاده در مدل

بر اساس تحقیقهای انجام شده در حوزه پیش بینی آلاینده های هوا عوامل زیادی در ایجاد و پراکنش و انتقال آلاینده ها مؤثر می باشند؛ برای ارائه یک پیش بینی منطقی از پارامترهای قابل پیش بینی استفاده می گردد. در ادامه به بررسی بیشتر پارامترهای مورد استفاده در مدل که شامل پارامترهای هواشناسی، ترافیکی، زمانی، غلظت آلاینده و وارونگی دما^۱ است، پرداخته می شود.

۷-۳-۱- پارامترهای هواشناسی

اولین و مؤثرترین گروه از عوامل در زمینه آلودگی هوا، پارامترهای هواشناسی می باشند که در ادامه به بررسی پارامترهای هواشناسی استفاده شده در مدل پرداخته می شود.

^۱ Temperature inversion

• **باد:** باد عامل مهمی در پخش و انتقال آلاینده‌ها به حساب می‌آید. در مجموع می‌توان گفت به علت انتشار و انتقال ذرات در حجم وسیعی از جو توسط باد، غلظت ذرات کاهش یافته و این کاهش با سرعت باد در مجاورت منبع، متناسب است. چنانچه سرعت باد کم باشد، آلاینده‌ها در نزدیکی محل تولید تجمع پیدا می‌کنند و اثرات زیست‌محیطی حادی را موجب می‌گردند. می‌توان گفت، جهت باد مکان آلوده‌ترین موقعیت‌های مکانی را مشخص می‌سازد. بدیهی است که مواد آلوده‌کننده هم سو با جریان باد انتشار یافته و چون جهت باد متغیر است، به همین دلیل ذرات آلوده‌کننده هم به صورت افقی و هم در جهت عمودی حرکت می‌کنند. لازم به ذکر است که برای توسعه مدل، باد به دو جزء طبق رابطه (۳-۹) و (۳-۱۰) تبدیل می‌گردد [۴۵].

$$\text{Wind}_x = w \cos(\varphi) \quad (۳-۹)$$

$$\text{Wind}_y = w \sin(\varphi) \quad (۳-۱۰)$$

در روابط (۳-۹) و (۳-۱۰)، w نشان‌دهنده سرعت باد و φ جهت باد است.

• **فشار هوا:** سیستم‌های پرفشار یا آسمانی صاف، بادهایی ملایم و اتمسفری پایدار را به همراه می‌آورند. هنگامی که چنین سیستمی در بالای یک ناحیه برای چند روز باقی بماند، آلاینده‌های هوا انباشته شده و ایجاد مشکل می‌کنند. در طرف مقابل، سیستم‌های کم‌فشار یا شرایط ناپایدار اتمسفری و غالباً باد و باران را در پی دارند و احتمال انباشتگی آلاینده‌ها را کمتر می‌کنند. فشار هوا همچنین در فرآیند احتراق به خصوص در احتراق داخلی در و سایل نقلیه موتوری شدت مهمی دارد. کاهش فشار باعث کمبود نسبی اکسیژن هوا شده و احتراق به طور ناقص اتفاق می‌افتد که تولید بیشتر آلاینده‌ها را به دنبال دارد. بنابراین انتظار می‌رود که با تغییرات فشار هوا تغییرات محسوس در گازهای خروجی منابع آلوده‌کننده ایجاد شود [۲۳].

• **رطوبت:** میزان رطوبت اتمسفر بر کیفیت هوای یک منطقه تأثیرگذار است. بخار آب موجود در اتمسفر بر میزان جذب تابش‌های خورشیدی و نیز تشعشعات حرارتی بازتابیده شده توسط زمین تأثیر

چشمگیری دارد. به این ترتیب می تواند تعادل های انرژی و حرارتی حاکم بر محیط را تحت الشعاع قرار داده و به طور مستقیم و یا غیرمستقیم کیفیت هوا را تحت تاثیر قرار دهد. به علاوه در یک منطقه آلوده زمانی که رطوبت نسبی بالا رود ذرات موجود در هوا به عنوان هسته های مرکزی، مولکول های آب را به دور خود جمع کرده و به دلیل حل شدن آلاینده های گازی در این آب، مه دود فتوشیمیایی تولید می شود. همچنین محیط با رطوبت بالا بر انجام سریع تر واکنش ها و تبادل های یونی تاثیر زیادی دارد. بنابراین با افزایش رطوبت نسبی، به دلیل انجام واکنش های شیمیایی در سطح ذرات، مواد آلوده کننده جدیدی تولید و وارد محیط می شوند و بدین ترتیب بر شدت آلودگی هوا اضافه می شود [۲۴].

• **بارندگی:** درباره تاثیر مثبت باران در تمیز کردن جو مطالب زیادی در پژوهش ها ارائه شده است. قطرات باران، ذرات و گازهای موجود در هوا را با خود شسته و به زمین می آورد. تاثیر شست و شوی باران در کاهش میزان آلودگی به عوامل متعددی نظیر نوع و غلظت آلاینده ها، شدت و مدت بارندگی و همچنین قطر قطرات باران بستگی دارد و برآورد شده است که یک بارندگی یکنواخت با شدت معادل یک میلی متر در ساعت، در ۱۵ دقیقه می تواند ۲۸ درصد ذراتی که قطرشان از ۱۰ میکرومتر بیشتر است را از هوا حذف کند [۱۹].

دما: نحوه تغییرات افقی و عمودی دما در اتمسفر می تواند اثر مستقیمی را در ایجاد جریان های هوا و در نتیجه ی آن انتقال آلاینده ها داشته باشد. میزان دریافت انرژی خورشیدی و نیز میزان بازتاب تشعشعات حرارتی در نقاط مختلف کره زمین بسیار متفاوت است. این مسئله باعث عدم یکنواخت بودن دما در بعد افقی فضا در نقاط مختلف کره زمین می شود، به طوری که بالاترین میزان دما در مناطق حاره ای مشاهده می گردد. با افزایش عرض جغرافیایی، دما نیز کاهش یافته و در قطب ها به حداقل خود می رسد. اختلاف حرارتی نواحی مختلف به همراه گردش کره زمین باعث به وجود آمدن الگوهای جهانی و خاصی از بادهای می شود و همان گونه که در قبل توضیح داده شد بادهای در کاهش و پراکنده نمودن آلاینده های هوا و کاهش آلودگی هوا نقش تأثیرگذاری برعهده دارند. علاوه بر اثرات دما

در ایجاد جریان‌های افقی و عمودی توده‌های هوا، با افزایش دما نرخ واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها با یکدیگر و یا با ترکیبات طبیعی موجود در جو افزایش می‌یابد و در این صورت دما می‌تواند بر تولید، توزیع و تجمع آلاینده‌ها تأثیرگذار باشد.

پس به‌طور کل می‌توان به این نتیجه رسید که نقش پارامترهای اقلیمی بر میزان پراکنش آلاینده‌های هوا و تأثیر آن در کیفیت هوای هر منطقه غیرقابل انکار است. تأثیر اقلیم بر کیفیت هوا از بعد آلودگی هوا می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. بنابراین در بحث‌های مربوط به آلودگی هوا، بررسی آمار و داده‌های مربوط به پارامترهای اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آمار مربوط به اقلیم مشهد، آمار قرائت شده توسط ایستگاه سینوپتیک مشهد است که از اداره کل هواشناسی خراسان رضوی اخذ شده است. این آمار مربوط به پارامترهای مختلفی از جمله جهت باد، سرعت باد، دما، فشار، بارندگی و درصد رطوبت است که به تعداد ۸ بار در شبانه‌روز (فاصله زمانی ۳ ساعته) اندازه‌گیری می‌شوند. آمار پارامترهای اقلیمی بررسی شده در این پایان‌نامه از ابتدای سال ۱۳۹۵ تا پایان سال ۱۳۹۶ است.

۳-۷-۲- پارامترهای ترافیکی

دسته دیگر از پارامترهای مؤثر در زمینه آلودگی هوا، پارامترهای ترافیکی هستند؛ زیرا ترافیک و سایل نقلیه موتوری به دلیل سطح بالای انتشار مواد آلاینده از جمله مهم‌ترین منابع آلودگی هوا در شهرها به شمار می‌رود.

امروزه کنترل ترافیک اکثر کلان شهرهای دنیا با استفاده از سیستم کنترل هوشمند^۱ (SCATS) صورت می‌پذیرد که هدف آن ایجاد حرکتی روان با کمترین زمان تأخیر در سطح خیابان‌های شهر است.

این سیستم، عبور وسایل نقلیه در بازه‌های زمانی منظم را تشخیص داده و اطلاعات هر تقاطع را از

^۱ Sydney coordinated adaptive traffic system

طریق خطوط مخابراتی به مرکز کنترل ترافیک می‌فرستد. در حال حاضر ۱۸۰ تقاطع در سطح شهر مشهد به سیستم کنترل هو شمند مجهز می‌باشند. آمار مربوط به ترافیک در سطح شهر مشهد با استفاده از اطلاعات سیستم مذکور تهیه می‌شود. به دلیل استفاده از پارامترهای قابل پیش‌بینی، سعی شد الگویی در این داده‌ها حاصل گردد. با بررسی ۱۰ درصد از تقاطع‌های سطح شهر مشهد در بازه زمانی سال‌های ۹۵ و ۹۶، این نتیجه حاصل گردید که حجم ترافیک در روزهای کاری دارای مقدارهای تقریباً مشابهی و در روزهای غیرکاری نیز دارای مقادیر مشابه است و از لحاظ آماری تفاوت قابل‌توجهی بین روزهای مختلف در روزهای کاری و غیر کاری وجود ندارد. به همین منظور پارامتر حجم ترافیک با عنوان ورودی نوع روز (کاری و غیر کاری) که مقادیر ۰ و ۱ اتخاذ می‌کند، در مدل وارد می‌شود.

۳-۷-۳- پارامترهای زمانی

متغیرهای وابسته به زمان نیز به مجموعه داده‌های ورودی اضافه می‌گردد تا منعکس‌کننده شرایط و تغییرات غلظت آلاینده در چرخه‌هایی مانند چرخه‌های فصلی باشد. به این جهت فصل سال با مقادیر ۱ تا ۴ به ازای هر یک از فصل‌های سال، به عنوان ورودی در کنار سایر پارامترها قرار می‌گیرد.

۳-۷-۴- غلظت آلاینده

غلظت آلاینده در یک روز قبل از پیش‌بینی به عنوان ورودی دیگری در مدل در نظر گرفته می‌شود، چراکه همان‌طور که از شکل ۳-۴ مشخص است همبستگی بالایی بین غلظت آلاینده در روز قبل از پیش‌بینی و روز تحت پیش‌بینی وجود دارد. لازم به ذکر است که این داده‌ها مربوط به بازه زمانی ابتدا سال ۹۵ تا انتهای سال ۹۶ است که از مرکز پایش آلاینده‌ها زیست‌محیطی مشهد اخذ شده است.

۳-۷-۵- وارونگی دما

عامل مهم دیگری که نقش اساسی در آلودگی هوا دارد وارونگی دما است، چراکه باعث پایدار شدن

جو و در نتیجه پایدار شدن در برابر حرکت عمودی آلاینده‌ها می‌گردد. گاهی اوقات دمای هوا با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد، یعنی هوای گرم در بالای هوای سرد قرار می‌گیرد، به این پدیده وارونگی دمایی می‌گویند. لازم به ذکر است که این پارامتر توسط سایت‌ها، پیش‌بینی نمی‌شود اما به دلیل این که پارامتر بسیار تأثیرگذاری است، در مدل لحاظ می‌شود. به‌طور کلی وارونگی دمایی به انواع زیر تقسیم می‌گردد.

۳-۷-۶- وارونگی سطحی یا تشعشی^۱

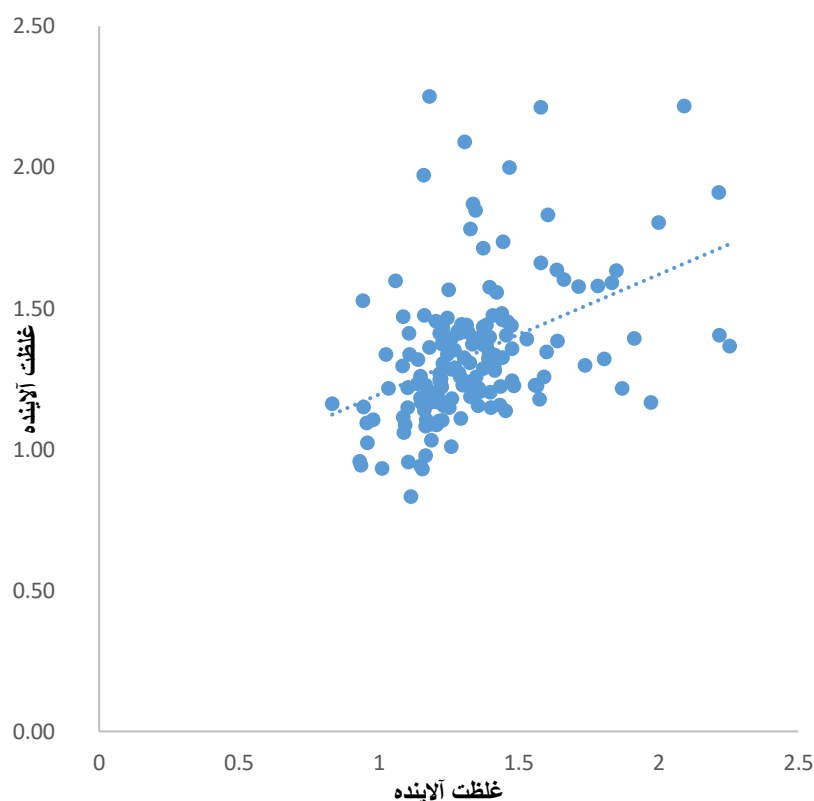
این نوع وارونگی در نزدیکی سطح زمین روی می‌دهد و نقش مهمی در کیفیت هوا دارد. هنگام غروب خورشید منبع دریافت انرژی از دست می‌رود، در نتیجه سطح زمین شروع به سرد شدن می‌کند، در حالی که هوای لایه‌های بالاتر هنوز سرد نشده است. این نوع وارونگی از اختلاف دمای قابل توجه بین هوای سطح خنک شده و هوای گرم بالا ناشی می‌شود. معمولاً گسیختن و محو این نوع وارونگی با بالا آمدن خورشید شروع می‌شود و با گذشت حدود ۳ تا ۵ ساعت به‌طور کامل محو می‌گردد. در طول روز سطح وارونگی به‌طور معمول تضعیف و ناپایدار می‌شود. این نوع وارونگی چون از اختلاط عمودی هوا جلوگیری می‌کند، به‌نوعی می‌توان گفت که آلاینده‌ها را به دام می‌اندازد.

۳-۷-۷- وارونگی فرونشستی^۲

این شکل از وارونگی در ارتفاعات بالا شکل می‌گیرد و برعکس وارونگی سطحی عمر طولانی دارد و ممکن است ماه‌ها طول بکشد. در این حالت فشار وارد شده از لایه‌های فوقانی (لایه‌های گرم که در اثر پایداری جو در حال فرونشست هستند) بر لایه زیرین، باعث فشرده شدن و در نتیجه گرم شدن آن لایه می‌گردد و لایه زیرین سردتر از لایه بالایی می‌شود.

^۱ Radiation

^۲ Subsidence



شکل ۳-۴: ارتباط بین غلظت آلاینده CO در روز پیش‌بینی (d) و روز قبل آن (d-1)

اطلاعات مربوط به پارامتر وارونگی دما از سایت دانشگاه وایومینگ [۴۸] برای دوره موردنظر استخراج گردیده و پس از آن با استفاده از نرم‌افزار ^۱RAOB مورد تجزیه و تحلیل (از لحاظ وجود وارونگی و نوع وارونگی) قرار گرفته است. لحاظ کردن این ورودی در مدل به صورت زیر است:

اگر وارونگی از نوع سطحی یا وارونگی از نوع فرونشستی در ارتفاعات پایین (زیر ۱۲۰۰ متر از سطح دریا) رخ دهد، ورودی مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند. در نهایت مجموعه داده‌ای شامل تمام پارامترهای ذکر شده در بازه زمانی مشخص حاصل گردید، که در نهایت مجموعه داده‌ای شامل ۷۳۰ روز حاصل شده است.

^۱ Rawinsonde observation

فصل چہارم

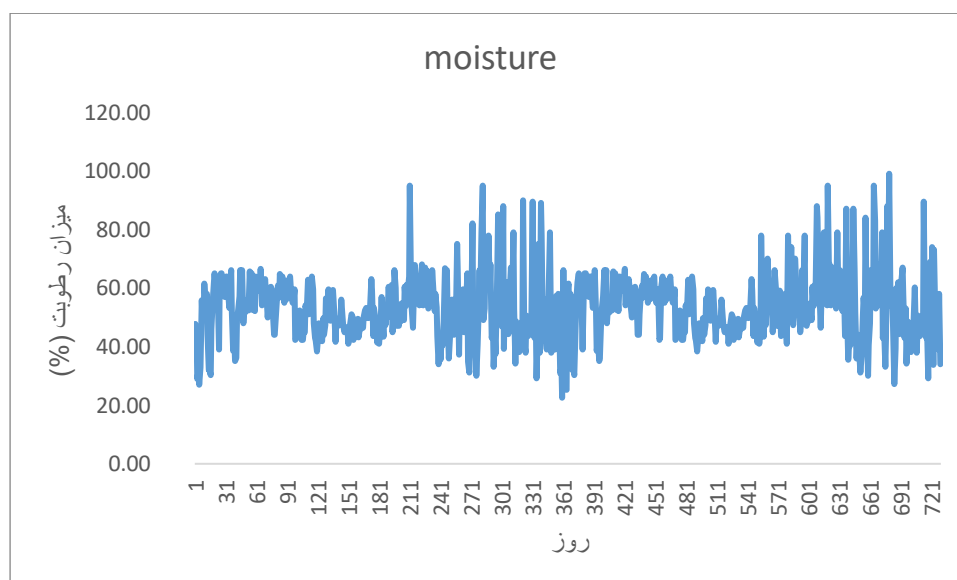
تخلیسی نتائج تحقیق

۴-۱- مقدمه

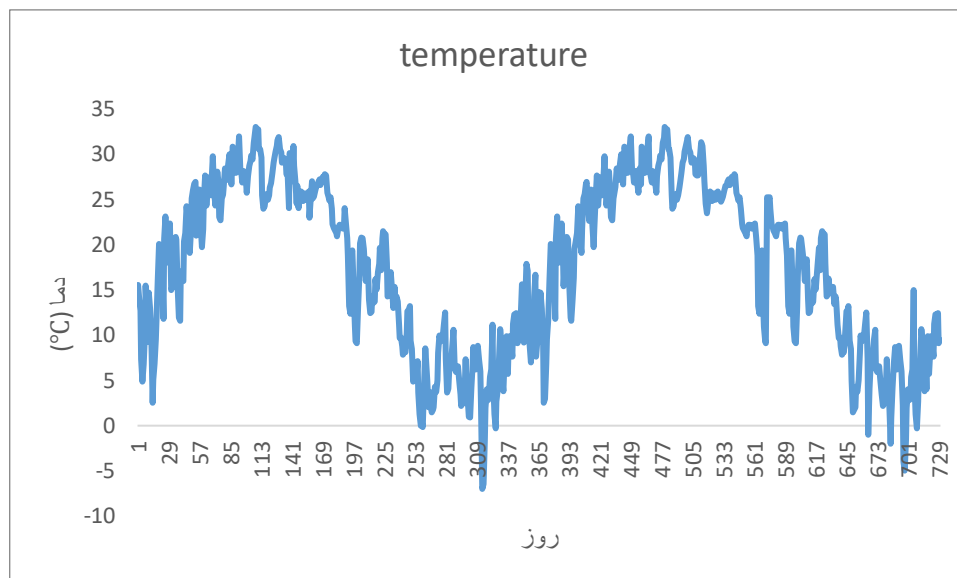
در این فصل به بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر آلاینده‌های آلودگی هوای شهر مشهد و میزان همبستگی آن‌ها و سپس به پیش‌بینی و مدل‌سازی آلودگی هوا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی در سالهای ۹۵ و ۹۶ پرداخته می‌شود این دو مدل با یکدیگر مقایسه می‌گردند و در پایان پیش‌بینی سری زمانی برای پنج روز بعد مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۴-۲- پارامترهای اقلیمی و نتایج حاصل از آن

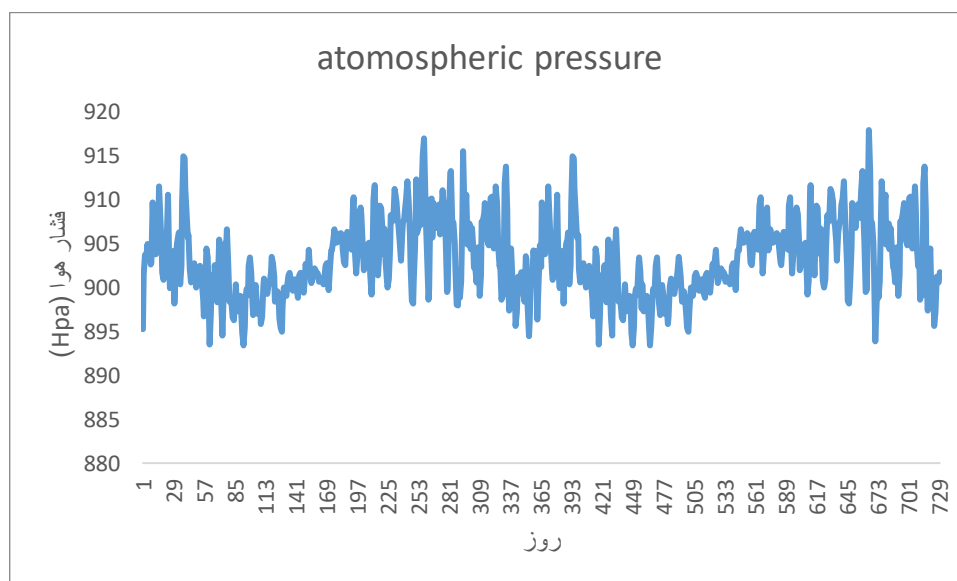
نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی شهر مشهد و تغییرات میزان در صد رطوبت، دمای هوا، فشار هوا و سرعت باد در سال ۹۶ در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۵) ارائه شده است. بررسی این عامل از این نظر مهم است که بارندگی نقش مهمی را در شستن آلاینده‌های هوا دارد. سرعت نسبی زیاد باد در فصول بهار و تابستان، کمتر شدن غلظت برخی آلاینده‌ها را در پی دارد.



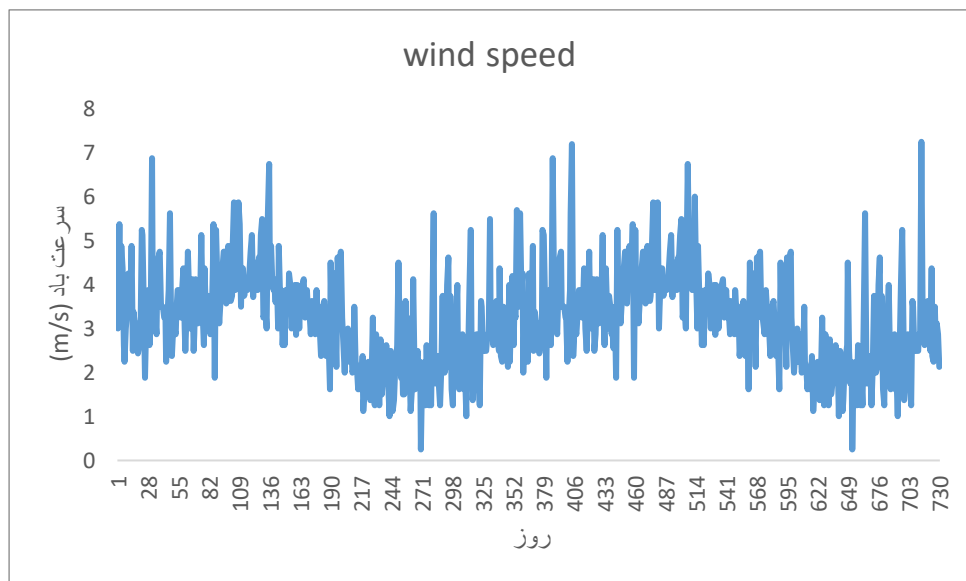
شکل ۴-۱: تغییرات درصد رطوبت در طول سالهای ۹۵ و ۹۶



شکل ۴-۳: تغییرات درجه حرارت (°C) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶



شکل ۴-۴: تغییرات فشار هوا (Hpa) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶



شکل ۴-۵: تغییرات سرعت باد (m/s) در طول سالهای ۹۵ و ۹۶

یکی از مسائل مهم در بررسی پتانسیل تجمع آلاینده‌ها در هر منطقه، بررسی همبستگی بین عوامل هواشناسی و همچنین میزان آلاینده‌ها در آن منطقه است.. باهدف بررسی و تعیین میزان همبستگی تغییرات روزانه آلاینده‌ها و عوامل اقلیمی از نرم‌افزار MINITAB17 استفاده شد. در جدول (۴-۱) به‌عنوان نمونه ضرایب همبستگی برخی آلاینده‌های شاخص آلودگی هوای شهر مشهد با عوامل اقلیمی را در سال ۹۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: همبستگی آلاینده‌ها و پارامترهای هواشناسی در سال ۹۶

پارامتر	مشخصه آماری	ذرات معلق PM2.5	ذرات معلق PM10	مونوکسید کربن	ازون
دما	Correlation	۰/۷۲۲	۰/۵۵۲	-۰/۱۹۴	۰/۱۰۲
	P-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸۹	۰/۳۹۵
سرعت باد	Correlation	۰/۰۶۷	۰/۰۹۱	-۰/۲۴۴	۰/۲۷۹
	P-value	۰/۶۹	۰/۴۲۱	۰/۱۲۴	۰/۰۱۸
فشار هوا	Correlation	-۰/۵۲۳	-۰/۳۵۹	-۰/۰۳۹	۰/۲۷۱
	P-value	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۷۴۷	۰/۰۲۱
رطوبت	Correlation	-۰/۵۲۸	-۰/۳۳۹	۰/۱۵۸	۰/۶۱۷
	P-value	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۴۷۴	۰/۰۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت باد برای اغلب آلاینده‌ها نقش کاهش دهنده دارد. در درجه حرارت‌های بالا غلظت ذرات بزرگتر از ۱۰ میکرومتر افزایش می‌یابد. همچنین فاکتور فشار هوا با غلظت ذرات معلق PM₁₀ رابطه عکس دارند. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشتر شدن میزان رطوبت همگام با افزایش نرخ انجام واکنش‌های شیمیایی باعث ازدیاد غلظت آلاینده‌ی ازون می‌شود.

۴-۳- بررسی تغییرات آلودگی هوای شهر مشهد

به‌منظور بررسی و تحقیق در تاریخچه روند تغییرات آلودگی هوا در شهر مشهد نیاز به آمار و داده‌های گسترده‌ای در ارتباط با غلظت آلاینده‌های مختلف در طی سالیان متمادی است که متأسفانه چنین داده‌های به علت تازه تاسیس بودن اکثر ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در شهر مشهد و عدم عملکرد صحیح دستگاه‌های سنجش، موجود نیست. از بین ایستگاه‌های مختلف کامل‌ترین اطلاعات و آمار مربوط به ایستگاه سجاد واقع در مجموعه ورزشی سجاد است. بنابراین بررسی‌ها در این تحقیق تماماً مربوط به ایستگاه سجاد و در سال‌های ۹۵ و ۹۶ است.

۴-۴- بررسی همبستگی عوامل اقلیمی و غلظت آلاینده‌ها

دسته‌ای مهم از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر آلودگی هوای هر منطقه عوامل اقلیمی می‌باشند که از طریق سازوکارهای مختلف بر کیفیت هوا و کاهش یا افزایش آلاینده‌های آن تأثیرگذارند. جدول ۴-۲ توصیف آماری داده‌های مربوط به ارتباط پارامترهای اقلیمی با یکدیگر را در قالب میران همبستگی آن‌ها در سه ماه اول سال ۱۳۹۶ بیان می‌کند.

جدول ۴-۲: همبستگی بین پارامترهای هواشناسی

پارامتر		فروردین	اردیبهشت	خرداد
دما، رطوبت	Correlation	-۰/۸۴۶	-۰/۷۲۵	-۰/۸۴۰
	P-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
دما، فشار	Correlation	-۰/۵۷۳	-۰/۶۸۸	-۰/۶۰۵
	P-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
دما، سرعت باد	Correlation	۰/۱۷۱	-۰/۰۵۵	۰/۱۳۵
	P-value	۰/۰۰۸	۰/۷۷۳	۰/۴۷۸
دما، بارندگی	Correlation	-۰/۳۵۹	-۰/۱۰۵	-۰/۰۷۴
	P-value	۰/۰۰	۰/۵۸۴	۰/۷۴۰
بارندگی، فشار	Correlation	-۰/۰۸۴	۰/۴۸۸	۰/۳۲۰
	P-value	۰/۵۲۰	۰/۰۱۵	۰/۰۸۴
رطوبت، سرعت باد	Correlation	-۰/۱۸۹	۰/۱۲۵	۰/۰۸۹
	P-value	۰/۰۰۳	۰/۵۰۲	۰/۶۵۰
رطوبت، بارندگی	Correlation	۰/۳۳۶	۰/۴۰۰	۰/۳۰۵
	P-value	۰/۰۰	۰/۰۲۱	۰/۱۱۰
فشار، رطوبت	Correlation	۰/۴۸۰	۰/۱۸۸	۰/۲۵۰
	P-value	۰/۰۰	۰/۰۴۱	۰/۰۲۱
فشار، سرعت باد	Correlation	-۰/۰۱۰	۰/۰۹۵	۰/۰۶۴
	P-value	۰/۸۸۲	۰/۳۰۶	۰/۴۵۵
سرعت باد، بارندگی	Correlation	-۰/۰۴۹	۰/۱۸۶	۰/۱۳۲
	P-value	۰/۵۸۵	۰/۳۸۴	۰/۴۶۵

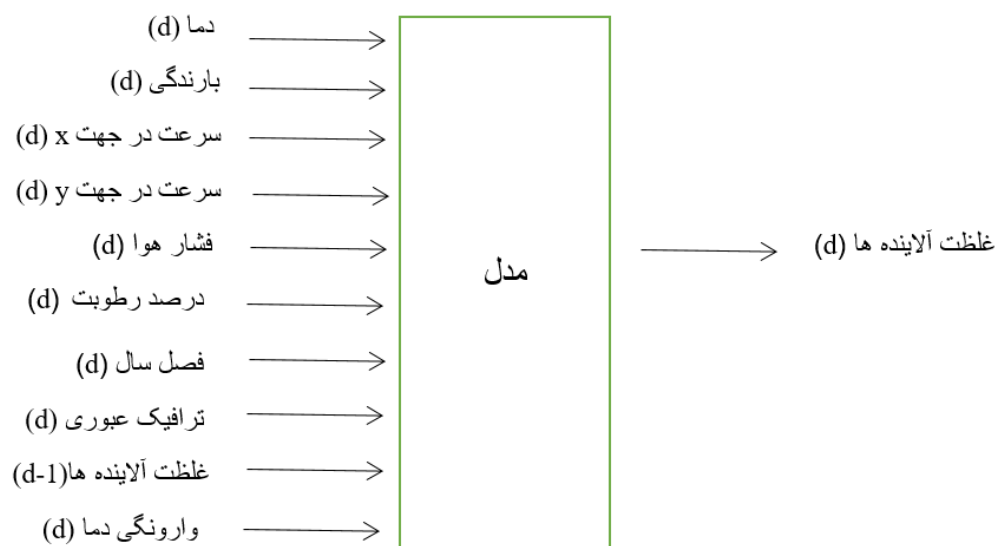
از اطلاعات جدول (۴-۲) این طور نتیجه می شود که دما با پارامترهای درصد رطوبت و فشار هوا رابطه معکوس دارد. ارتباط عکس دما با رطوبت با توجه به ارقام بیان شده مشهود است.

۴-۵- مدل سازی آلودگی هوا با توجه به پارامترهای اقلیمی

یکی از اهداف اساسی در بررسی های آماری، یافتن رابطه بین دو یا چند متغیر است. این رابطه

می‌تواند به صورت‌های مختلف از جمله رابطه خطی یا غیرخطی ظاهر شود. در این قسمت برای مدل‌سازی آلاینده‌های شاخص هوای شهر مشهد با عوامل اقلیمی از دو مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) استفاده شده است. آلاینده‌های استفاده شده شامل مونوکسید کربن، ذرات با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر و اوزون هستند. داده‌های اقلیمی استفاده شده در مدل‌سازی نیز شامل جهت باد، سرعت باد بر حسب m/s، دما بر حسب °C، بارندگی بر حسب mm، رطوبت بر حسب درصد و فشار هوا بر حسب mbar یا هکتوپاسکال می‌باشند.

روند کلی استفاده از پارامترهای ورودی در مدل جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های CO، PM₁₀ و O₃ مطابق شکل ۴-۶ صورت می‌گیرد.



شکل ۴-۶: شمای کلی استفاده از پارامترهای ورودی در مدل جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها

در این پژوهش با هدف ارزیابی شبکه عصبی با تعداد لایه‌های پنهان مختلف، از شبکه عصبی مصنوعی دارای یک، دو، سه و چهار لایه پنهان جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها استفاده گردید. برای پیش‌بینی این غلظت‌ها، از داده‌های هواشناسی و سایر موارد گفته شده در جدول (۳-۴) به عنوان داده ورودی به شبکه عصبی استفاده شد. شبکه با تعداد نرون‌ها، توابع انتقال، توابع فعال‌سازی و دوره‌های تکرار مختلف آموزش داده شد که در نهایت شبکه با تعداد نرون‌های مختلف (در لایه مخفی) برای هر

آلاینده، تابع انتقال هایپر تانژانت و تابع فعال سازی خروجی Linear با دوره تکرار ۵۰۰ مرتبه برای ایجاد شبکه عصبی تشکیل گردید. لازم به ذکر است عملیات مدل سازی شبکه عصبی با نرم افزار Alyuda NeuroIntelligence انجام شده است.

در جدول ۳-۴ پارامترهای مختلف مورد استفاده برای ایجاد شبکه عصبی مورد نظر و ویژگی های آماری مربوط به هر یک از آنها آورده شده اند.

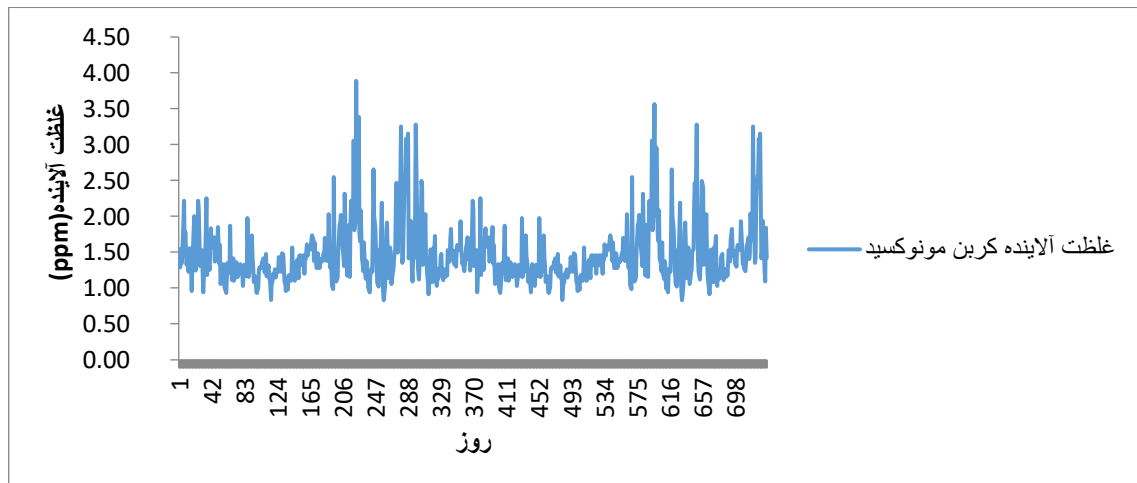
جدول ۳-۴: خصوصیات آماری پارامترهای استفاده شده در شبکه عصبی

انحراف معیار	میانگین	محدوده	واحد	پارامتر
۲۲/۶۴	۵۳/۸۳	(۹/۷۵، ۱۷۷/۹۷)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	غلظت آلاینده در روز قبل
۱،۵۵۸	۱/۴۵۵	(-۸/۶۶، ۶/۴۸)	m/s	سرعت باد در جهت y
۱/۷۰	۰/۳۵	(-۵/۰۵، ۷/۰)	m/s	سرعت باد در جهت x
۱۰/۲۹	۱۸/۷۲	(-۳/۲، ۴۰)	$^{\circ}\text{C}$	دما
۴/۶۷	۹۱۴/۳۰	(۸۹۱/۵، ۹۲۰)	Hpa ^۱	فشار
۱/۰۰۴	۰/۶۹	(۰، ۱۶)	mm	بارندگی
۲۵/۴۸	۳۹/۳۰	(۱۰، ۱۰۰)	%	رطوبت
-	-	{۰، ۱}		ترافیک عبوری
-	-	{۰، ۱، ۲، ۳}		فصل سال
-	-	{۰، ۱}		وارونگی دما

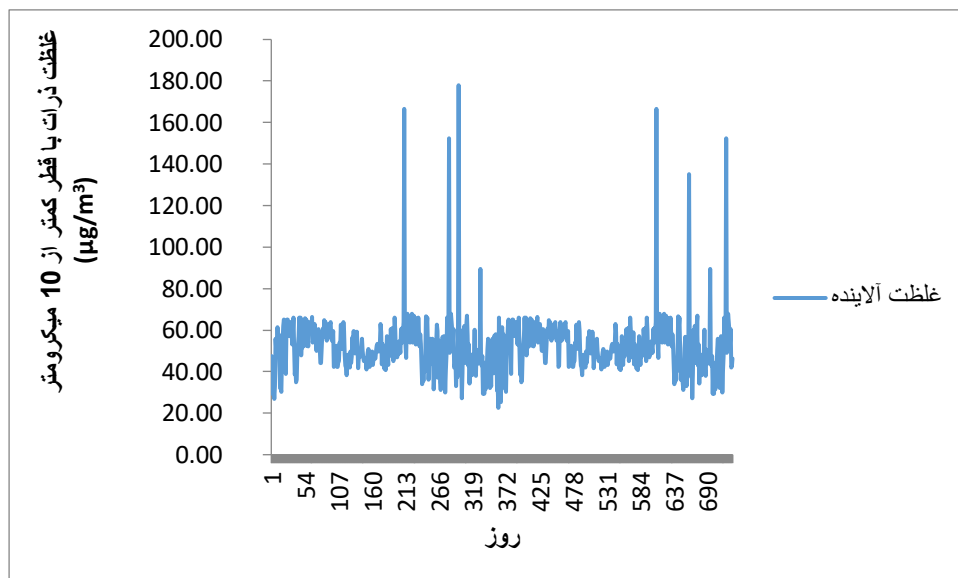
در ادامه نتایج حاصل از استفاده از مدل های رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی غلظت آلاینده های مربوط به هوای شهر مشهد، برای سه آلاینده کربن مونوکسید، ذرات معلق کوچک تر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10}) و اوزون آمده است. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا گزارش شده و در شکل های (۷-۴) تا (۱۲-۴) میانگین غلظت واقعی روزانه مونوکسید کربن و

^۱ Hectopascal (1Hpa=100 pa)

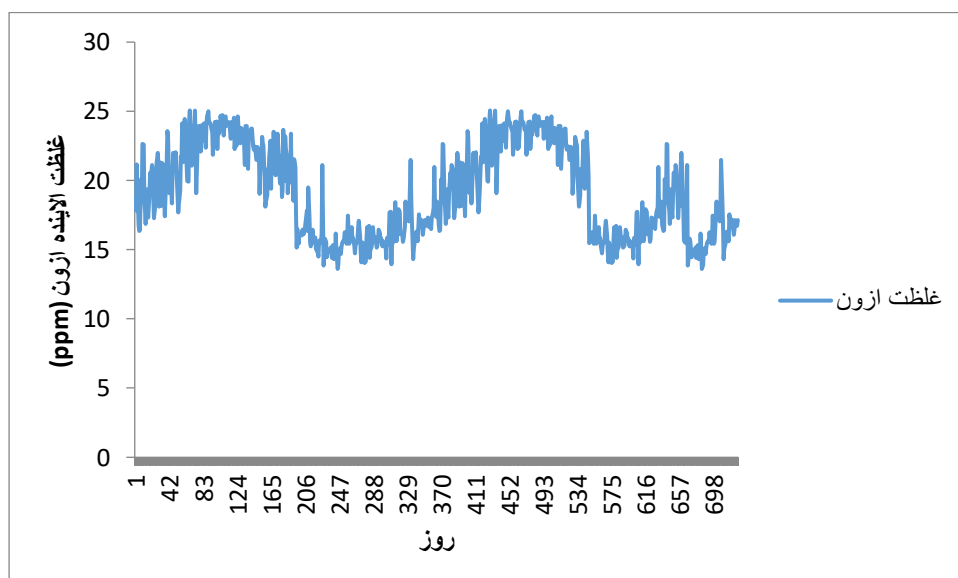
ذرات PM_{10} و اوزون ثبت شده در ایستگاه سنجش آلودگی هوا سجاد و غلظت های پیش بینی شده توسط رگرسیون ارائه شده است. همان گونه که در این شکل ها مشاهده می شود نتایج پیش بینی مدل با مقادیر اصلی غلظت ها، تطابق دقیقی ندارد. این امر حاکی از آن است که مدل رگرسیونی در بررسی تاثیر عوامل اقلیمی بر آلاینده های هوا در شهر مشهد از دقت بالایی برخوردار نیست. میزان میانگین ماهیانه تغییرات آلاینده های هوای شهر مشهد در ایستگاه سنجش آلودگی سجاد شکل های (۴-۷) و (۴-۸) آورده شده است.



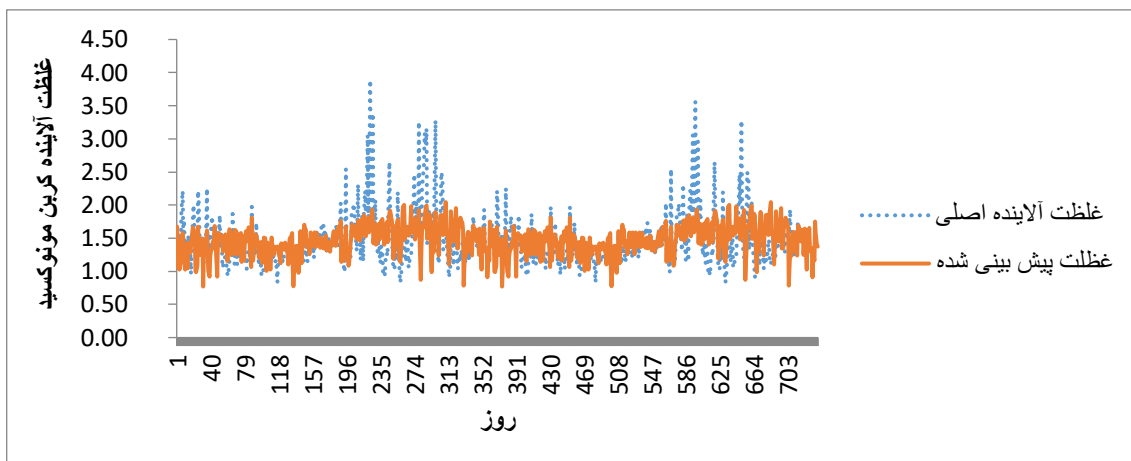
شکل ۴-۷: تغییرات غلظت آلاینده CO در سال های ۹۵ و ۹۶



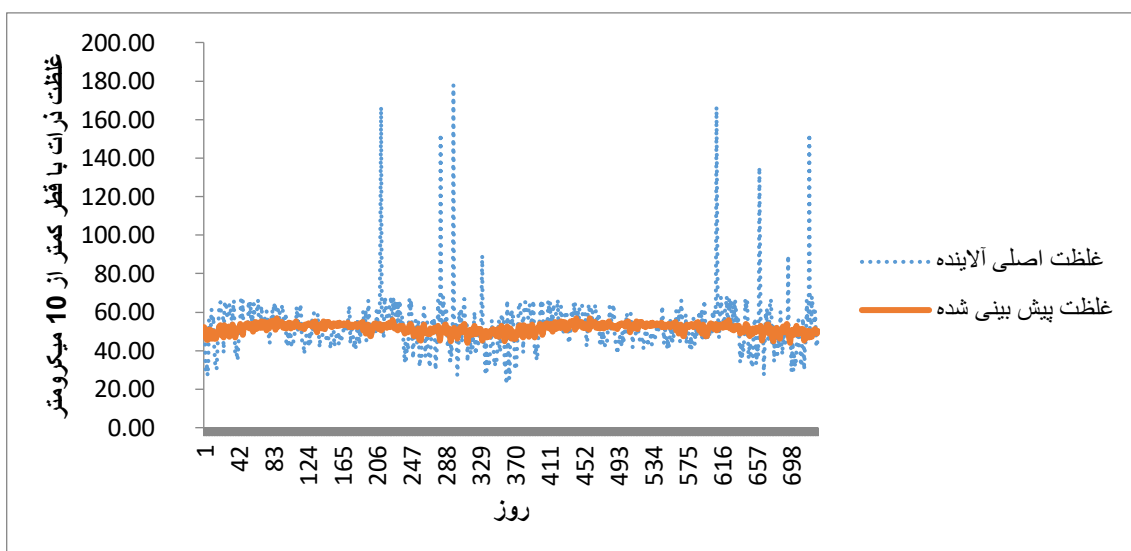
شکل ۴-۸: تغییرات غلظت آلاینده PM_{10} در سال های ۹۵ و ۹۶



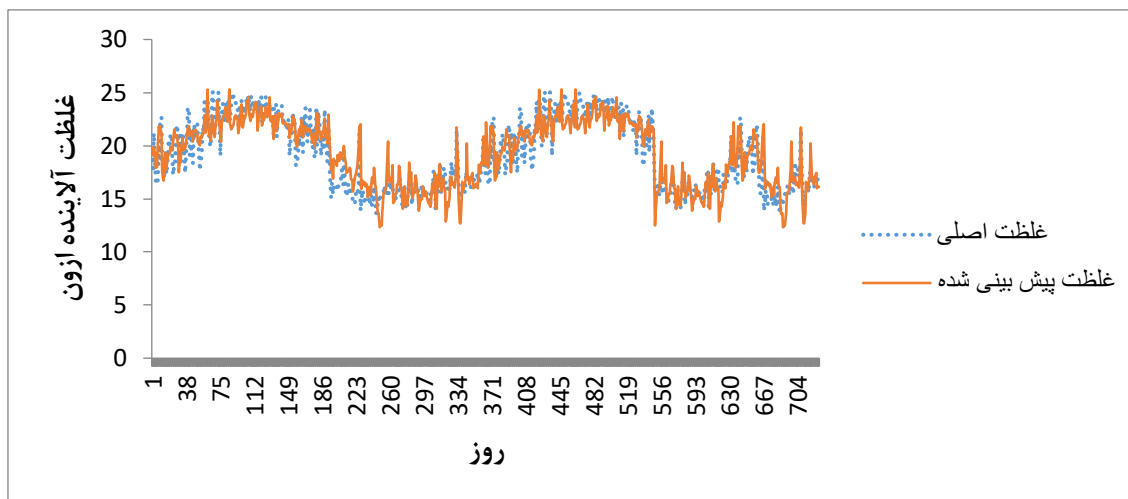
شکل ۴-۹: تغییرات غلظت آلاینده O_3 در سال های ۹۵ و ۹۶



شکل ۴-۱۰: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی‌شده در مدل رگرسیون برای CO



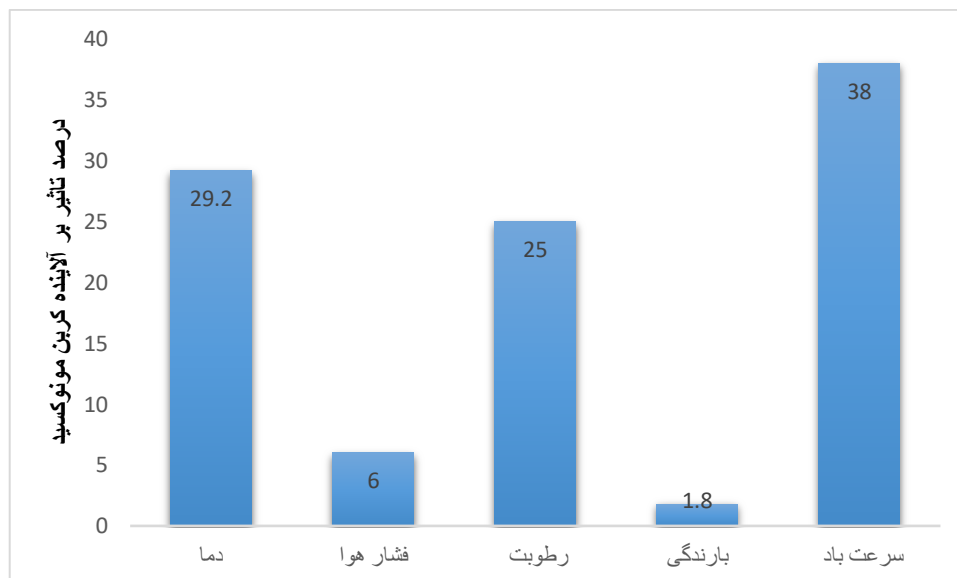
شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی‌شده در مدل رگرسیون برای PM₁₀



شکل ۴-۱۲: نمودار مقایسه غلظت آلاینده‌های اصلی با مقدار پیش‌بینی‌شده در مدل رگرسیون برای O_3

همان‌طور که در نتایج آمده است، ضریب همبستگی در مدل‌سازی شبکه عصبی برای PM_{10} ، ۰/۹۶ محاسبه‌شده است. این رقم در مقایسه با ضریب همبستگی حاصل از کاربرد مدل رگرسیون ۰/۶۸ درصد است. رقم بزرگ‌تری است که بیانگر دقت بیشتر شبکه عصبی در پیش‌بینی غلظت این آلاینده نسبت به مدل رگرسیون خطی است. ضریب همبستگی برای آلاینده CO به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۷۱ برای هر یک از مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون است. این مقادیر برای آلاینده O_3 برابر ۰/۹۸ و ۰/۷۵ است.

در شکل (۴-۱۳) درصد تاثیر پارامترهای اقلیمی در پیش‌بینی غلظت روزانه مونوکسید کربن ارائه گردیده است.



شکل ۴-۱۳: درصد تأثیر پارامترهای اقلیمی در پیش‌بینی غلظت روزانه مونوکسید کربن

همان‌طور که در شکل (۴-۱۱) دیده می‌شود سرعت باد با ۳۸ درصد سهم، بیشترین تأثیر را بر غلظت مونوکسید کربن داشته است. پس‌از آن به ترتیب پارامترهای دما، رطوبت، فشار و بارندگی در این رابطه دارای اهمیت نسبی بیشتری بودند.

با مقایسه نمودارهای مربوط به همبستگی در مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی، دقت بیشتر مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی میانگین غلظت روزانه مونوکسید کربن به وضوح مشخص می‌گردد. ناچندرا در تحقیق خود در شهر دهلی، مدل شبکه عصبی را در پیش‌بینی غلظت مونوکسید کربن نسبت به مدل رگرسیونی به‌عنوان محاسبه‌ای دقیق‌تر نام برد [۳۴].

باد به‌عنوان یکی از پارامترهای اقلیمی در پراکندگی آلاینده‌ها و اختلاط افقی آن‌ها نقش بسیار مهمی را دارد. دما نیز بر نرخ واکنش‌های شیمیایی تأثیر گذاشته و در نتیجه غلظت آلاینده از جمله مونوکسید کربن را تغییر می‌دهد. به‌عنوان مثال با کاهش دما در نزدیکی سطح زمین احتمال وقوع وارونگی حرارتی افزایش می‌یابد که در نتیجه آن اختلاط عمودی هوا صورت نمی‌پذیرد. این امر سبب تجمع آلاینده‌ها می‌گردد. در شرایط آسمان صاف، به‌خصوص زمانی که رطوبت اتمسفر کم باشد و این پدیده نیز سبب ایجاد وارونگی دما، عدم اختلاط عمودی جو و در نتیجه تجمع و افزایش غلظت آلاینده‌ها از جمله مونوکسید کربن می‌شود [۳۶].

۴-۶- مراحل ساخت شبکه عصبی

پس از مرتب کردن مجموعه داده‌های هواشناسی و غلظت آلاینده‌های موردنظر، اقدام به آموزش شبکه عصبی گردید. در ابتدایی‌ترین گام لازم است ورودی‌های مدل انتخاب شود. برای آماده سازی شبکه عصبی در بخش آموزش می‌بایست از مجموعه داده‌های اصلی و اندازه‌گیری شده، بخشی برای ورود به شبکه در نظر گرفته شوند. همان‌طور که قبل تر اشاره شد، شبکه‌های عصبی از نوع مدل‌های آماری- تجربی می‌باشند و بر اساس مثال‌های واقعی مثل مغز انسان فرآیند یادگیری را انجام می‌دهند. پس به‌ظاهر هر قدر که داده‌های واقعی بیشتری به آن‌ها آموزش داده شود، می‌بایست نتایج مدل‌سازی‌ها بهتر شوند. اما به دلیل وجود تغییرات سریع و روند متفاوت شرایط ترافیکی و پراکندگی منابع آلاینده شهری در مشهد، حجم ورودی داده‌های واقعی به مدل‌ها در قسمت آموزش شبکه‌ها باید مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

بنابراین به بررسی مدل‌سازی روزها و ماه‌های سال پرداخته و نهایتاً نحوه انتخاب پارامترهای ورودی هواشناسی معرفی شده است. شبکه‌های عصبی MLP همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد از لایه‌های ورودی، خروجی و چندین لایه مخفی تشکیل شده‌اند. هم‌چنین بر روی تمام لایه‌ها نرون‌ها قرار گرفته‌اند. تعداد نرون‌های لایه ورودی برحسب شرایط مسئله تعیین شده است. تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر با تعداد پارامترهای ورودی شبکه است، اما تعداد لایه مخفی شبکه‌ها، پارامتر بسیار تعیین‌کننده‌ای بر روی عملکرد شبکه‌ها است و باید از طریق آزمون و خطا پیدا شود. پس از این مرحله و بهینه شدن ساختار، شبکه‌ها آماده استفاده برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها هستند.

ویژگی آماری غلظت اندازه‌گیری شده برای ۳ آلاینده مورد مطالعه و ۵ پارامتر اصلی هواشناسی و سایر فاکتورهای مورد استفاده در مدل‌سازی که در شکل ۴-۶ به آن اشاره شده است، در ایستگاه سنجش آلودگی هوای سجاد که در این مطالعه مدنظر است، ثبت گردیده است. آمار ثبت‌شده بالا بودن نسبی سطوح آلاینده‌های هوا را در مشهد را نشان می‌دهد. هم‌چنین انحراف معیار زیاد داده‌های

هواشناسی و غلظت آلاینده‌ها و مقادیر میانگین آن‌ها، بیان‌کننده‌ی تغییرات فصلی شدید در شرایط آب و هوایی شهر مشهد است.

۴-۷- پیش‌بینی بر اساس شبکه عصبی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در روند ساخت و تشکیل مدل شبکه عصبی، اولین و مهم‌ترین مرحله، انتخاب مناسب داده‌های آموزش، اعتبار سنجی و صحت سنجی و همچنین حجم مطلوب این داده‌ها است. تقسیم‌بندی مناسب داده‌های ورودی به داده‌های آموزش، اعتبار سنجی و صحت سنجی در برخی شرایط به صورت تصادفی از میان داده‌های موجود انتخاب می‌شود و در برخی موارد بر اساس اهداف مسئله مورد مطالعه توسط کاربر تعیین می‌شود. از آنجایی که در بحث پیش‌بینی آلودگی‌های هوا فرض بر این است که متغیرهای هواشناسی با استفاده از روش‌های متداول در هواشناسی برای آینده با دقت خوبی قابل پیش‌بینی است، لذا در استفاده از روش شبکه‌های عصبی هدف پیش‌بینی آلودگی‌ها برای بازه موردنظر (پنج روز) در آینده است.

در شبکه موردنظر ۷۰ درصد داده‌های بعنوان داده‌ی آموزش و ۱۵ درصد بعنوان اعتبار سنجی و ۱۵ درصد داده‌ها بعنوان داده‌های صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در روش شبکه عصبی علاوه بر اهمیت نوع داده‌های ورودی و تقسیم‌بندی داده‌ها انتخاب تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در هر لایه، نوع توابع انتقال و تابع آموزش شبکه عصبی هم از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو در این تحقیق برای آلاینده‌های CO، PM₁₀ و O₃، شبکه‌های عصبی مختلف و با در نظر گرفتن یک، دو، سه و چهار لایه پنهان ساخته شده‌اند. برای پیدا کردن ساختار مناسب شبکه عصبی متناظر با هر کدام یک از حالت‌های اشاره شده از روش آزمون و خطا استفاده شده است. به طور متوسط برای هر حالت تقریباً ۱۰۰ شبکه عصبی ساخته شده و بهترین شبکه از میان مدل‌های ساخته شده بعنوان شبکه بهینه متناظر و تعداد لایه موردنظر انتخاب شده است، معیار مورد استفاده برای مقایسه شبکه‌های مختلف و انتخاب شبکه بهینه شامل سه معیار ضریب همبستگی

(R)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) است.

به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از شاخص های زیر استفاده می کنیم.

روش اول: شاخص های مختلفی برای بررسی کیفیت پیش بینی استفاده می گردد. در اینجا از سه شاخص RMSE، MAE و R استفاده می گردد. نحوه محاسبه این شاخص ها به ترتیب به صورت معادلات (۱-۴) و (۳-۴) می باشند [۳۸].

• میانگین خطای مطلق (MAE): این شاخص نشان دهنده میانگینی از تفاوت میان مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی است. مقدار این شاخص هرچه کمتر باشد، مطلوبتر است.

$$MAE = \frac{1}{P} (\sum_{i=1}^P |t_i - y_i|) \quad (1-4)$$

• مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE): این شاخص نشان دهنده مجذور میانگین مربعات تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی است. مقدار این شاخص هرچه کمتر باشد، مطلوب تر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P |t_i - y_i|^2} \quad (2-4)$$

ضریب همبستگی (R): این شاخص به منظور تعیین همبستگی میان دو متغیر (مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی) است. مقدار این شاخص هرچه بیشتر باشد، مطلوب تر است.

$$R = \frac{R_{yt}}{std(y)std(t)} \quad (4-3)$$

در روابط بالا، p تعداد داده ها، y مقدار به دست آمده برای پیش بینی داده i ام، t مقدار واقعی مشاهده

شده برای داده ام، R_{yt} نشان دهنده کواریانس بین مقادیر پیش بینی شده و واقعی است و std نشانه انحراف معیار است. در ادامه نتایج مربوط به مدل سازی های انجام شده، در جدول ها و شکل های مربوطه برای آلاینده های CO، PM₁₀ و O₃ ارائه شده است.

۴-۷-۱- پیش بینی آلاینده CO

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی شبکه های عصبی آلاینده CO با ساختارهای متفاوت شبکه در جدول های ۴-۴ تا ۶-۴ نشان داده شده است. به طوری که شبکه ها با تعداد لایه های پنهان متفاوت ایجاد شدند و بین نتایج حاصل شده با استفاده از نمودار مقایسه هایی صورت گرفته است. همچنین شکل های ۴-۱۸ تا ۴-۲۱ نشان دهنده مقایسه ی بین مقدار پیش بینی شده و مقدار اصلی غلظت آلاینده های مدنظر در شبکه عصبی مصنوعی است.

جدول ۴-۴: مقادیر R برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO

ضریب همبستگی	یک لایه پنهان (۱-۵-۱۰)	دو لایه پنهان (۱-۷-۱۱-۱۰)	سه لایه پنهان (۱-۳-۶-۹-۱۰)	چهار لایه پنهان (۱-۲-۳-۵-۱۲-۱۰)
صحت سنجی	۰/۷۷۵۵	۰/۷۸۹۵	۰/۹۱۱۵	۰/۶۱۱۸
اعتبار سنجی	۰/۷۱۴۵	۰/۷۲۶۴	۰/۷۸۱۸	۰/۵۷۳۱
آموزش	۰/۸۲۸۵	۰/۹۶۵۹	۰/۹۹۰۴	۰/۹۷۵۶
کل	۰/۸۰۷۰	۰/۹۰۲۶	۰/۹۷۱۲	۰/۸۶۸۶
آرایش نرونها لایه ها	۱۰-۵-۱	۱۰-۱۱-۷-۱	۱۰-۹-۳-۱	۱۰-۱۲-۵-۳-۲-۱

جدول ۴-۵: مقادیر MAE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO

میانگین خطا مطلق	یک لایه پنهان (۱۰-۵-۱)	دو لایه پنهان (۱۰-۱۱-۷-۱)	سه لایه پنهان (۱۰-۹-۶-۳-۱)	چهار لایه پنهان (۱۰-۱۲-۵-۳-۲-۱)
صحت‌سنجی	۰/۱۱۶	۰/۰۹۵	۰/۰۸۵	۰/۰۹۷
اعتبارسنجی	۰/۱۴۱	۰/۱۱۴	۰/۱۰۷	۰/۱۲۸
آموزش	۰/۱۰۹	۰/۱۰۴	۰/۱۰۱	۰/۱۰۴
کل	۰/۱۱۵	۰/۱۰۴	۰/۰۹۹	۰/۱۰۹

جدول ۴-۶: مقادیر RMSE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای CO

جذر میانگین مربعات خطا	یک لایه پنهان (۱۰-۵-۱)	دو لایه پنهان (۱۰-۱۱-۷-۱)	سه لایه پنهان (۱۰-۹-۶-۳-۱)	چهار لایه پنهان (۱۰-۱۲-۵-۳-۲-۱)
صحت‌سنجی	۰/۱۷۲	۰/۱۵۲	۰/۱۴۵	۰/۱۵۳
اعتبارسنجی	۰/۱۹۰	۰/۱۶۴	۰/۱۵۴	۰/۱۷۰
آموزش	۰/۱۳۷	۰/۱۳۲	۰/۱۳۰	۰/۱۳۴
کل	۰/۱۵۲	۰/۱۴۱	۰/۱۳۷	۰/۱۴۴

نتایج مقدار ضریب همبستگی و خطاهای مربوط به هر یک از مقادیر اجرا شده در هر یک از چهار مدل با توجه به ساختار نرون های شبکه عصبی برای آلاینده CO در جدول ۴-۷ تا ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۷: پارامترهای آماری به ازای ساختاره های مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای آلاینده CO

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۱-۱	۰/۷۹۲	۰/۱۲۱	۰/۱۵۷
۱۰-۲-۱	۰/۷۸۹	۰/۱۲۵	۰/۱۶۲
۱۰-۳-۱	۰/۷۷۷	۰/۱۳۰	۰/۱۷۱
۱۰-۴-۱	۰/۷۷۱	۰/۱۳۵	۰/۱۸۰
۱۰-۵-۱	۰/۸۰۷	۰/۱۱۵	۰/۱۵۲
۱۰-۶-۱	۰/۷۹۶	۰/۱۱۰	۰/۱۴۵
۱۰-۷-۱	۰/۷۷۳	۰/۱۳۱	۰/۱۶۹
۱۰-۸-۱	۰/۷۳۰	۰/۲۲۰	۰/۱۸۵
۱۰-۹-۱	۰/۷۴۰	۰/۱۸۴	۰/۱۶۸
۱۰-۱۰-۱	۰/۷۵۵	۰/۱۳۹	۰/۱۷۹

یک لایه پنهان

جدول ۴-۸: پارامترهای آماری به ازای ساختاره های مختلف شبکه عصبی با دو پنهان برای آلاینده CO

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱	۰/۵۹۵	۰/۲۷۰	۰/۳۴۵
۱۰-۳-۱-۱	۰/۶۱۵	۰/۲۵۶	۰/۳۳۰
۱۰-۴-۳-۱	۰/۶۳۵	۰/۲۵۴	۰/۳۲۵
۱۰-۴-۱-۱	۰/۶۳۸	۰/۲۵۵	۰/۳۲۹
۱۰-۷-۵-۱	۰/۷۲۵	۰/۱۸۴	۰/۲۶۰
۱۰-۸-۴-۱	۰/۷۸۰	۰/۱۸۰	۰/۲۵۵
۱۰-۹-۴-۱	۰/۸۹۵	۰/۱۰۶	۰/۱۵۵
۱۰-۱۱-۷-۱	۰/۹۰۲	۰/۱۰۴	۰/۱۴۱
۱۰-۱۱-۴-۱	۰/۸۷۱	۰/۱۲۶	۰/۱۷۱
۱۰-۱۱-۳-۱	۰/۸۶۵	۰/۱۳۵	۰/۱۷۹

۲ لایه پنهان

جدول ۹-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای آلاینده CO

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱-۱	۰/۶۵۰	۰/۲۹۰	۰/۳۴۰
۱۰-۵-۴-۲-۱	۰/۶۶۲	۰/۲۸۸	۰/۳۳۵
۱۰-۶-۵-۴-۲-۱	۰/۶۶۹	۰/۲۷۷	۰/۳۲۸
۱۰-۶-۴-۱-۱	۰/۶۹۲	۰/۲۴۵	۰/۳۲۰
۱۰-۸-۴-۲-۱	۰/۷۰۵	۰/۱۹۹	۰/۳۱۰
۱۰-۸-۳-۲-۱	۰/۷۴۰	۰/۱۶۸	۰/۲۸۵
۱۰-۱۱-۵-۴-۱	۰/۹۲۲	۰/۱۲۶	۰/۱۴۲
۱۰-۱۱-۴-۳-۱	۰/۸۹۹	۰/۱۳۸	۰/۱۵۵
۱۰-۹-۶-۳-۱	۰/۹۷۱	۰/۰۹۹	۰/۱۳۷
۱۰-۱۲-۴-۳-۱	۰/۹۰۳	۰/۱۲۸	۰/۱۵۲

۳ لایه پنهان

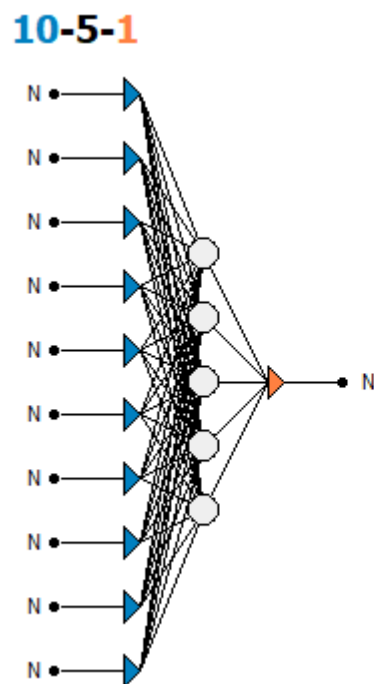
جدول ۱۰-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان برای آلاینده CO

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۳-۲-۲-۱	۰/۶۰۵	۰/۳۰۵	۰/۳۴۵
۱۰-۴-۳-۳-۲-۱	۰/۶۰۶	۰/۳۰۳	۰/۳۳۹
۱۰-۴-۳-۲-۱-۱	۰/۶۴۵	۰/۲۹۱	۰/۲۹۸
۱۰-۶-۴-۳-۲-۱	۰/۶۵۴	۰/۲۸۵	۰/۲۸۸
۱۰-۷-۶-۴-۱-۱	۰/۷۰۲	۰/۲۴۴	۰/۲۷۲
۱۰-۸-۶-۴-۲-۱	۰/۷۳۲	۰/۲۳۱	۰/۲۶۵
۱۰-۸-۵-۳-۱-۱	۰/۷۷۵	۰/۱۸۴	۰/۲۰۵
۱۰-۱۱-۴-۳-۲-۱	۰/۸۱۲	۰/۱۲۵	۰/۱۷۷
۱۰-۱۲-۶-۴-۳-۱	۰/۸۵۲	۰/۱۱۵	۰/۱۶۵
۱۰-۱۲-۵-۳-۲-۱	۰/۸۶۸	۰/۱۰۹	۰/۱۴۴

۴ لایه پنهان

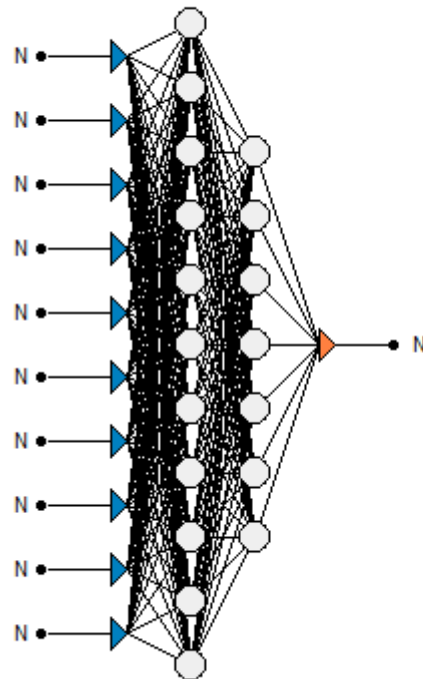
همانطور که دیده می‌شود، برای آلاینده CO در شبکه عصبی و در حالت بهینه مقادیر R و RMSE

۰/۹۷ و ۰/۱۳۷ و این در حالی است که در مدل پیش‌بینی رگرسیون این مقادیر ۰/۷۱ و ۰/۵۷۲ محاسبه شده‌اند. مشاهده می‌شود شبکه‌های با ۲ و ۳ لایه پنهان عملکرد دقیق‌تری را نسبت به موارد دیگر داشته‌اند. تعداد نرون‌ها برای شبکه با دو لایه پنهان ۱۱ و ۷ نرون و برای شبکه با سه لایه پنهان به ترتیب ۹، ۶ و ۳ نرون برای لایه‌های اول تا سوم بهترین نتایج را برای CO نشان داد که در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۷ نحوه آرایش لایه‌ها و نرون‌ها در این شبکه‌ها نمایش داده شده است.



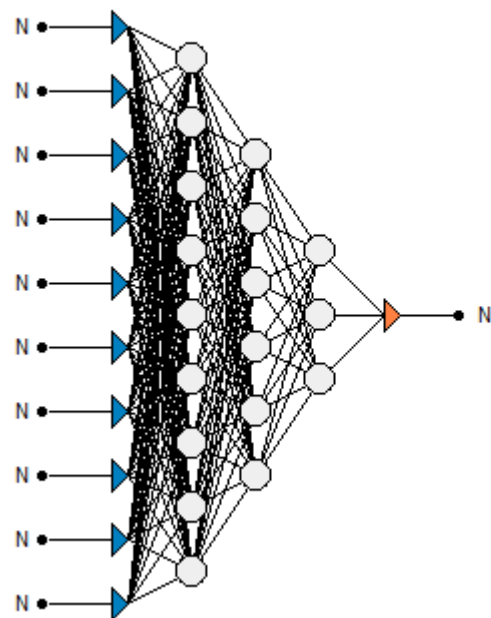
شکل ۴-۱۴: آرایش لایه‌ها و نرون‌ها برای CO با یک لایه پنهان و در وضعیت بهینه

10-11-7-1



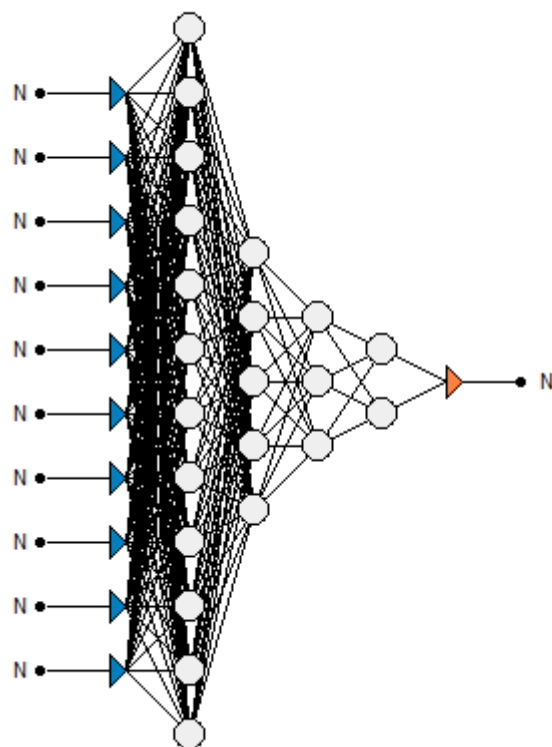
شکل ۴-۱۵: آرایش لایه ها و نرون ها برای CO با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه

10-9-6-3-1

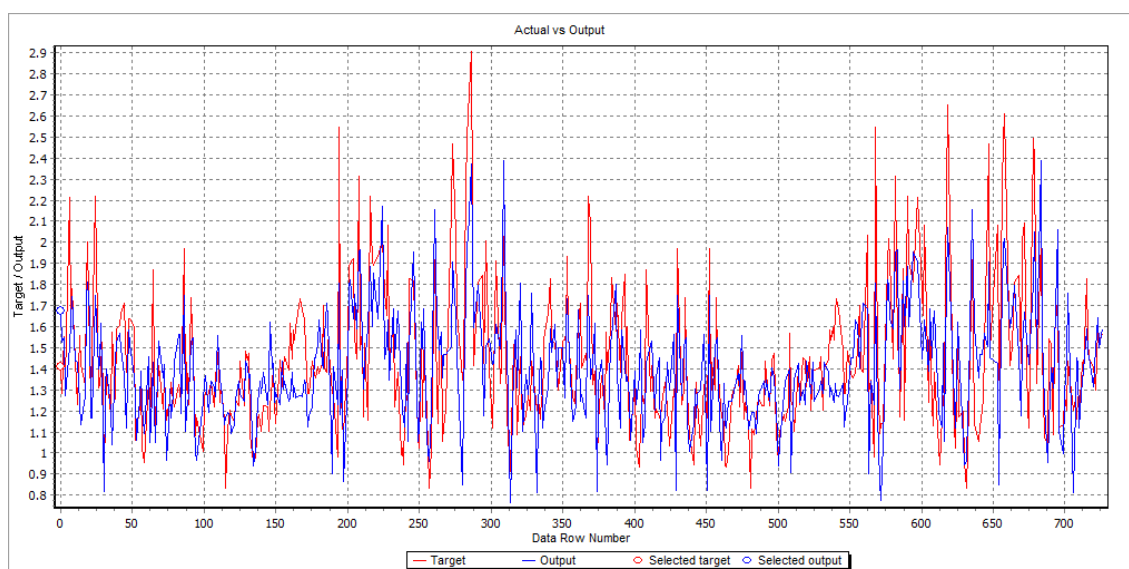


شکل ۴-۱۶: آرایش لایه ها و نرون ها برای CO با سه لایه پنهان و در وضعیت بهینه

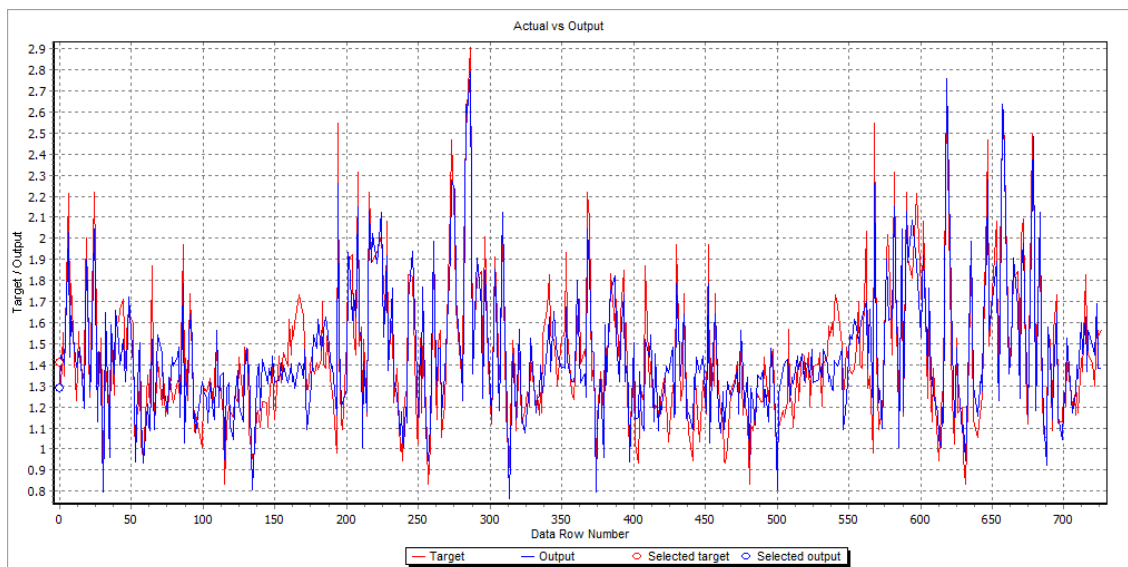
10-12-5-3-2-1



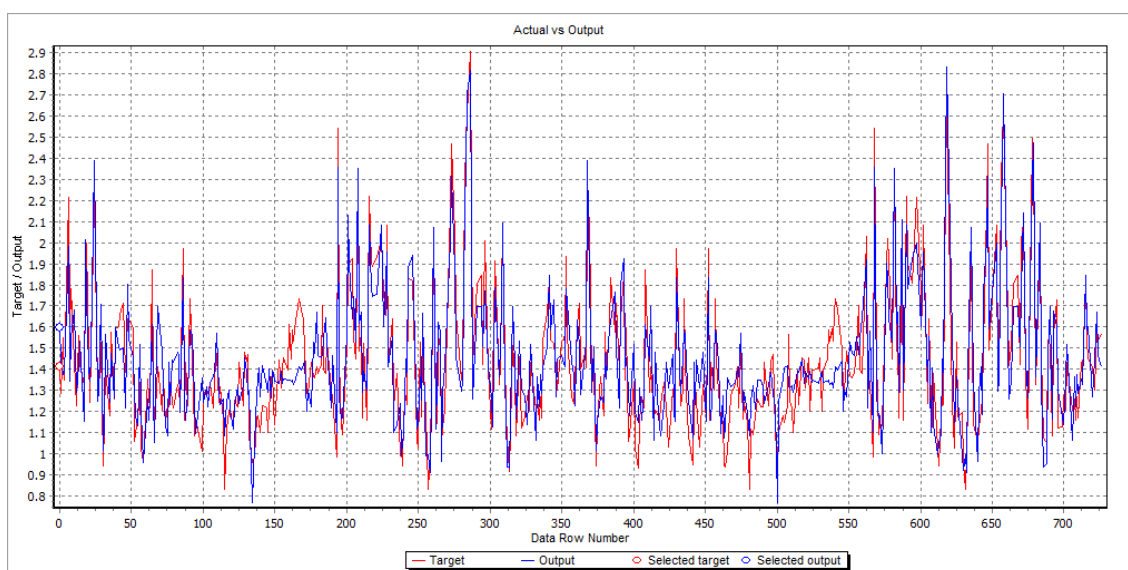
شکل ۴-۱۷: آرایش لایه ها و نرون ها برای CO با چهار لایه پنهان و در وضعیت بهینه



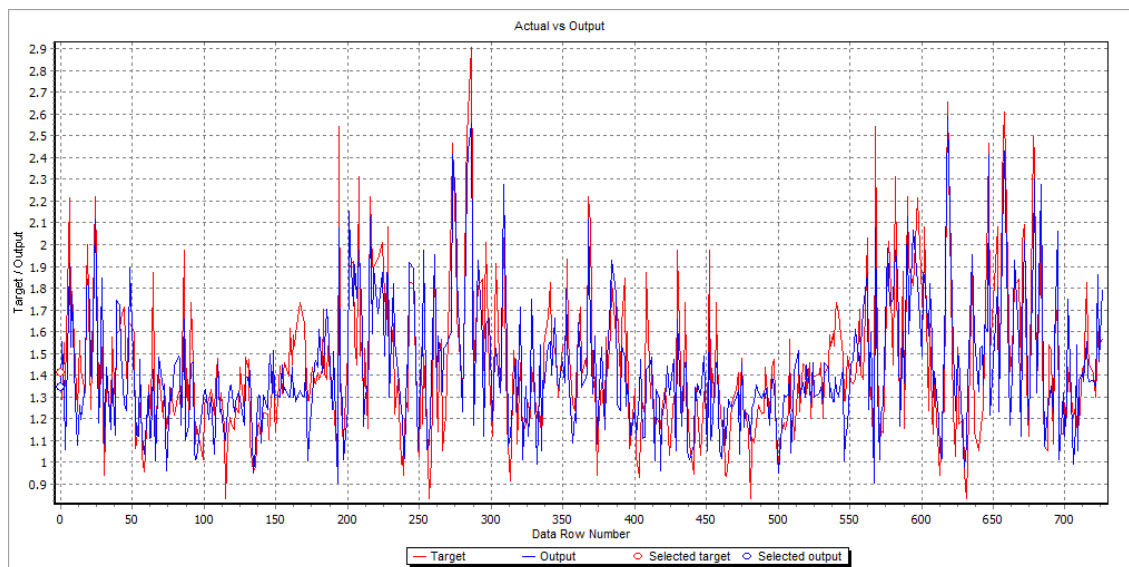
شکل ۴-۱۸: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلایندہ CO با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی



شکل ۴-۱۹: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی



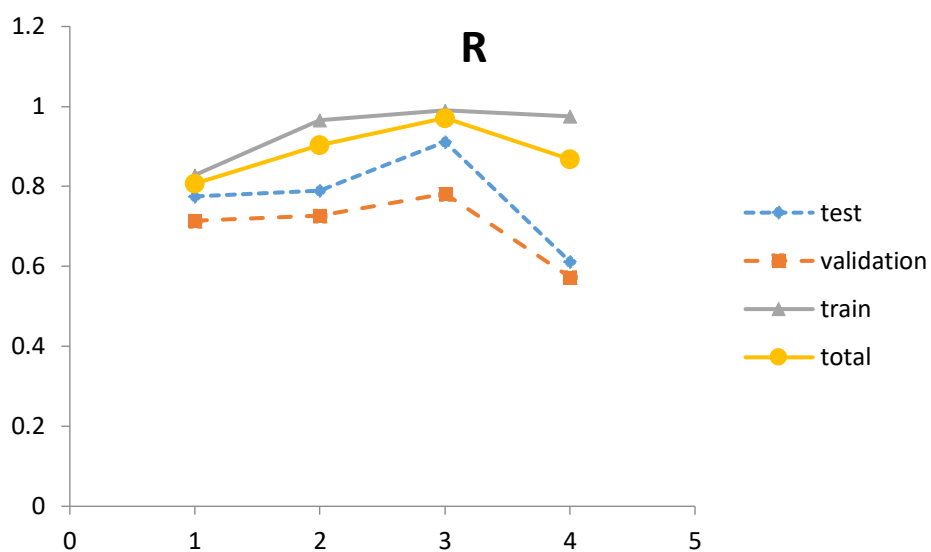
شکل ۴-۲۰: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۳ لایه پنهان برای شبکه عصبی



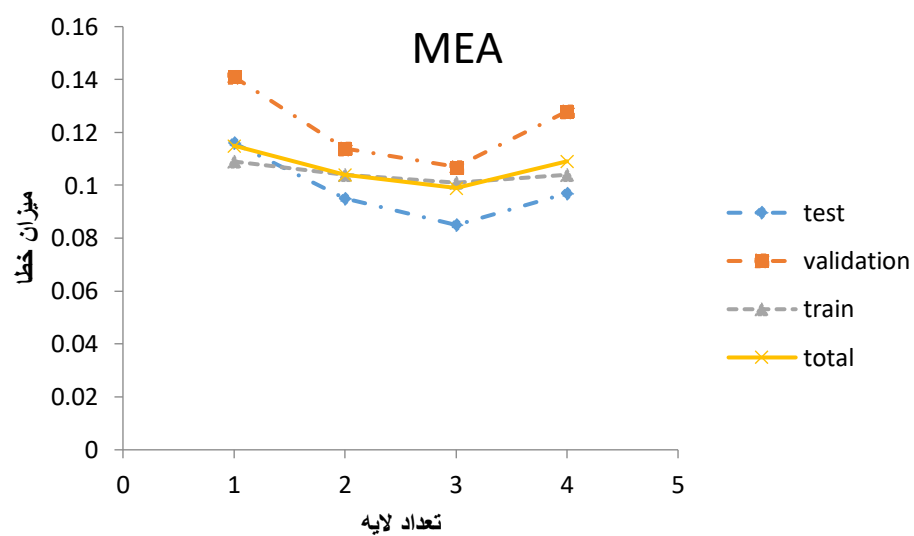
شکل ۴-۲۱: پیش‌بینی شبکه عصبی برای آلاینده CO با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی

مشاهده می‌شود میزان شماتیک پیش‌بینی نیز برای شبکه عصبی با ۲ و ۳ لایه و وضعیت بهتری نسبت به شبکه‌های ۱ و ۴ لایه دارند.

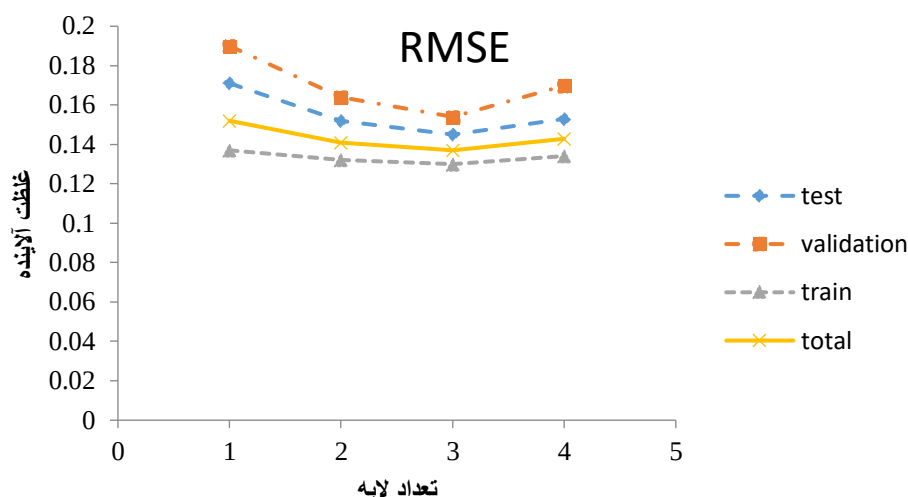
نمودارهای مربوط به هر یک از شاخص‌های بررسی شبکه عصبی برای تعداد یک، دو، سه و چهار لایه برای شبکه مدل شده برای CO در پایین (شکل‌های ۴-۲۲ تا ۴-۲۴) رسم شده‌اند. در این نمودارها میزان ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطا به عنوان مهمترین شاخص‌های بررسی کیفیت پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-۲۲: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای CO



شکل ۴-۲۳: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای CO



شکل ۴-۲۴: نمودار خطای میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای CO

با بررسی میزان همبستگی و هر یک از خطاهای حاصل از این پیش‌بینی برای آلاینده CO دیده می‌شود شبکه با به ترتیب ۳ و ۲ لایه‌ی پنهان بهترین نتایج را به همراه داشتند. میزان خطاهای محاسبه شده همچنین برای شبکه با یک لایه پنهان بیشتر از سایر شبکه‌ها می‌باشد.

۲-۷-۴- پیش‌بینی آلاینده PM₁₀

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی آلاینده PM₁₀ با ساختارهای متفاوت شبکه در جدول‌های ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ نشان داده شده است. برای شبکه‌های ایجاد شده با لایه‌های پنهان متفاوت مقایسه‌هایی صورت گرفته است.

جدول ۴-۱۱: مقادیر R برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای PM₁₀

ضریب همبستگی	یک لایه پنهان (۱-۵-۱۰)	دو لایه پنهان (۱-۴-۹-۱۰)	سه لایه پنهان (۱-۳-۴-۱۱-۱۰)	چهار لایه پنهان (۱-۲-۴-۵-۱۲-۱۰)
صحت‌سنجی	۰/۶۵۰۵	۰/۸۲۶۷	۰/۹۷۱۲	۰/۷۲۳۳
اعتبارسنجی	۰/۷۲۲۲	۰/۹۶۸۶	۰/۹۴۱۸	۰/۹۷۸۷
آموزش	۰/۷۹۰۰	۰/۹۶۱۹	۰/۹۷۰۱	۰/۸۹۳۵
کل	۰/۷۸۰۳	۰/۹۵۰۹	۰/۹۶۰۲	۰/۸۶۴۳

جدول ۴-۱۲: مقادیر MAE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای PM₁₀

میانگین خطا مطلق	یک لایه پنهان (۱-۵-۱۰)	دو لایه پنهان (۱-۴-۹-۱۰)	سه لایه پنهان (۱-۳-۴-۱۱-۱۰)	چهار لایه پنهان (۱-۲-۴-۵-۱۲-۱۰)
صحت‌سنجی	۱/۶۶۵	۱/۴۸۶	۱/۵۵۴	۱/۶۳۴
اعتبارسنجی	۱/۴۷۵	۱/۱۴۵	۱/۳۵۲	۱/۵۱۵
آموزش	۱/۶۲۳	۱/۴۸۵	۱/۴۴۶	۱/۵۳۴
کل	۲/۱۵۵	۱/۴۶۵	۱/۴۴۶	۱/۶۶۷

جدول ۴-۱۳: مقادیر RMSE برای تعداد لایه پنهان مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای PM₁₀

جذر میانگین مربعات خطا	یک لایه پنهان (۱-۵-۱۰)	دو لایه پنهان (۱-۴-۹-۱۰)	سه لایه پنهان (۱-۳-۴-۱۱-۱۰)	چهار لایه پنهان (۱-۲-۴-۵-۱۲-۱۰)
صحت‌سنجی	۲/۳۲۳	۲/۳۳۱	۲/۱۲۵	۱/۹۵۱
اعتبارسنجی	۲/۲۱۱	۱/۷۸۴	۱/۸۵۵	۱/۸۵۲
آموزش	۳/۱۵۲	۲/۳۹۵	۲/۲۸۵	۲/۴۵۲
کل	۲/۲۵۱	۲/۰۷۵	۱/۹۴۵	۲/۶۵۵

نتایج مقدار ضریب همبستگی و خطاهای مربوط به هر یک از مقادیر اجرا شده در هر یک از چهار

مدل با توجه به ساختار نرون‌های شبکه عصبی برای آلاینده PM₁₀ در جدول‌های ۴-۱۴ تا ۴-۱۷

نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای آلاینده PM_{10}

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۱-۱	۰/۶۸۲	۲/۶۹۵	۲/۴۲۰
۱۰-۲-۱	۰/۷۷۲	۲/۵۹۵	۲/۳۹۳
۱۰-۳-۱	۰/۷۵۵	۲/۴۰۲	۲/۳۷۴
۱۰-۴-۱	۰/۷۶۴	۲/۳۷۰	۲/۳۶۸
۱۰-۵-۱	۰/۷۸۰	۲/۱۵۵	۲/۲۵۱
۱۰-۶-۱	۰/۷۷۱	۲/۱۶۴	۲/۲۵۵
۱۰-۷-۱	۰/۷۵۷	۲/۶۷۵	۲/۵۰۲
۱۰-۸-۱	۰/۷۵۴	۲/۶۷۹	۲/۵۳۰
۱۰-۹-۱	۰/۷۴۸	۲/۶۸۲	۲/۵۳۹
۱۰-۱۰-۱	۰/۷۳۹	۲/۶۸۹	۲/۵۷۲

یک لایه پنهان

جدول ۴-۱۵: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای آلاینده PM_{10}

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱	۰/۷۴۵	۱/۵۸۹	۲/۳۹۸
۱۰-۳-۱-۱	۰/۷۵۴	۱/۵۸۲	۲/۳۸۷
۱۰-۴-۲-۱	۰/۷۵۹	۱/۵۷۲	۲/۳۶۹
۱۰-۴-۱-۱	۰/۷۷۱	۰/۵۶۹	۲/۲۹۷
۱۰-۷-۵-۱	۰/۷۷۶	۱/۵۵۸	۲/۲۸۹
۱۰-۸-۴-۱	۰/۹۲۲	۱/۴۵۰	۱/۹۶۹
۱۰-۹-۴-۱	۰/۹۵۰	۱/۴۶۵	۱/۹۴۵
۱۰-۱۱-۷-۱	۰/۹۴۶	۱/۴۷۱	۱/۹۶۳
۱۰-۱۱-۴-۱	۰/۹۰۸	۱/۴۸۲	۱/۹۷۵
۱۰-۱۱-۳-۱	۰/۸۷۴	۱/۴۹۹	۲/۰۴۹

۲ لایه پنهان

جدول ۴-۱۶: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای آلاینده PM_{10}

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱-۱	۰/۸۰۹	۱/۷۰۹	۲/۵۸۷
۱۰-۵-۴-۲-۱	۰/۸۱۵	۱/۶۹۸	۲/۵۳۵
۱۰-۶-۵-۴-۲-۱	۰/۸۱۸	۱/۶۹۰	۲/۵۰۴
۱۰-۶-۴-۱-۱	۰/۸۲۳	۱/۹۷۸	۲/۴۸۷
۱۰-۸-۴-۲-۱	۰/۸۳۸	۱/۶۷۴	۲/۳۵۸
۱۰-۸-۳-۲-۱	۰/۸۴۶	۱/۶۶۷	۲/۳۴۱
۱۰-۱۱-۵-۴-۱	۰/۸۵۱	۱/۶۰۵	۲/۲۸۵
۱۰-۱۱-۴-۳-۱	۰/۹۶۰	۱/۴۴۶	۱/۹۴۵
۱۰-۹-۶-۳-۱	۰/۸۸۴	۱/۵۸۹	۲/۱۱۸
۱۰-۱۲-۴-۳-۱	۰/۹۲۸	۱/۵۰۷	۱/۹۵۹

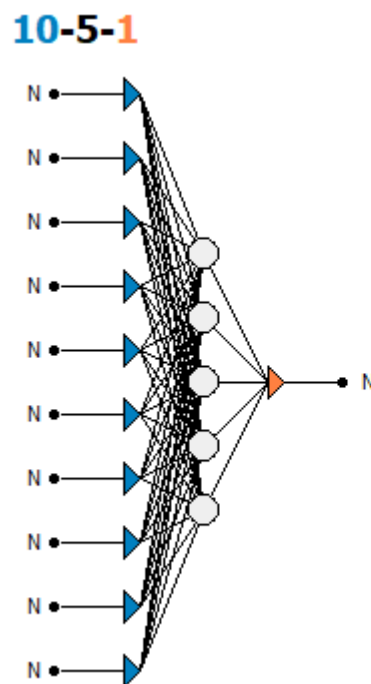
۳ لایه پنهان

جدول ۴-۱۷: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان برای آلاینده PM_{10}

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۳-۲-۲-۱	۰/۶۱۵	۲/۳۸۳	۲/۹۶۸
۱۰-۴-۳-۳-۲-۱	۰/۶۲۵	۲/۳۷۹	۲/۹۶۲
۱۰-۴-۳-۲-۱-۱	۰/۶۳۳	۲/۳۷۵	۲/۹۵۷
۱۰-۶-۴-۳-۲-۱	۰/۶۳۹	۲/۳۶۲	۲/۹۵۱
۱۰-۷-۶-۴-۱-۱	۰/۶۸۴	۱/۹۴۸	۲/۸۹۶
۱۰-۸-۶-۴-۲-۱	۰/۷۰۸	۱/۸۸۵	۲/۸۶۴
۱۰-۸-۵-۳-۱-۱	۰/۷۵۵	۱/۸۳۹	۲/۸۰۷
۱۰-۱۱-۴-۳-۲-۱	۰/۸۱۲	۱/۶۷۹	۲/۷۲۹
۱۰-۱۲-۵-۴-۲-۱	۰/۸۶۴	۱/۶۶۷	۲/۶۶۵
۱۰-۱۲-۶-۴-۲-۱	۰/۸۵۲	۱/۷۵۲	۲/۶۹۹

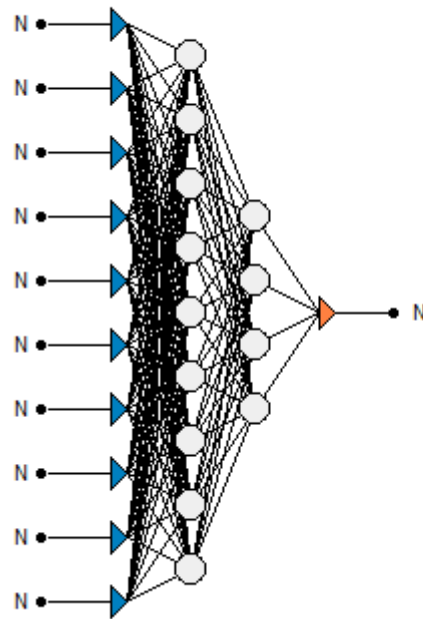
۴ لایه پنهان

برای آلاینده PM_{10} در شبکه عصبی و در حالت بهینه مقادیر R و $RMSE$ ۰/۹۶ و ۱/۹۴ و این در حالی است که در مدل پیش‌بینی رگرسیون این مقادیر ۰/۶۸ و ۷/۴۰ است. در شکل‌های ۴-۲۹ تا ۴-۳۲ مقادیر اصلی و مقادیر پیش‌بینی شده برای آلاینده PM_{10} مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تعداد نرون‌ها برای شبکه با دو پنهان ۹ و ۴ نرون و برای شبکه با سه لایه پنهان به ترتیب ۱۱، ۴ و ۳ نرون برای لایه‌های اول تا سوم بهترین نتایج مذکور را در برداشت که در زیر نحوه آرایش لایه‌ها و نرون‌های آن در شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۸ نمایش داده شده است.



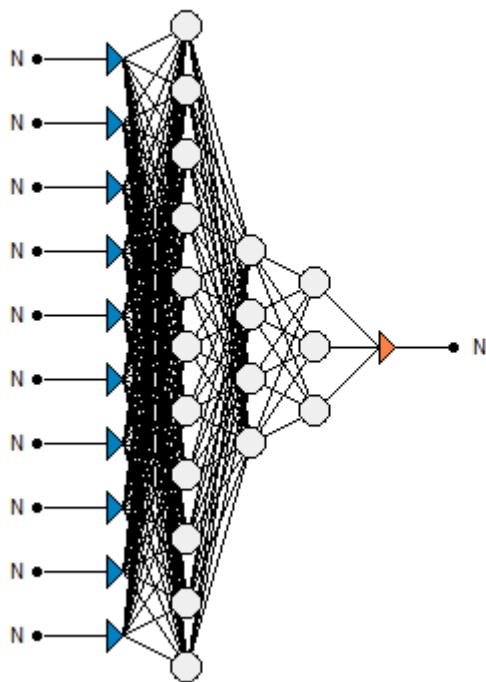
شکل ۴-۲۵: آرایش لایه‌ها و نرون‌ها برای PM_{10} با یک لایه پنهان و در وضعیت بهینه

10-9-4-1



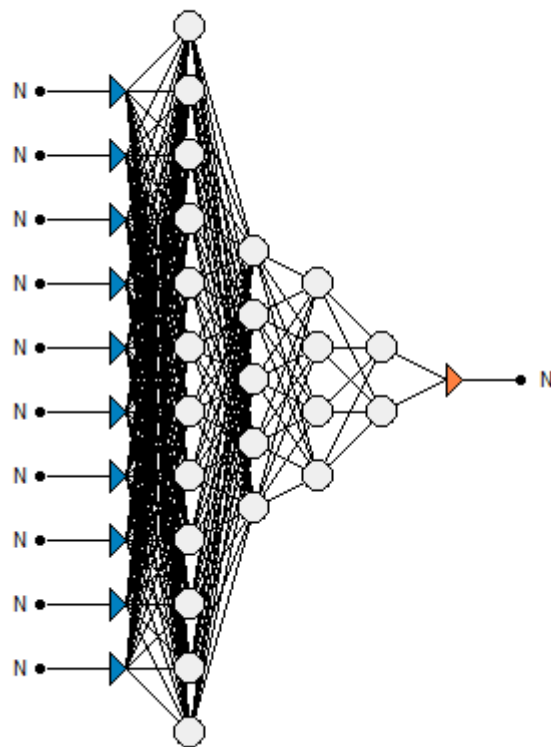
شکل ۴-۲۶: آرایش لایه ها و نرون ها برای PM_{10} با دو لایه پنهان و در وضعیت بهینه

10-11-4-3-1

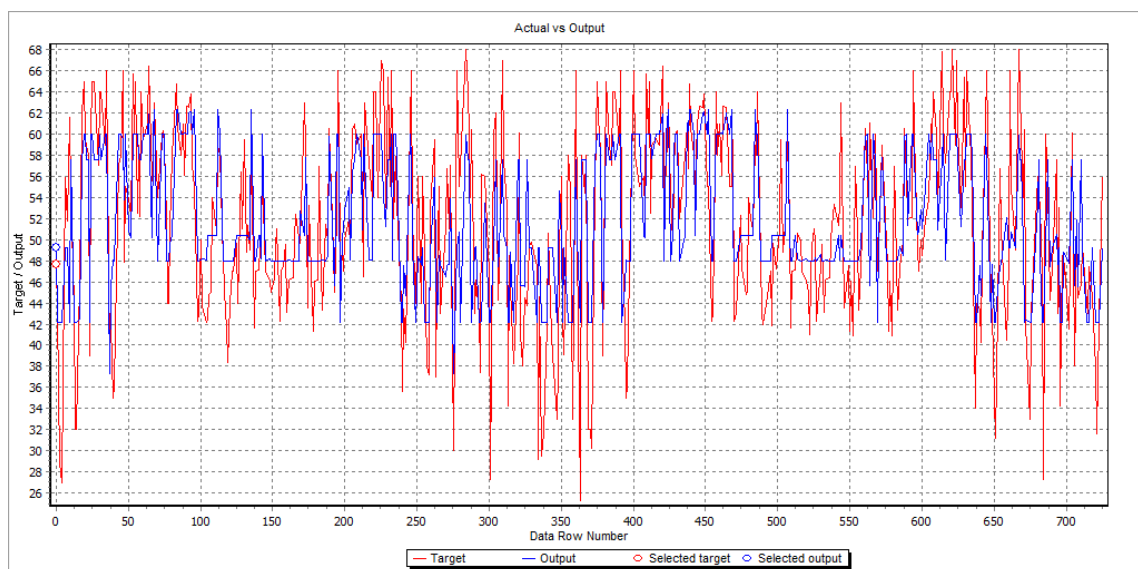


شکل ۴-۲۷: آرایش لایه ها و نرون ها برای PM_{10} با سه لایه پنهان و در وضعیت بهینه

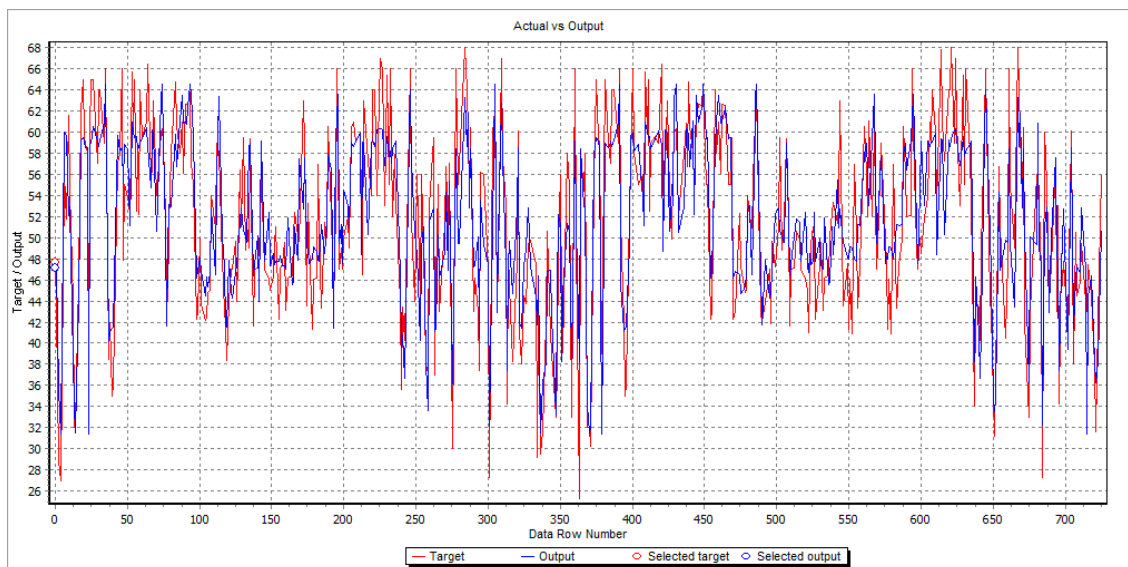
10-12-5-4-2-1



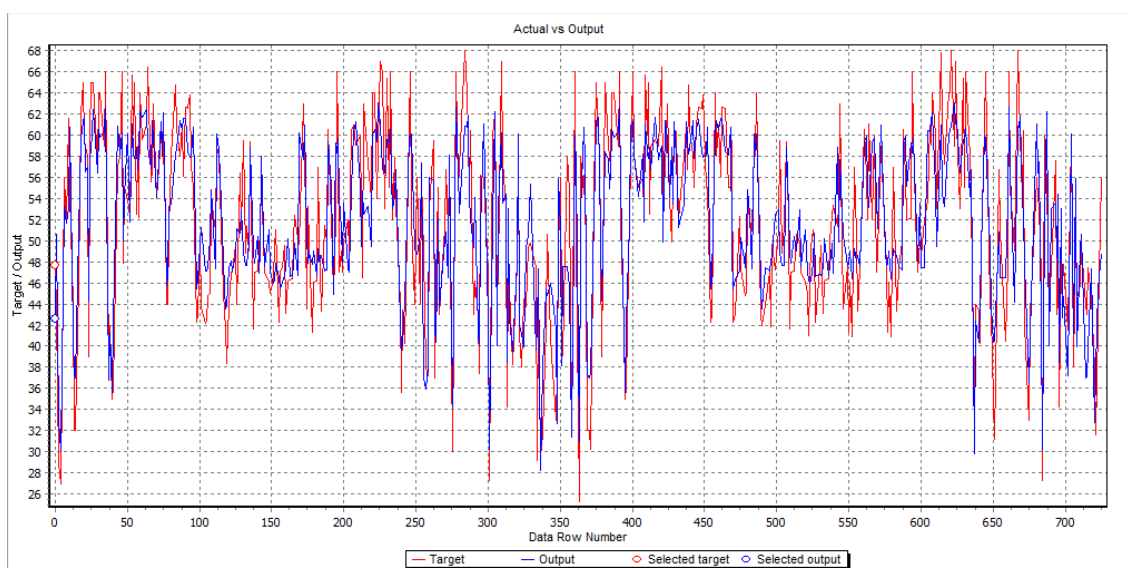
شکل ۴-۲۸: آرایش لایه ها و نرون ها برای PM_{10} با چهار لایه پنهان و در وضعیت بهینه



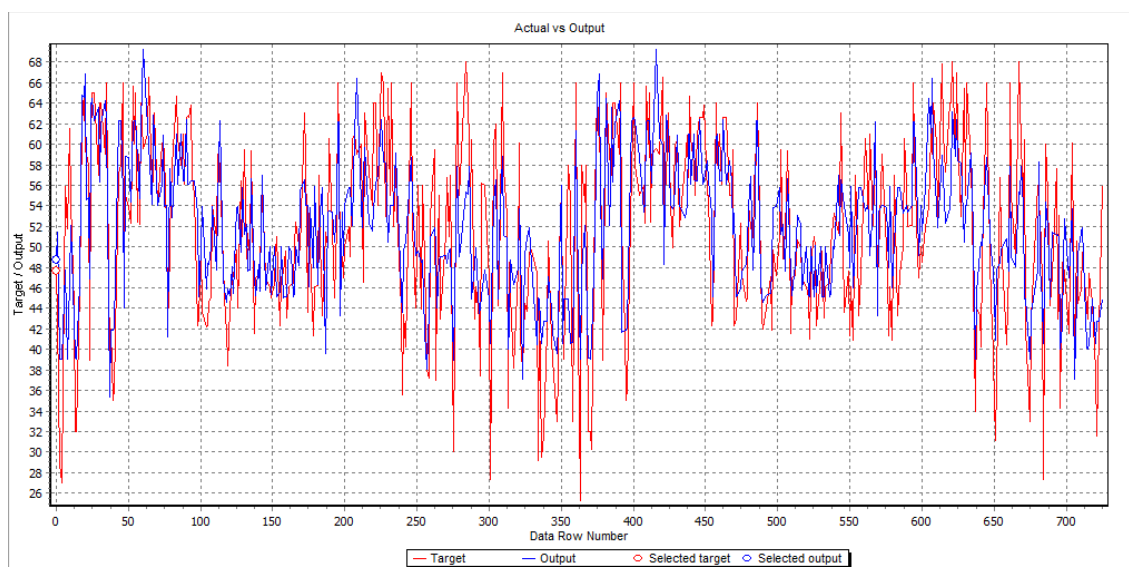
شکل ۴-۲۹: پیش‌بینی آلاینده PM_{10} با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی



شکل ۴-۳: پیش‌بینی آلاینده PM_{10} با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی

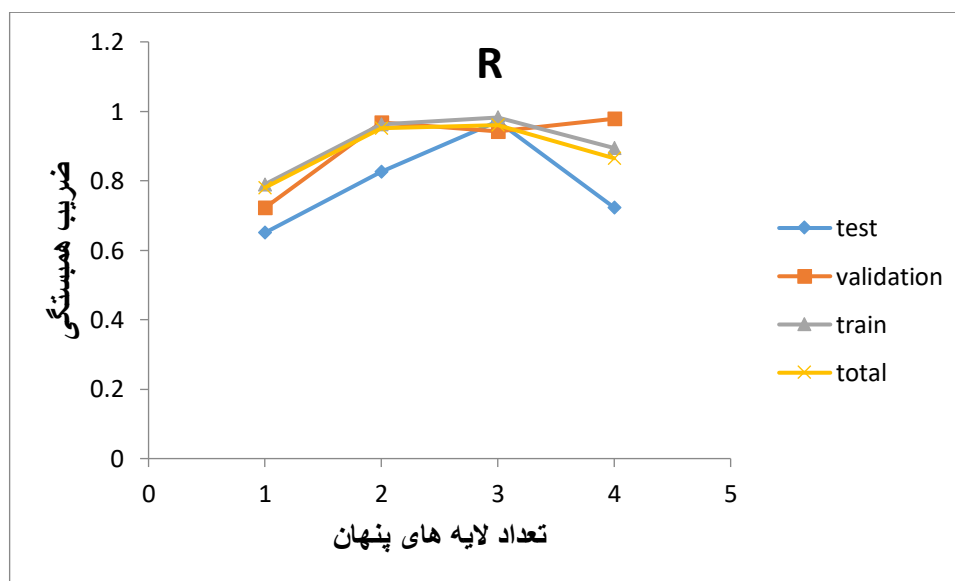


شکل ۴-۳: پیش‌بینی آلاینده PM_{10} با ۳ لایه پنهان برای شبکه عصبی

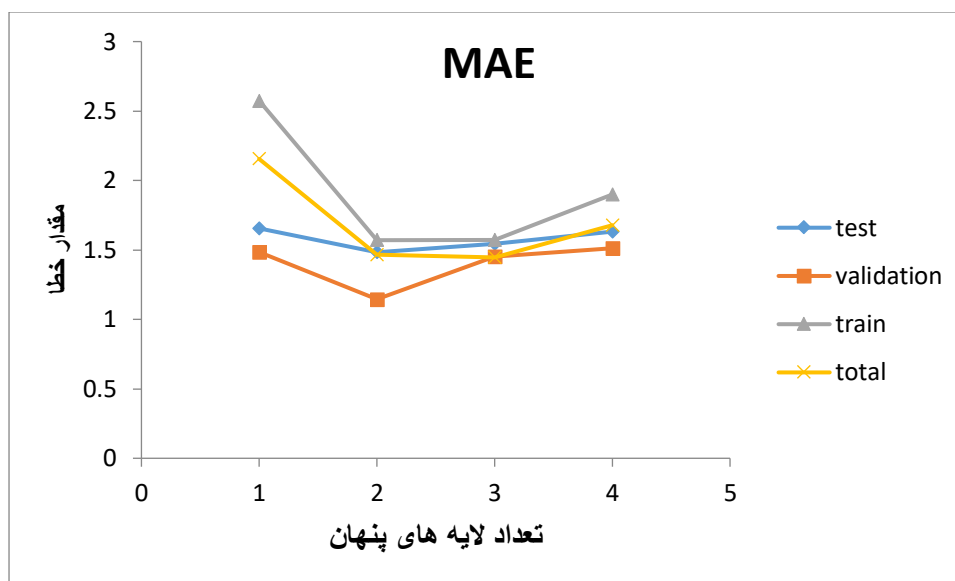


شکل ۳۲-۴: پیش‌بینی آلاینده PM_{10} با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی

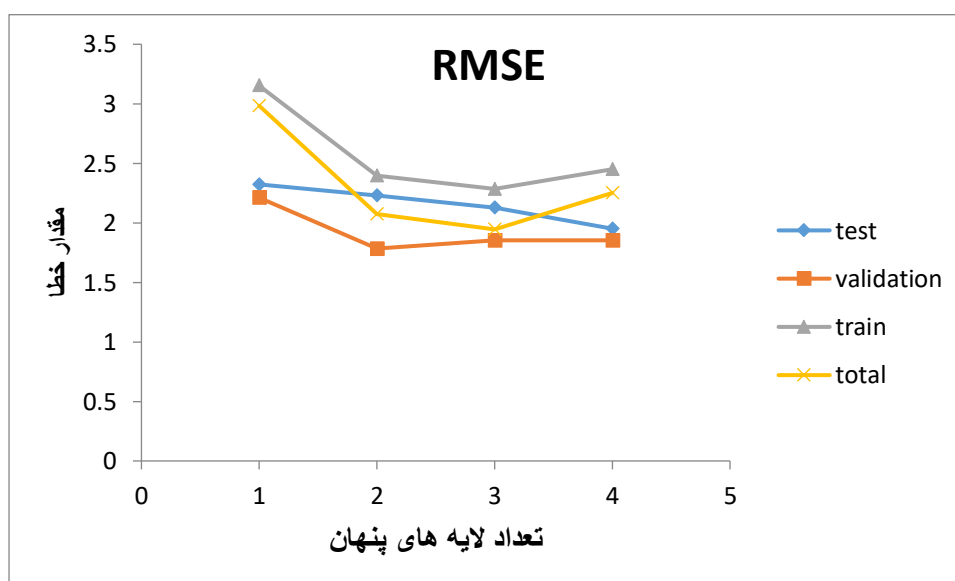
از مقایسه نمودار پیش‌بینی‌ها برای آلاینده PM_{10} دیده می‌شود، پیش‌بینی با سه لایه پنهان برای شبکه عصبی دقیق‌ترین نتایج را نشان می‌دهد. در ادامه گراف مربوط به هر یک از شاخص‌های بررسی شبکه عصبی برای تعداد یک، دو، سه و چهار لایه برای شبکه مدل شده برای آلاینده PM_{10} در شکل‌های ۳۳-۴ تا ۳۵-۴ آورده شده است.



شکل ۳۳-۴: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای PM_{10}



شکل ۴-۳: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای PM_{10}



شکل ۴-۳: نمودار خطای جذر میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای PM_{10}

بررسی میزان همبستگی و هر یک از خطاهای حاصل از این پیش‌بینی برای آلاینده PM_{10} نشان می‌دهد شبکه با به ترتیب ۳ و ۲ لایه‌ی پنهان بهترین نتایج را به همراه داشتند. این درحالی است که شبکه با یک لایه پنهان دارای خطای بزرگتر و به تبع آن ضریب همبستگی پایین‌تری به نسبت سایر موارد دارد.

۳-۷-۴- پیش بینی آلاینده O_3

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی شبکه های عصبی آلاینده O_3 با ساختارهای متفاوت شبکه در جدول های ۴-۱۸ تا ۴-۲۰ نشان داده شده است. برای شبکه های ایجاد شده با لایه های پنهان متفاوت مقایسه هایی صورت گرفته است.

جدول ۴-۱۸: مقادیر R برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O_3

ضریب همبستگی	یک لایه پنهان (۱-۵-۱)	دو لایه پنهان (۱-۱۱-۷-۱)	سه لایه پنهان (۱-۱۴-۷-۳-۱)	چهار لایه پنهان (۱-۱۱-۵-۳-۲-۱)
صحت سنجی	۰/۹۱۲۷	۰/۹۷۶۰	۰/۹۷۸۵	۰/۹۴۴۱
اعتبار سنجی	۰/۶۵۶۲	۰/۹۷۷۴	۰/۹۸۱۲	۰/۹۵۱۴
آموزش	۰/۸۹۳۲	۰/۹۱۸۶	۰/۹۶۸۲	۰/۹۳۲۱
کل	۰/۹۰۵۲	۰/۹۸۲۶	۰/۹۷۹۰	۰/۹۶۵۴۴

جدول ۴-۱۹: مقادیر MAE برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O_3

میانگین خطا مطلق	یک لایه پنهان (۱-۵-۱)	دو لایه پنهان (۱-۱۱-۷-۱)	سه لایه پنهان (۱-۱۴-۷-۳-۱)	چهار لایه پنهان (۱-۱۱-۵-۳-۲-۱)
صحت سنجی	۰/۵۹۶۶	۰/۳۴۳۶	۰/۳۴۹۲	۰/۳۶۴۱
اعتبار سنجی	۰/۸۹۵۲	۰/۲۹۵۱	۰/۳۰۵۱	۰/۳۳۶۲
آموزش	۰/۷۴۳۱	۰/۲۷۰۲	۰/۳۷۵۴	۰/۴۰۳۵
کل	۰/۷۴۴۱	۰/۲۵۱۳	۰/۳۶۵۴	۰/۴۳۶۲

جدول ۴-۲۰: مقادیر RMSE برای تعداد لایه مختلف در ساختار شبکه مدل شده برای O_3

جذر میانگین مربعات خطا	یک لایه پنهان (۱۰-۵-۱)	دو لایه پنهان (۱۰-۱۱-۷-۱)	سه لایه پنهان (۱۰-۱۴-۷-۳-۱)	چهار لایه پنهان (۱۰-۱۱-۵-۳-۲-۱)
صحت‌سنجی	۰/۸۴۱	۰/۳۴۴۲	۰/۴۶۵۱	۰/۴۷۸۲
اعتبارسنجی	۰/۸۵۸۲	۰/۴۳۷۶	۰/۳۵۷۲	۰/۴۵۲۲
آموزش	۰/۹۸۹۲	۰/۲۶۶۵	۰/۴۵۸۲	۰/۴۹۲۱
کل	۱/۰۰۲۱	۰/۳۲۳۵	۰/۴۵۵۱	۰/۴۸۲۳

نتایج ضریب همبستگی و خطاهای مربوط به هر یک از مقادیر اجرا شده در هر یک از چهار مدل با توجه به ساختار نرون‌های شبکه عصبی برای آلاینده CO در جدول‌های ۴-۲۱ تا ۴-۲۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۱: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای آلاینده O_3

ساختار نرون‌ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۱-۱	۰/۷۲۸	۰/۸۹۷	۱/۱۳۲
۱۰-۲-۱	۰/۷۳۳	۰/۸۸۹	۱/۱۲۷
۱۰-۳-۱	۰/۷۴۹	۰/۸۸۵	۱/۱۰۸
۱۰-۴-۱	۰/۸۱۲	۰/۸۱۱	۱/۰۷۴
۱۰-۵-۱	۰/۹۰۵	۰/۷۴۴	۱/۰۰
۱۰-۶-۱	۰/۸۹۴	۰/۷۴۹	۱/۰۲۶
۱۰-۷-۱	۰/۸۹۰	۰/۷۵۲	۱/۰۳۱
۱۰-۸-۱	۰/۸۸۳	۰/۷۵۸	۱/۰۳۵
۱۰-۹-۱	۰/۸۷۱	۰/۷۶۱	۱/۰۴۶
۱۰-۱۰-۱	۰/۸۵۳	۰/۷۷۵	۱/۰۵۹

جدول ۴-۲۲: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای آلاینده O₃

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱	۰/۷۸۲	۰/۵۳۹	۰/۷۲۴
۱۰-۳-۱-۱	۰/۷۹۳	۰/۵۲۱	۰/۶۸۸
۱۰-۴-۲-۱	۰/۸۰۰	۰/۵۱۷	۰/۶۶۷
۱۰-۴-۱-۱	۰/۸۰۵	۰/۴۹۸	۰/۶۵۲
۱۰-۷-۵-۱	۰/۸۴۵	۰/۴۰۸	۰/۵۳۸
۱۰-۸-۴-۱	۰/۸۴۹	۰/۳۹۴	۰/۵۲۲
۱۰-۹-۴-۱	۰/۸۸۹	۰/۲۷۹	۰/۴۴۹
۱۰-۱۱-۷-۱	۰/۹۸۲	۰/۲۵۱	۰/۳۲۳
۱۰۱۱-۴-۱	۰/۹۷۱	۰/۲۵۹	۰/۳۴۸
۱۰-۱۱-۳-۱	۰/۹۳۰	۰/۲۶۷	۰/۳۷۶

۲ لایه پنهان

جدول ۴-۲۳: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای آلاینده O₃

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۲-۱-۱	۰/۶۲۸	۰/۷۸۹	۰/۸۷۶
۱۰-۵-۴-۲-۱	۰/۶۳۵	۰/۷۶۵	۰/۸۵۸
۱۰-۶-۵-۴-۲-۱	۰/۷۱۴	۰/۷۰۹	۰/۷۴۸
۱۰-۶-۴-۱-۱	۰/۷۲۹	۰/۶۹۶	۰/۷۳۸
۱۰-۸-۴-۲-۱	۰/۷۸۴	۰/۶۱۸	۰/۶۳۸
۱۰-۸-۳-۲-۱	۰/۷۹۲	۰/۶۱۰	۰/۶۲۴
۱۰-۱۱-۵-۴-۱	۰/۸۲۵	۰/۵۷۲	۰/۵۷۴
۱۰-۱۱-۴-۳-۱	۰/۸۷۸	۰/۴۴۴	۰/۵۲۶
۱۰-۱۴-۷-۳-۱	۰/۹۷۹	۰/۳۶۵	۰/۴۵۵
۱۰-۱۴-۴-۲-۱	۰/۸۹۹	۰/۳۹۵	۰/۴۹۵

۳ لایه پنهان

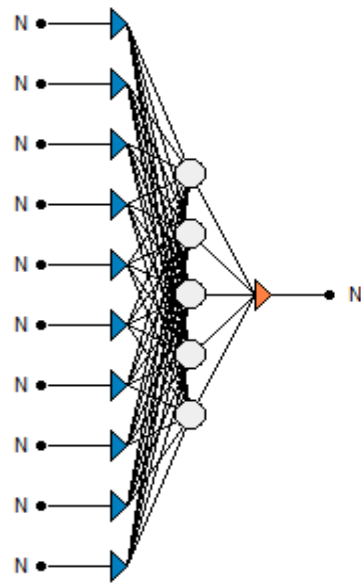
جدول ۴-۲۴: پارامترهای آماری به ازای ساختاره های مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان برای آلاینده O_3

ساختار نرون ها	ضریب همبستگی	خطای میانگین مطلق	جذر میانگین مربعات خطا
۱۰-۳-۳-۲-۲-۱	۰/۶۴۵	۰/۸۱۲	۱/۰۲۹
۱۰-۴-۳-۳-۲-۱	۰/۶۶۸	۰/۷۹۴	۱/۰۱۵
۱۰-۴-۳-۲-۱-۱	۰/۶۸۴	۰/۷۸۸	۰/۹۸۵
۱۰-۶-۴-۳-۲-۱	۰/۶۹۶	۰/۷۸۱	۰/۹۷۳
۱۰-۷-۶-۴-۱-۱	۰/۷۳۰	۰/۷۱۸	۰/۸۴۱
۱۰-۸-۶-۴-۲-۱	۰/۷۸۶	۰/۶۵۴	۰/۷۷۸
۱۰-۸-۵-۳-۱-۱	۰/۸۵۰	۰/۵۸۳	۰/۵۸۹
۱۰-۱۱-۵-۳-۲-۱	۰/۹۶۵	۰/۴۳۶	۰/۴۸۲
۱۰-۱۲-۵-۴-۲-۱	۰/۹۲۵	۰/۴۵۹	۰/۵۰۵
۱۰-۱۲-۶-۴-۲-۱	۰/۸۸۳	۰/۴۸۶	۰/۵۶۴

۴ لایه پنهان

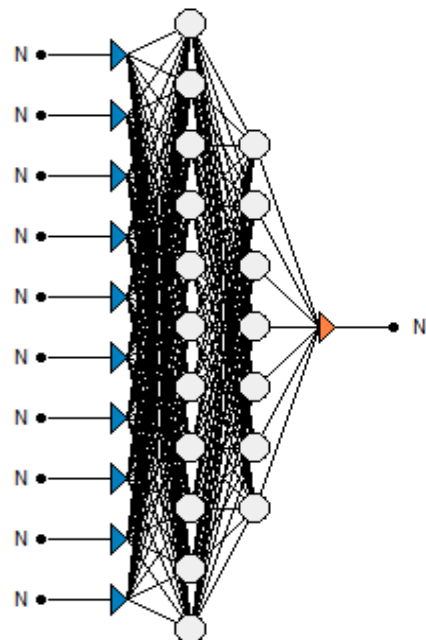
برای آلاینده O_3 در شبکه عصبی و در حالت بهینه مقادیر R و $RMSE$ ۰/۹۸ و ۰/۳۲ هستند و این در حالی است که در مدل پیش‌بینی رگرسیون این مقادیر ۰/۶۸ و ۷/۴۰ است. در شکل‌های ۴-۴۰ تا ۴-۴۳ مقادیر اصلی و مقادیر پیش‌بینی شده برای آلاینده O_3 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تعداد نرون‌ها برای شبکه با دو لایه پنهان ۱۱ و ۷ نرون و برای شبکه با سه لایه پنهان به ترتیب ۱۲، ۷ و ۳ نرون برای لایه های پنهان اول تا سوم، بهترین نتایج مذکور را در بر داشت و نحوه آرایش لایه ها و نرون ها در شکل های ۴-۳۶ و ۴-۴۰ آورده شده است.

10-5-1



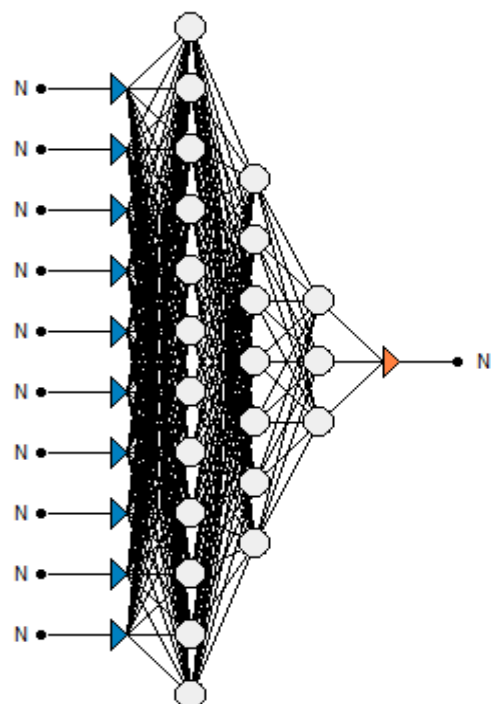
شکل ۴-۳۶: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با یک لایه پنهان برای آلاینده O_3

10-11-7-1



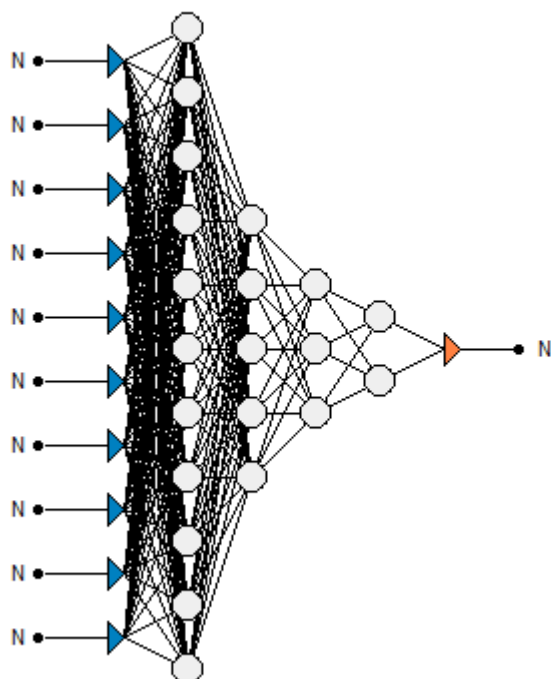
شکل ۴-۳۷: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با دو لایه پنهان برای آلاینده O_3

10-12-7-3-1

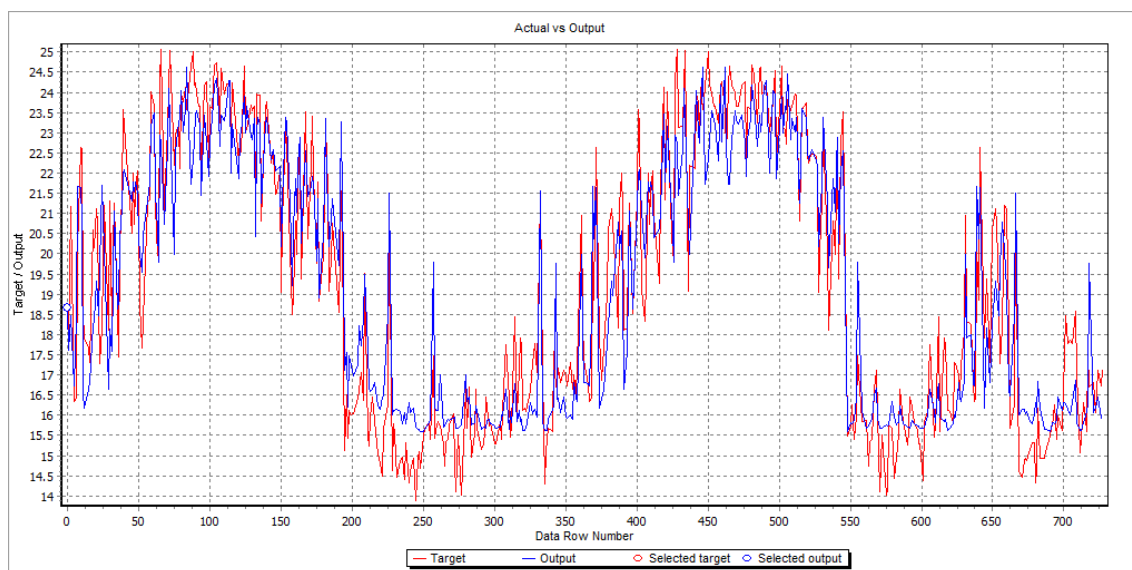


شکل ۳۸-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای آلاینده O_3

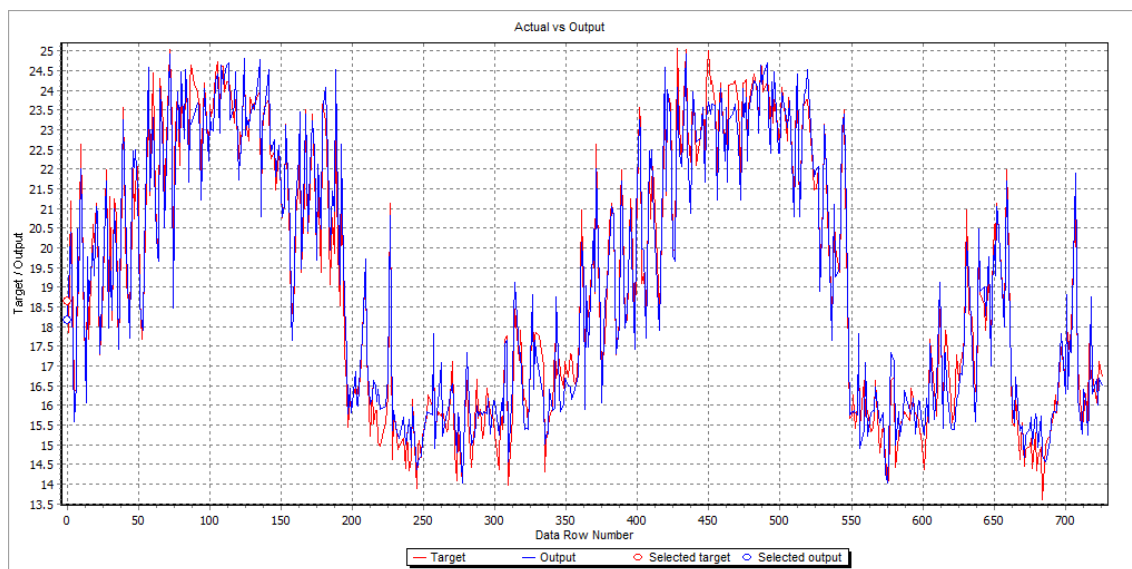
10-11-5-3-2-1



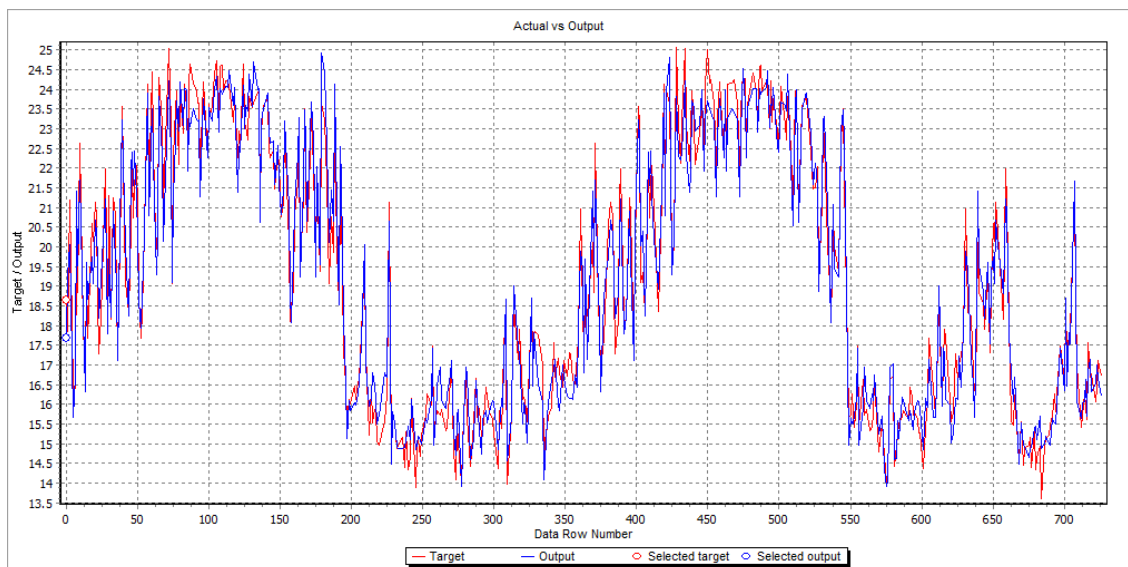
شکل ۳۹-۴: پارامترهای آماری به ازای ساختارهای مختلف شبکه عصبی با چهار لایه پنهان برای آلاینده O_3



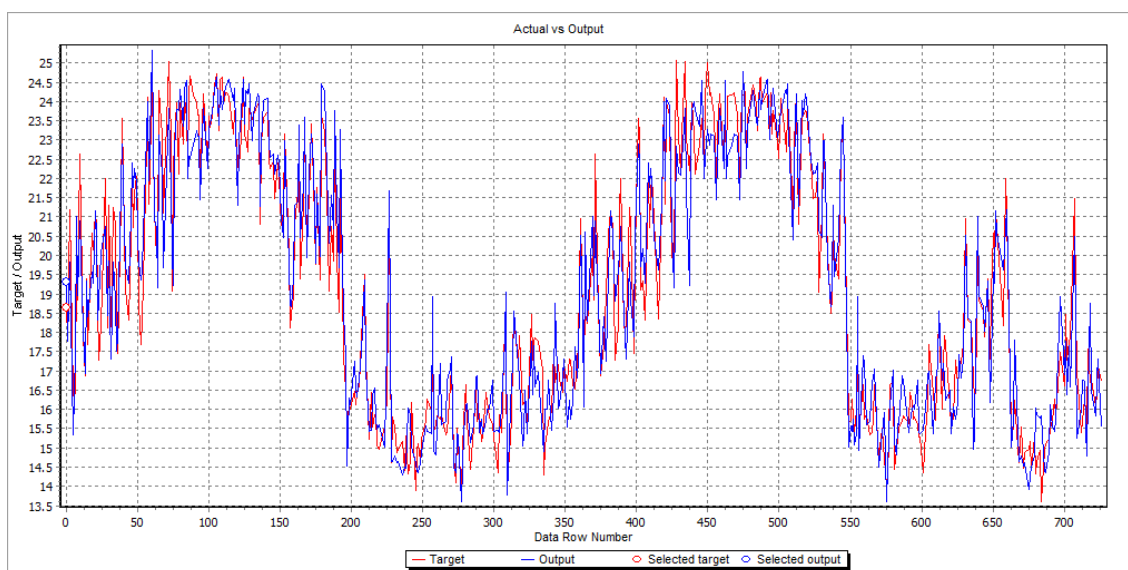
شکل ۴-۴۰: پیش‌بینی آلاینده O_3 با ۱ لایه پنهان برای شبکه عصبی



شکل ۴-۴۱: پیش‌بینی آلاینده O_3 با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی

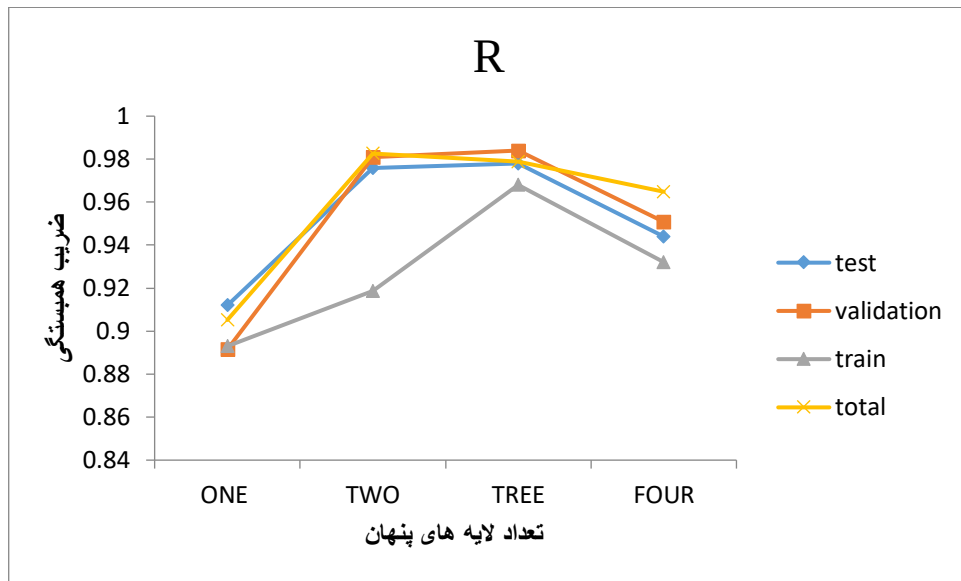


شکل ۴-۴: پیش‌بینی آلاینده O_3 با ۲ لایه پنهان برای شبکه عصبی

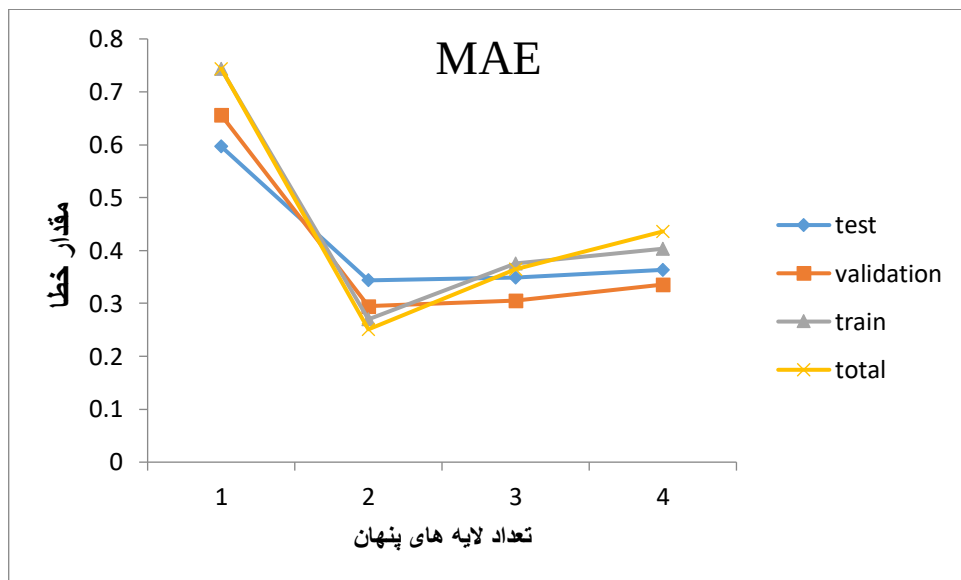


شکل ۴-۳: پیش‌بینی آلاینده O_3 با ۴ لایه پنهان برای شبکه عصبی

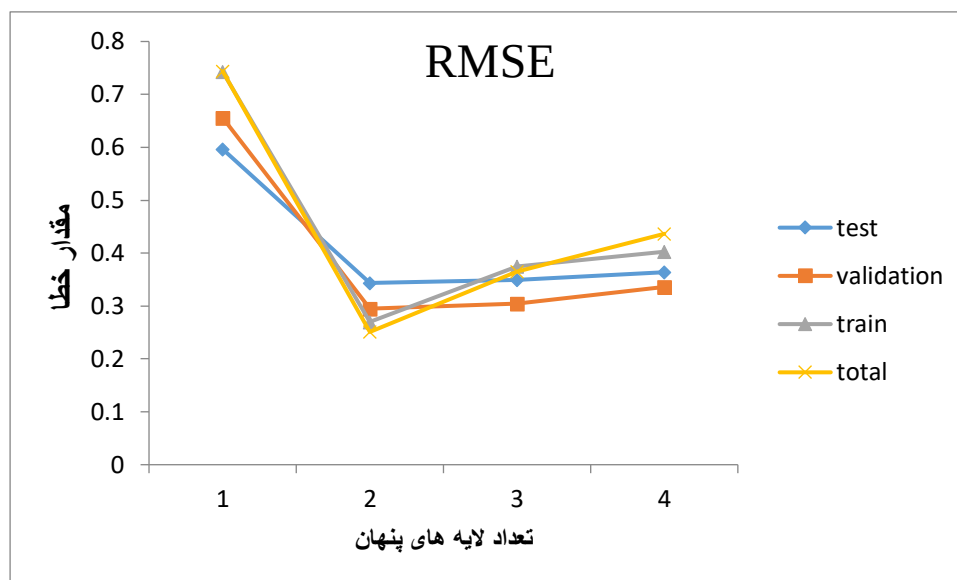
از مقایسه نمودار پیش‌بینی‌ها برای آلاینده O_3 دیده می‌شود، پیش‌بینی با دو لایه پنهان برای شبکه عصبی، دقیق‌ترین نتایج را نشان می‌دهد. در ادامه گراف مربوط به هر یک از شاخص‌های بررسی شبکه عصبی برای تعداد یک، دو، سه و چهار لایه برای شبکه مدل شده برای آلاینده PM_{10} در شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۶ آورده شده است.



شکل ۴-۴۴: نمودار ضریب همبستگی در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای O_3



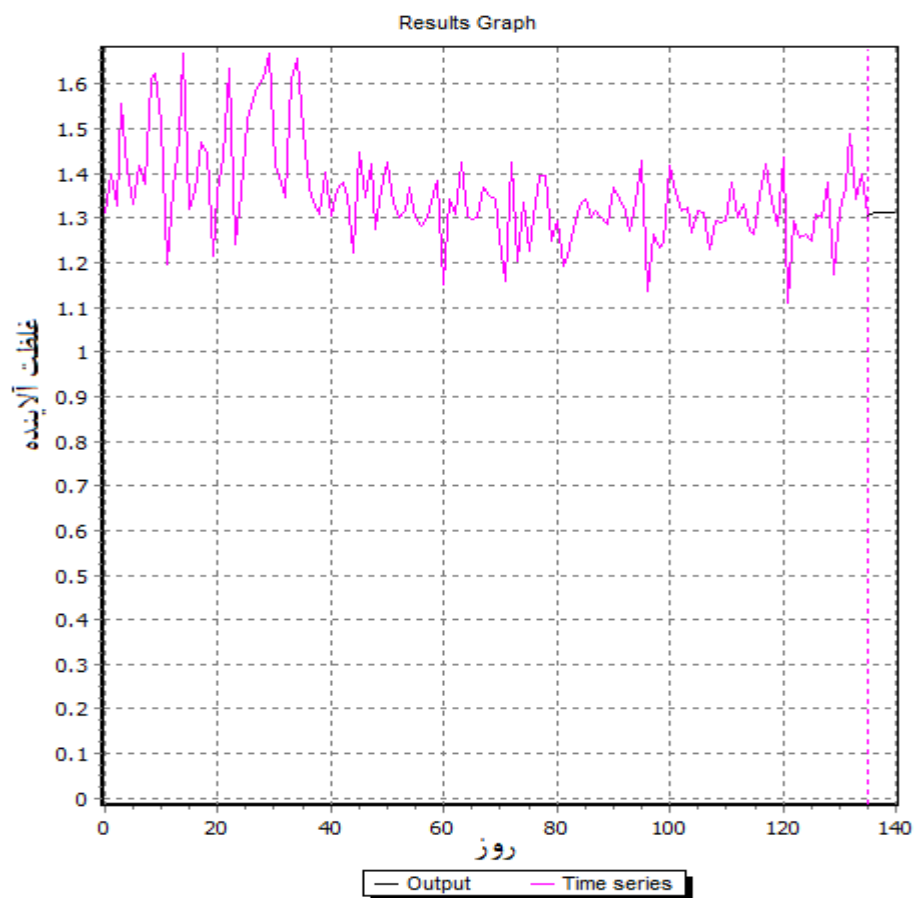
شکل ۴-۴۵: نمودار خطای مطلق میانگین در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای O_3



شکل ۴-۴۶: نمودار خطای جذر میانگین مجموع مربعات در شبکه‌های عصبی و تعداد مختلف لایه‌های پنهان برای O_3

بررسی میزان همبستگی و هر یک از خطاهای حاصل از این پیش‌بینی برای آلاینده O_3 نشان می‌دهد شبکه با به ترتیب ۲ و ۳ لایه‌ی پنهان بهترین نتایج را به همراه داشتند. این درحالی است که شبکه با یک لایه پنهان دارای خطای بزرگتر و به دنبال آن ضریب همبستگی پایین‌تری به نسبت سایر موارد دارد.

پیش‌بینی میزان غلظت آلاینده‌ها برای پنج روز بعد از بازه زمانی ۱۵۰ روز با استفاده از سری زمانی در شکل‌های ۴-۴۷ و ۴-۴۹ آورده شده است که میزان میانگین خطای آن‌ها به نسبت عدد اصلی غلظت، به ترتیب ۰/۹۶۷، ۰/۹۵۲ و ۰/۹۷۷ برای آلاینده‌های CO ، PM_{10} و O_3 انجام شد.

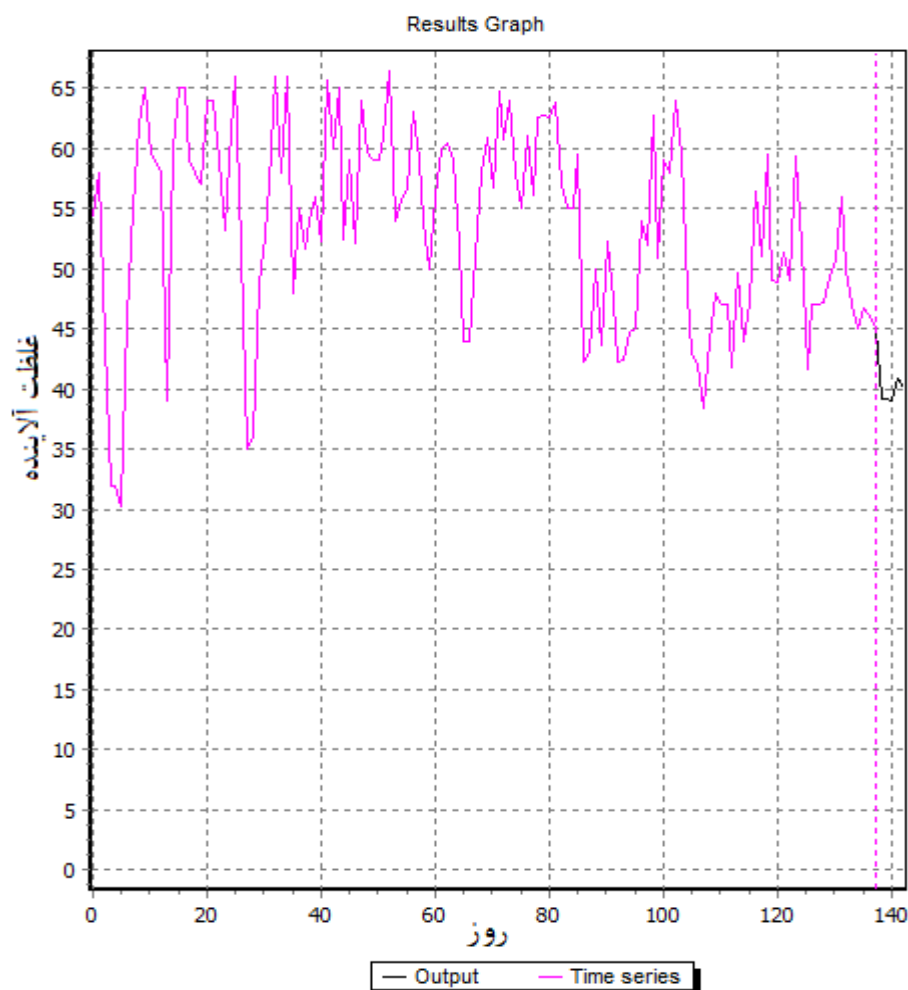


شکل ۴-۴۷: پیش‌بینی غلظت آلاینده پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای CO

مقایسه بین داده‌های اصلی و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل سری زمانی برای آلاینده کربن مونوکسید در جدول زیر صورت گرفته است.

جدول ۴-۲۵: مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده برای ۵ روز آینده CO

مقادیر اصلی غلظت	مقادیر پیش‌بینی شده
۱/۲۲۷	۱/۳۰۲
۱/۴۵۲	۱/۴۱۲
۱/۴۶۰	۱/۴۲۶
۱/۴۴۲	۱/۳۹۵
۱/۳۱۳	۱/۱۵۴

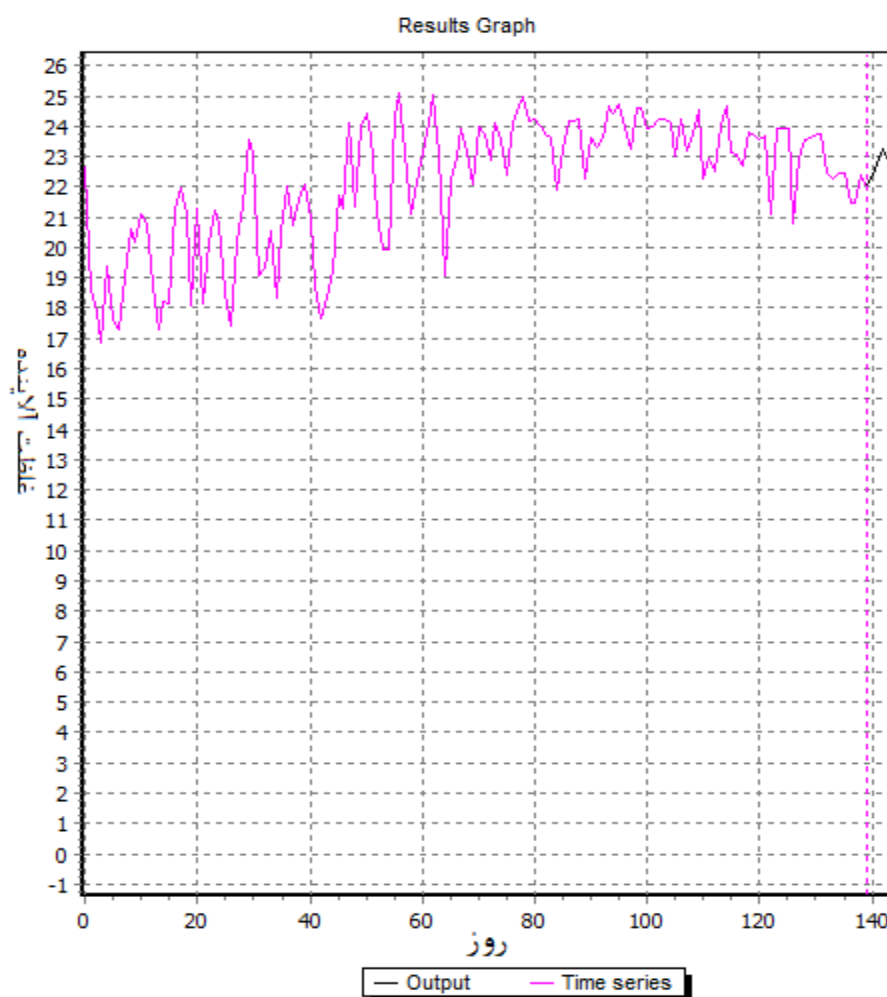


شکل ۴-۴: پیش‌بینی غلظت آلاینده پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای PM_{10}

مقایسه بین داده‌های اصلی و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل سری زمانی برای آلاینده PM_{10} در جدول زیر صورت گرفته است.

جدول ۴-۲۶: مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده برای ۵ روز آینده PM_{10}

مقادیر اصلی غلظت	مقادیر پیش‌بینی شده
۵۴/۲۱	۵۱/۴۹
۵۴/۸۴	۵۱/۹۴
۵۳/۳۳	۵۱/۲۲
۵۳/۷۲	۵۱/۲۹
۵۵/۶۰	۵۲/۸۷



شکل ۴-۴۹: پیش‌بینی غلظت آلاینده پنج روز بعد با استفاده از سری زمانی برای O_3

مقایسه بین داده‌های اصلی و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل سری زمانی برای آلاینده ازون در جدول زیر صورت گرفته است.

جدول ۴-۲۷: مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده برای ۵ روز آینده O_3

مقادیر اصلی غلظت	مقادیر پیش‌بینی شده
۱۹/۰۴	۱۹/۸۲
۲۰/۷۷	۲۰/۴۱
۲۱/۱۳	۱۹/۳۰
۲۳/۱۴	۲۳/۶۰
۲۱/۶۸	۲۲/۳۱

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہادات

۶-۱- مقدمه

عمده ترین منابع آلودگی هوای شهر مشهد را منابع متنوع انسانی و به ویژه وسایل نقلیه شامل می شوند. بررسی تاثیر پارامترهای ورودی مدل ها نشان داد که نوسانات روزانه، ماهانه و حتی سالیانه شرایط ترافیکی وسایل نقلیه و در کنار آن شرایط اقلیمی و حرکت توده های هوا، یکی از مهم ترین تاثیرات را در مدل سازی و پیش بینی آلاینده های هوا دارد. پیش بینی غلظت آلاینده ها به مدیران و سیاست گذاران این حوزه در مدیریت بهتر و واقع بینانه تر بحران های آلودگی های آینده کمک می کند تا بتوانند با بهترین راه ممکن و یا اجرایی ترین سیاست های کنترلی از سلامت عمومی جامعه محافظت کنند. استفاده از سری های مختلف زمانی در شبیه سازی شبکه های عصبی می تواند برای نیل به این هدف ابزار مناسبی باشد. روندی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت را می توان برای داده های حاصل شده از دیگر ایستگاه ها و شهر ها نیز به کار برد تا با استفاده از آن به یک سیستم مناسب برای پیش بینی آلودگی هوا برسیم.

۶-۲- نتیجه گیری

توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی به وسیله تعداد لایه ها، تابع فعال سازی و تابع انتقال در شبکه تعیین می گردد. برای رسیدن به عملکرد مناسب شبکه، ۷۰ درصد داده ها برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد داده ها برای اعتبارسنجی شبکه و ۱۵ درصد داده برای تست شبکه در نظر گرفته شدند. نرونهاي مختلفي با روش های مختلف در هر یک از شبکه ها به کار گرفته شد. در این پژوهش برای رسیدن به یک راهکار صحیح الگوریتم های مختلفی بکار برده شدند.

از توابع انتقال، تابع هایپرتانژانت به عنوان توابع انتقال مناسب و تابع فعال سازی خروجی Linear و دوره تکرار ۵۰۰ مرتبه برای ایجاد شبکه عصبی استفاده شده است.

کارایی شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) نسبت به روش های خطی از جمله رگرسیون چندگانه (MLR) که در اینجا استفاده شده است با مقایسه نتایج آن ها، مشخص می شود. در این تحقیق ضریب همبستگی (R) در شبکه عصبی مصنوعی برای تمامی آلاینده ها از ضریب همبستگی مدل رگرسیون

بیشتر بود که نشاندهنده کاربرد بیشتر و دقت بالاتر در شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش رگرسیون خطی است.

نتایج این تحقیق نشان داد شبکه‌های عصبی MLP، قادرند بین پارامترهای آب و هوایی و داده‌های غلظت آلاینده‌ها در مناطق شهری ارتباط برقرار کنند. از مقایسه این دو مدل، نتیجه گرفته می‌شود که بین پارامترهای آب و هوایی و غلظت آلاینده‌ها ارتباط کاملاً غیرخطی برقرار است.

برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا از داده‌های آب و هوایی به‌عنوان ورودی شبکه استفاده گردید. همچنین میزان تأثیرگذاری پارامترهای هواشناسی بر روی هریک از آلاینده‌ها بررسی شد که برای آلاینده مونوکسید کربن پارامترهای سرعت باد ۳۸ درصد، دما ۲۹/۲ درصد و رطوبت با ۲۵ درصد تأثیر بر روی غلظت این آلاینده، مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در بازه زمانی مدنظر هستند.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بر اساس محاسبات انجام‌شده برای آلاینده CO، شبکه با سه لایه پنهان و برای آلاینده PM₁₀ شبکه عصبی با سه لایه پنهان و درمورد O₃ شبکه با دو لایه پنهان بهترین عملکرد را نشان می‌دهند.

ضریب همبستگی داده‌های آموزش برای آلاینده CO بهتر از آلاینده PM₁₀ است، در صورتی که ضریب همبستگی داده‌های اعتبارسنجی برای آلاینده PM₁₀ بهتر از آلاینده CO است.

ضریب همبستگی داده‌های آموزش برای O₃ بهتر از آلاینده CO است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از این است که لزوماً استفاده از لایه‌های پنهان بیشتر و تعداد نرون‌های بیشتر در لایه‌های شبکه عصبی، منجر به عملکرد بهتر نخواهد شد.

۳-۶- پیشنهادات

بررسی و مدل‌سازی آلاینده PM_{2.5} در سطح شهر مشهد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند کمک بیشتری به حل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی هوا بکند.

از آنجایی که شبکه‌های عصبی را آموزش می‌دهند و این شبکه‌ها با مثال می‌آموزند، در صورتی که صحت داده‌ها مورد تایید بوده و شرایط محیطی دائماً در حال تغییر نباشد هر چه بتوان مثال‌های

بیشتری به آن آموخت نتایج بهتری به همراه می‌آورد.

در این پژوهش مدل‌سازی به صورت روزانه انجام شده است. پارامترهای هواشناسی به دست آمده از ایستگاه ژئوفیزیک به شکل مقادیر ۳ ساعته ثبت شده‌اند. در مورد پارامترهای هواشناسی نیز میانگین روزانه محاسبه شده است. مسلم است در صورت وجود پارامترهای ساعتی و بررسی دقیق‌تر، می‌توان کیفیت مدل‌سازی را افزایش داد.

به جای بکارگیری مدل‌های پیش‌بینی کننده بر اساس داده می‌توان از مدل‌های شبیه سازی بر مبنای روابط دینامیکی - فیزیکی جو و انتشار آلاینده‌ها (که فیزیک و دینامیک مسئله انتشار آلاینده‌ها را هم مدنظر قرار می‌دهد) برای پیش‌بینی آلاینده‌گی هوا استفاده کرد.

عملکرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی آلاینده‌های مورد نظر در این پژوهش به علت رفتار نامنظم داده‌های ورودی، کاملاً کارآمد نمی‌باشد، از این رو پیشنهاد می‌شود که برای بهبود فرایند پیش‌بینی از تلفیق شبکه‌های عصبی با تکنیک‌های داده کاوی و یا تلفیق الگوریتم‌های بهینه سازی مانند شبکه‌های عصبی موجکی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم‌های کلاسه بند ماشین بردار پشتیبان با شبکه عصبی برای بهینه سازی ساختار شبکه عصبی و یا وزن‌های شبکه عصبی استفاده شود.

اشکال در داده‌ها عمده ترین مشکل تجزیه و تحلیل پارامترها است. استمرار در برداشت اطلاعات و کالیبراسیون دستگاه‌های پایش آلودگی اصلی ترین گام‌ها در راستای تصمیم گیری موثر است. نصب تابلوهای نشان‌دهنده وضعیت کیفی هوا و همچنین اطلاع رسانی گسترده تر در مورد وضعیت آلودگی هوای هر منطقه گامی موثر در جهت فرهنگ سازی در خصوص کاهش آلودگی هوا است.

منابع

- [1] Z. Yang and J. Wang, "A new air quality monitoring and early warning system: Air quality assessment and air pollutant concentration prediction," *Environ. Res.*, vol. 158, pp. 105–117, 2017.
- [2] خزاعی، آ. شیخ، کریمی and وحیدنیا، "مقایسه دو روش مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی-فازی در پیش بینی غلظت آلاینده مونوکسید کربن،" *محیط شناسی*, vol. 38, no. 4, 2013.
- [3] ر. پور، آ. شیخ، علیمحمدی and ص. نیارکی، "توسعه مدل پیش بینی غلظت ازن در هوا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی،" *نشریه محیط زیست طبیعی*, vol. 69, no. 1, pp. 47–60, 2016.
- [4] E. Setton *et al.*, "The impact of daily mobility on exposure to traffic-related air pollution and health effect estimates," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 21, no. 1, p. 42, 2011.
- [5] M. W. Gardner and S. R. Dorling, "Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences," *Atmos. Environ.*, vol. 32, no. 14–15, pp. 2627–2636, 1998.
- [6] R. S. Collett and K. Oduyemi, "Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches," *Meteorol. Appl.*, vol. 4, no. 3, pp. 235–246, 1997.
- [7] L. Hrust, Z. B. Klaić, J. Križan, O. Antonić, and P. Hercog, "Neural network forecasting of air pollutants hourly concentrations using optimised temporal averages of meteorological variables and pollutant concentrations," *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 35, pp. 5588–5596, 2009.
- [8] A. R. Mamdoohi, M. Yazdanpanah, A. Taherpour, and M. Saffarzadeh, "An analysis of resident and Non-resident air passenger behaviour of origin airport choice," *Int. J. Transp. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–30, 2014.
- [9] K. M. Mok and S. C. Tam, "Short-term prediction of SO₂ concentration in Macau with artificial neural networks," *Energy Build.*, vol. 28, no. 3, pp. 279–286, 1998.
- [10] عتایی، عرفانی، ب. افشان and ادريس، "ارزیابی آلاینده های هوا و تعیین شاخص کیفیت هوا در شهر زاهدان،" *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*, vol. 18, pp. 485–500, 2016.
- [11] رهبان، سمانه، رسام، قربانعلی، ب. ترابی and خوشنودیزدی، "ارزیابی مدل های رگرسیونی برای توصیف واکنش جوانه زنی به دما در عدس (Lens culinaris Medik)," *علوم کشاورزی دانشگاه آزاد تبریز*, vol. 8, 2014.
- [12] ب. نعیمه، رفیعی، کریمی، راسخ and عبدالرحمن، "برآورد پراکنش آلاینده های منتشره از منابع متحرک آلودگی هوا (منطقه مورد مطالعه: اهواز)،" *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*, vol. 19, pp. 67–76, 2017.
- [13] عیو ضلو، ر ضویان، صرافى، مظفر and قورچی، "گفتمان های آلودگی هوا در کلان شهر تهران (گفتمان دولت ملی در برابر گفتمان دولت محلی)،" *پژوهش های جغرافیای سیاسی*, vol. 2, no. 5, pp. 87–116, 2018.

- [14] ط. س. گردفرامری، ا. گندمکار، ه. عطایی، مفیدی and م. ب. ب. آبادی، "بررسی تأثیر عناصر اقلیمی بر آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از مدل شبکه عصبی،" *جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*, vol. 8, 2018.
- [15] شه سواری، ط. یزدی and مو سوی، "تأثیرات منفی فعالیت‌های معدنی بر کیفیت هوا، خاک و منابع آبی"، *دومین همایش بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست*, ۲۰۱۸.
- [16] س. محمد and ک. م. حمید، "بررسی روابط بین عناصر آب و هوایی و نوسانات آلودگی هوا (مورد: شهر مشهد)".
- [17] R. J. Heinsohn and R. L. Kabel, "Sources and control of air pollution: Engineering principles," 1998.
- [18] ن. کبری، ض. سعیده and رک. ن. انوشیروان، "اثرات منواکسید کربن ناشی از آلودگی هوا در حاملگی بر جنین و آسیب شناسی بندناف".
- [19] نظری، ر. اله، م. عادل and دی. دادگر، "بررسی عوامل موثر بر آلودگی محیط‌زیست در ایران طی دوره ۱۳۵۳-۱۳۹۲"، *پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی*, vol. 6, 2016.
- [20] نوفرستی، عتایی، نوری، م. لواسانی and جوزی، "پیش‌بینی میزان مرگ و میر ناشی از ذرات معلق با استفاده از نرم‌افزار AirQ و ارزیابی ریسک بهداشتی در شهر سمنان"، *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*, vol. 20, no. 6, pp. 211–226, 2019.
- [21] H. B. Alvarez, R. S. Echeverria, P. S. Alvarez, and S. Krupa, "Air quality standards for particulate matter (PM) at high altitude cities," *Environ. Pollut.*, vol. 173, pp. 255–256, 2013.
- [22] استانداردهای هوای پاک تا سال ۱۳۹۱، مصوبه ۱۳۸۸ کمیسیون امور زیربنایی، صنعت و محیط زیست
- [23] M. E. López, E. R. Rene, Z. Boger, M. C. Veiga, and C. Kennes, "Modelling the removal of volatile pollutants under transient conditions in a two-stage bioreactor using artificial neural networks," *J. Hazard. Mater.*, vol. 324, pp. 100–109, 2017.
- [24] O. Postolache, P. Girao, and M. Pereira, "Neural network application in a carbon monoxide measurement system," in *IJCNN'01. International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings (Cat. No. 01CH37222)*, 2001, vol. 3, pp. 2076–2081.
- [25] M. Vakili, S. R. Sabbagh-Yazdi, S. Khosrojerdi, and K. Kalhor, "Evaluating the effect of particulate matter pollution on estimation of daily global solar radiation using artificial neural network modeling based on meteorological data," *J. Clean. Prod.*, vol. 141, pp. 1275–1285, 2017.
- [26] ث. الاسلامی، س. م. موسوی and م. اعلمی، "مدل‌سازی و پیش‌بینی تشکیل آزون هوای شهرستان مشهد با استفاده از شبکه عصبی-فازی"، in *ANFIS، یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران*, ۲۰۰۶.
- [27] *et al.*, "برآورد اثرات بهداشتی ناشی از مواجهه با آلاینده ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون با استفاده از مدل Air Q در شهر اهواز در سال ۱۳۸۸"، *فصلنامه سلامت و محیط‌زیست*, vol. 8, no. 1, pp. 117–126, 2015.

- [28] ث. بهرام، ر. خ. هما and ق. باقر، "بررسی تغییرات منطقه ای بارش سالانه با کاربرد روش های زمین آمار (مطالعه موردی: استان فارس)".
- [29] D. P. Robinson, C. D. Lloyd, and J. M. McKinley, "Increasing the accuracy of nitrogen dioxide (NO₂) pollution mapping using geographically weighted regression (GWR) and geostatistics," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 21, pp. 374–383, 2013.
- [30] ع. ش. د. مهدی، ت. ل. محمد and خ. ص. علی، "پیش بینی کوتاه مدت آلودگی هوا با کمک شبکه های عصبی پرسپترون چند لایه، خط حافظه دار تاخیر، گاما و ANFIS با روشهای ترکیبی آموزش مبتنی بر PSO."
- [31] ب. پ. سیامک and چ. امیر، "پیش بینی میزان غلظت آلاینده های هوای تهران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی."
- [32] فلاحتی، سهیلی، نظیفی، مینو and عباسپور، "بررسی و مدل سازی اثر آلودگی هوا بر سلامت، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی،" *مجله تخصصی/پیدمیولوژی/ایران*, vol. 9, no. 2, pp. 39–49, 2013.
- [33] H. Niska *et al.*, "Evaluation of an integrated modelling system containing a multi-layer perceptron model and the numerical weather prediction model HIRLAM for the forecasting of urban airborne pollutant concentrations," *Atmos. Environ.*, vol. 39, no. 35, pp. 6524–6536, 2005.
- [34] S. M. S. Nagendra and M. Khare, "Artificial neural network based carbon monoxide persistence models for episodic urban air quality management," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 139, no. 1–3, pp. 247–255, 2008.
- [35] ص. میرستار and ر. اکبر، "مقایسه نتایج شبکه های عصبی پرسپترون چند لایه با رگرسیون چندگانه در پیش بینی غلظت اوزون در شهر تبریز."
- [36] J. Yi and V. R. Prybutok, "A neural network model forecasting for prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area," *Environ. Pollut.*, vol. 92, no. 3, pp. 349–357, 1996.
- [37] A. B. Chelani, C. V. C. Rao, K. M. Phadke, and M. Z. Hasan, "Prediction of sulphur dioxide concentration using artificial neural networks," *Environ. Model. Softw.*, vol. 17, no. 2, pp. 159–166, 2002.
- [38] U. Sahin, O. N. Ucan, C. Bayat, and N. Ozturun, "Modeling of SO₂ distribution in Istanbul using artificial neural networks," *Environ. Model. Assess.*, vol. 10, no. 2, pp. 135–142, 2005.
- [39] J. Kukkonen *et al.*, "Analysis and evaluation of selected local-scale PM₁₀ air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo," *Atmos. Environ.*, vol. 39, no. 15, pp. 2759–2773, 2005.
- [40] M. Cecchetti, G. Corani, and G. Guariso, "Artificial neural networks prediction of PM₁₀ in the Milan area," 2004.
- [41] P. Pérez, A. Trier, and J. Reyes, "Prediction of PM_{2.5} concentrations several hours in advance using neural networks in Santiago, Chile," *Atmos. Environ.*, vol. 34, no. 8, pp. 1189–1196, 2000.

- [42] A. Vlachogianni, P. Kassomenos, A. Karppinen, S. Karakitsios, and J. Kukkonen, "Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO_x and PM₁₀ in Athens and Helsinki," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 8, pp. 1559–1571, 2011.
- [43] G. Grivas and A. Chaloulakou, "Artificial neural network models for prediction of PM₁₀ hourly concentrations, in the Greater Area of Athens, Greece," *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. 7, pp. 1216–1229, 2006.
- [44] K. Siwek and S. Osowski, "Improving the accuracy of prediction of PM₁₀ pollution by the wavelet transformation and an ensemble of neural predictors," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 25, no. 6, pp. 1246–1258, 2012.
- [45] S. I. V Sousa, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. C. Pereira, "Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations," *Environ. Model. Softw.*, vol. 22, no. 1, pp. 97–103, 2007.
- [46] X. Feng, Q. Li, Y. Zhu, J. Hou, L. Jin, and J. Wang, "Artificial neural networks forecasting of PM_{2.5} pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation," *Atmos. Environ.*, vol. 107, pp. 118–128, 2015.

<http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> [47]

- [48] رضایی، الف، صیادی، م. "بررسی کمی و کیفی وضعیت آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل اقلیمی شهر بیرجند" فصلنامه سلامت جامعه، ۱۳۹۲، دوره هفتم، شماره ۴
- [49] هدی، ت and ابوالفضل، م، ۱۳۹۱، "توزیع زمانی مکانی آلاینده‌های شاخص هوای شهر مشهد و عوامل موثر بر آن" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد
- [50] منہاج، م، ۱۳۹۷ "مبانی شبکه‌های عصبی هوش محاسباتی" جلد اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

Abstract

The city of Mashhad is the second largest city of Iran and has about 3.5 million population. The existence of various sources of pollutants exacerbates the problem of air pollution and subsequently presenting a solution to this problem in this city is very necessary. In this study, a model based on multiple regressions (linear method) and another model based on artificial neural network (nonlinear method) is presented to predict the concentration of CO, PM₁₀ and O₃ according to climatic conditions in city of Mashhad. The results of the linear and nonlinear models are then compared. The meteorological data of this study include wind speed, relative humidity, wind direction, temperature, precipitation and atmospheric pressure were collected from Mashhad Meteorological Station and temperature inversion and traffic data were also included in the model. Air pollution data (concentration of carbon monoxide and particulate matter less than 10 µm) were obtained from the Environmental Pollution Monitoring Center of Mashhad. In this study, air pollution data were obtained in 2016 & 2017 for Sajad air pollution station in Mashhad. Out of the total data 15% were selected for network testing, 15% for network validation, and 70% for network training. Then the correlation coefficient between air pollutants and climatic elements was investigated, that indicates high impact of wind speed (38%) and air temperature (29.2%) on air pollution. The networks were run with one, two, three and four hidden layers for each contaminant and the results, which were for 730 days, were presented as tables and graphs. These results confirm that the ability of the neural network model (with RMSE error of 0.137 for CO) is more than linear regression methods (with RMSE error of 0.572 for CO). Also, using more hidden layers and more neurons in the neural network layers does not necessarily lead to better performance. Predictions for the next 5 days with mean error of 0.97, 0.95 and 0.98 for CO, PM₁₀ and O₃ were obtained by time series method, respectively.

Keywords: Air pollution, Prediction, Multiple linear regression, Neural network



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Environmental Engineering
Monitoring of air quality parameters using artificial neural
network (case study Mashhad city of Iran)

By: Mohamad Dehghan Nayeri

Supervisor:
Ramazan Vagheei

January 2020