

مدل مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور تخمین محتوای PM₁₀ توفان‌های گردوغبار به کمک تصاویر ماهواره‌ای MODIS^۱

مجید حجتی^{۱*}، علی درویشی بلورانی^۲، سید کاظم علوی‌پناه^۳، مجید کیاورز^۴، جواد بذاق جمالی^۵

۱. کارشناس ارشد رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
۲. عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
۳. عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
۴. عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
۵. عضو هیئت علمی گروه هواشناسی، سازمان هواشناسی

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۶/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

چکیده

یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت هوا، میزان غلظت ذرات معلق است. ذرات معلق از ترکیبی از ذرات مایع و جامد، با قطر آئروپدینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر یا ۲/۵ میکرومتر تشکیل شده است. منبع اصلی این ذرات در مناطق طبیعی همچون نمک دریا، گردوغبار یا منابع ناشی از فعالیت‌های انسان است. هدف این کار بررسی امکان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS به منظور تخمین میزان PM₁₀ اتمسفری ناشی از توفان‌های گردوغبار است. بدین منظور، با استفاده از شاخص عمق بصری (Aerosol optical depth) سنجنده MODIS مدلی تجربی توسعه داده شد. تاکنون در زمینه تخمین غلظت ذرات معلق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطالعات زیادی انجام شده است. بیشتر این مطالعات با استفاده از شاخص عمق بصری ذرات معلق و ترکیب این شاخص با پارامترهای اقلیمی به مدل‌سازی غلظت ذرات پرداخته‌اند. شاخص عمق بصری سنجنده مادیس در پنج باند مختلف ارائه می‌شود. تحقیقات انجام‌شده تاکنون همگی با استفاده از باند ۵۵۵ نانومتر به تخمین غلظت ذرات معلق پرداخته‌اند. در این پژوهش، نخست هدف تعیین باند مناسب برای شاخص عمق بصری ذرات معلق برای تخمین غلظت PM₁₀ در توفان‌های گردوغبار است. در ادامه پس از مشخص شدن بهترین باند با استفاده از پارامترهای اقلیمی و هواشناسی به مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی در تخمین غلظت PM₁₀ توفان‌های گردوغبار پرداخته‌ایم. در این پژوهش در اولین قدم، روزهای دارای توفان گردوغبار در سال ۱۳۹۳ در شهر اهواز در استان خوزستان مشخص شده است. به منظور این کار از پارامتر هواشناسی قابلیت دید در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده است. در ادامه در روزهای دارای توفان گردوغبار، تصاویر ماهواره‌ای مادیس تهیه و مقادیر شاخص عمق بصری از آن استخراج شده است. سنجنده مادیس شاخص عمق بصری را در پنج باند جداگانه ارائه می‌دهد. در این مرحله، به منظور شناسایی بهترین باند برای مدل‌سازی با استفاده از شاخص همبستگی، میزان همبستگی داده‌ها با مقادیر داده‌های زمینی محاسبه و بهترین باند با بیشترین میزان همبستگی انتخاب شده است. پس از استخراج مقادیر شاخص عمق بصری از تصاویر ماهواره‌ای مادیس، به منظور افزایش دقت مدل برای مقادیر برآوردشده، در مقایسه با مقادیر PM₁₀ اندازه‌گیری‌شده در سطح زمین، از پارامترهای اقلیمی همچون دما، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد استفاده شد. این پارامترها به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم بر PM₁₀ اثرگذار است. به منظور ایجاد مدلی مناسب در این مقاله برای اولین بار از مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP (Multilayer Perceptron) و RBF (Radial-Basis Function) استفاده شده و نتایج خروجی از این دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. پس از مدل‌سازی نهایی برای صحت‌سنجی مدل‌های استفاده‌شده از دو متغیر Root Mean Square Error (RMSE) و MAE (Mean Absolute Error) استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل MLP بهترین تخمین را با کمترین میزان RMSE به میزان ۷۸ ارائه کرد. همچنین، این پژوهش نشان داد که شاخص عمق بصری استخراج‌شده از باند ۴۷۶ نانومتر سنجنده مادیس نتایج دقیق‌تری نسبت به باندهای دیگر این سنجنده ارائه می‌کند. همچنین، مدل RBF با تخمین‌های غیردقیق برای مطالعه و مدل‌سازی غلظت PM₁₀ قابلیت استفاده ندارد.

کلیدواژه

PM₁₀، ANN، MLP، AOD، MODIS، شبکه عصبی مصنوعی

۱. سرآغاز

یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت هوا، میزان غلظت ذرات معلق^۲ است. ذرات معلق از ترکیبی از ذرات مایع و جامد، با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر یا ۲/۵ میکرومتر تشکیل شده است. منبع عمده این ذرات در مناطق طبیعی همچون نمک دریا، گردوغبار، خاکسترهای آتشفشانی یا منابع ناشی از فعالیت‌های انسان همچون سوخت‌های فسیلی، صنایع و حمل‌ونقل است. در تقسیم‌بندی دیگری ذرات معلق به صورت مکانیکی به دسته‌هایی همچون گردوغبار یا به صورت ترکیب شیمیایی (همچون SO₂ و NO_x) طبقه‌بندی شده است (Emili et al., 2010).

آئروسول‌های گردوغباری شامل تمامی اجزای معلق در هوا به جز گازهاست. این اجزا را می‌توان کریستال‌های یخ، برخی اجزای جامد و قطرات آب برش‌مرد. مقادیر معین برای آئروسول‌های گردوغبار را اجزایی با قطری کمتر از ۱ میلی‌متر مشخص می‌کند (Hrdličková, et al., 2008).

تأثیر گردوغبار و نمک دریایی بر تولید PM₁₀ (ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون) به علت قطری بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرون و بسیار بیش از PM_{2.5} (ذرات معاقباً قطر کمتر از ۲/۵ میکرون) است. از سوی دیگر، منشأ ذرات معلق عامل تعیین‌کننده‌ای در پارامترهای مخصوص به آن است. برای مثال، در مناطق دارا آلودگی‌های صنعتی، به‌منظور پایش این آلودگی‌ها، بررسی PM₁ و PM_{2.5} بسیار مناسب‌تر از بررسی PM₁₀ است و نتایج بهتری در بررسی این ذرات ارائه می‌کند. به‌طور عکس، به‌علت اینکه ذرات معلق معدنی و گردوغبارهای معدنی (همچون سرامیک‌ها) قطری بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرومتر دارد، برای بررسی ذرات معلق معدنی و گردوغبارهای معدنی بررسی پارامتر PM₁₀ نتایج بهتری از خود نمایش می‌دهد (Rodríguez et al., 2007).

همان‌گونه که اشاره کردیم یکی از پارامترهای موثر در قطر آئروسول‌ها منشأ تولید آن است. از جمله پارامترهای دیگر سن تشکیل ذرات معلق و سازوکار تشکیل آن است.

منظور از سن تشکیل ذرات مدت زمانی است که ذره‌ای تشکیل می‌شود و ممکن است بعد از مدتی با سایر ذرات ترکیب شود. عامل دیگر، سازوکار تشکیل ذرات است و با توجه به اینکه ذرات از چه طریقی وارد هوا شود یا محتوای تشکیل‌دهنده آن چگونه باشد سازوکار متفاوتی دارد و بالطبع قطر آن نیز از چندین نانومتر تا چند ده میکرون متغیر است. فعالیت‌های انسان بر ترکیب ذرات معلق اثرگذار است و به طور کلی، موجب افزایش میزان غلظت آن در مقایسه با مقدار موجود طبیعی می‌شود (Rodríguez et al., 2007).

داده‌های سنجش از دور به‌علت پوشش وسیع، منظم و متوالی ابزار مناسبی برای تهیه نقشه کیفیت هوا فراهم می‌کند. در داده‌های سنجش از دور شاخص AOD^۳ (عمق بصری ذرات معلق) نشان‌دهنده میزان کاهش انرژی الکترومغناطیسی بر اثر وجود آئروسول‌ها در ستون عمودی اتمسفر در طول موج مشخصی است که به‌منظور تخمین کیفیت هوا استفاده می‌شود (Abdul et al. 2014; Bilal et al., 2014; Yap et al., 2011). مشکلات اساسی استفاده از شاخص عمق بصری عبارت است از تخمین صحیح شاخص عمق بصری به کمک تصاویر ماهواره‌ای، همچنین همبستگی مناسب بین مقادیر شاخص عمق بصری و مقادیر ذرات معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سطح زمین است (Emili et al., 2010). از جمله مشکلات دیگر در این زمینه این است که لازمه استخراج شاخص عمق بصری از تصاویر ماهواره‌ای وجود آسمان بدون ابر است که این امر در فصل‌های پاییز و زمستان خیلی کم محقق می‌شود.

روش‌های مختلفی به‌منظور بررسی‌های خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آئروسول‌ها وجود دارد، از جمله غلظت، پراکندگی و استخراج مشخصات آماری این مواد در مناطق مختلف. این روش‌ها هم‌جز روش‌های بررسی‌های میدانی و هم سنجش از دور است. هر یک از این روش‌ها ممکن است به‌صورت فعال یا غیرفعال باشد. ترکیب

برای به‌دست آوردن شاخص عمق بصری از این سنجنده‌ها الگوریتم‌های مختلفی از جمله آبی عمیق^{۱۱} و هدف تیره^{۱۲} توسعه داده شده است (Bilal et al., 2013).

با توجه به اینکه در حدود ۷۵ درصد از کشور ایران را مناطق بیابانی فراگرفته است و توده‌های گردوغبار معمولاً منشأ بیابانی دارد مطالعه پدیده‌های گردوغبار و خصوصیات آن‌ها در ایران اهمیت دارد. بر اثر قرارگرفتن کشور ایران در مجاورت کشورهای عراق، سوریه و عربستان که جزء منشأهای اصلی توفان‌های گردوغبار غرب و جنوب آسیاست این امر بیش از پیش خود را نمایان می‌کند (Wilkerson et al., 1991). ذرات گردوغبار موجود در جو بر اثر فعالیت‌های انسانی همچون فعالیت‌های شهری، صنعتی و فرایندهای طبیعی ناشی از فرسایش‌های بادی شدید ایجاد می‌شود. این ذرات که تنها از گرد و خاک تشکیل نشده است، شامل بسیاری از اجزای شیمیایی و آلودگی‌های مختلف از جمله سلیس، آلومینیم، پتاسیم، کربن و بسیاری از مواد آلی دیگر است. فعل‌وانفعالات این اجزا با نور خورشید و آثار آن بر اتمسفر عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای را موجب شده است. علاوه بر آن، طول عمر این توده‌های گردوغبار که گاه تنها چند روز است موجب تغییر غلظت این ذرات در مکان‌های مختلف شده است که برای مشاهده آن از طریق فضا تکنیک‌های مختلفی نیاز است. از سوی دیگر، تأثیر توفان‌های گردوغبار بر مسائل اجتماعی و اقتصادی از طریق ایجاد اختلال در دید، ایجاد بیماری‌ها و برداشت سطحی خاک‌های کشاورزی ایجاد می‌شود. این مشکلات در مناطقی از ایران به‌چشم می‌خورد که با مشکلات کمبود آب همراه است (Amiraslani & Dragovich, 2011).

قرارگیری در معرض آلودگی‌های PM انتظار از زندگی را کاهش و تعداد مرگ کودکان را افزایش می‌دهد. همچنین، امکان افزایش خطر حملات قلبی نیز در این زمینه افزایش پیدا می‌کند (Emili et al., 2010). مطالعات انجام‌شده نشان داده است که ذرات معلق موجود در جو

اندازه‌گیری‌های سنجش از دور و داده‌های ناشی از ایستگاه‌های روی سطح زمین قابلیت داشتن مشخصات و ویژگی‌های آئروسول‌ها در اتمسفر را می‌دهد، از جمله اندازه و خصوصیات شیمیایی. در مقایسه با روش‌های سنجش کیفیت هوا به‌صورت زمینی، روش‌های سنجش از دور به بررسی میزان تشعشع انرژی الکترومغناطیسی و فعل و انفعالات آن با اتمسفر و سطح زمین می‌پردازد. (Y. J. Kaufman, Tanré, & Boucher, 2002; Tanr, Kaufman, Herman, & Mattoo, 1997). یکی از پارامترهایی که در تخمین کیفیت هوا به کمک تصاویر ماهواره‌ای کمک می‌کند شاخص عمق بصری است (رابطه ۱).

$$\tau_{\lambda} = \int_0^H k_{ext}^a(z, \lambda) dz \quad (1)$$

که در آن، H ارتفاع بالای اتمسفر، $k_{ext}^a(z, \lambda)$ شاخص کاهش آئروسول^۴ در ارتفاع z بالای سطح زمین در طول موج λ است. هدف اصلی در روش‌های به‌دست آوردن آئروسول‌ها تخمین وابستگی مکانی بین رفلکتانس مشاهده‌شده با ماهواره و میزان τ_{λ} است (Kokhanovsky & Leeuw, 2009). با توجه به در نظر گرفتن مجموع روابط تعریف‌شده و کارهای انجام‌شده در این حوزه می‌توان به‌طور کلی AOD را به‌صورت زیر تعریف کرد: اندازه‌گیری میزان کاهش نور خورشید ناشی از پخش و جذب بر اثر ذرات آئروسول (Ångström, 1930; van de Hulst, 1948). رادیومترهای تصویربرداری غیرفعال نیز قادر به فراهم کردن داده‌های اندازه‌گیری‌شده AOD است (Tang et al., 2004). مقیاس این اندازه‌گیری‌ها به‌صورت محلی یا به‌صورت جهانی است. (Y. Kaufman, Gobron, Pinty, Widlowski, & Verstraete, 2002). همچنین، قدرت تفکیک زمینی این شاخص‌ها خیلی بهتر از قدرت تفکیک زمینی سنسورهای موجود در سطح زمین است. البته، مشکلات ذکرشده درباره تخمین میزان شاخص عمق بصری در این قسمت همچنان وجود دارد (Schaaf et al., 2002). محصولات شاخص عمق بصری بر خشکی از سنسورهای مختلفی از جمله TOMS^۵، SEAWIFS^۶، OMI^۷، POLDER^۸، MERIS^۹، MODIS^{۱۰} به‌دست می‌آید.

Gua و همکاران (2014) در شانگهای با استفاده از شاخص عمق بصری سنجنده مودیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر در دوره زمانی ۲۰۱۲-۲۰۱۳ بین مقادیر PM2.5 و مقادیر شاخص عمق بصری توانستند ضریب همبستگی R2 ۰/۸۵۰ برای پاییز و ۰/۶۹ را برای بهار به دست آورند. این تفاوت میزان همبستگی نشان‌دهنده اثر پارامترهای هواشناسی همچون رطوبت نسبی در تخمین مقادیر غلظت ذرات معلق است. آن‌ها برای این منظور پارامترهای رطوبت نسبی و ارتفاع لایه مرزی را نیز در مدل خود استفاده کردند.

Chitranshi و همکاران (2014) نیز با استفاده از شاخص عمق بصری سنجنده مودیس به تخمین مقادیر PM10 در کشور هند پرداختند. آن‌ها برای دوره سال ۲۰۱۰-۲۰۱۱ توانستند همبستگی ۰/۴۵ را بین مقادیر شاخص عمق بصری و PM10 به دست بیاورند. آن‌ها با استفاده از پارامترهای اقلیمی همچون سرعت و جهت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی توانستند ضریب همبستگی R2 مدل نهایی خود را به ۰/۸۱ برسانند. مدل استفاده شده در این مطالعه، مدل رگرسیون خطی است. Grgurić و همکاران (2014) رابطه بین شاخص عمق بصری مودیس را با داده‌های PM10 بررسی کردند. دوره بررسی این پژوهش از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ بود و به این نتیجه رسیدند که رابطه قابل قبولی بین شاخص عمق بصری تصاویر مودیس با مقادیر PM10 در ایستگاه‌های زمینی وجود ندارد.

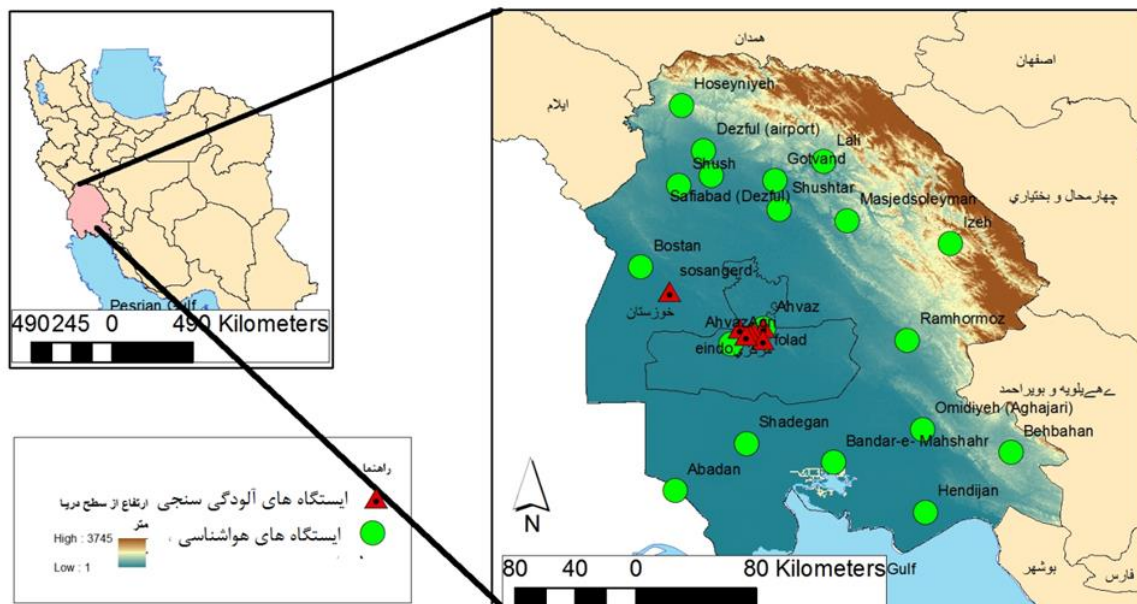
Green و همکاران (2009) داده‌های PM10 و PM2.5 ایستگاه‌های زمینی را با داده‌های شاخص عمق بصری مودیس و GEOS مقایسه کردند. همبستگی بین محصول شاخص عمق بصری مودیس و ایستگاه‌های AERONET ۰/۸۳۵ و بین شاخص عمق بصری، GEOS و ایستگاه‌های AERONET ۰/۵۲۳ به دست آمده است. نتایج به دست آمده در مورد همبستگی بین PM2.5 و شاخص عمق بصری در منطقه مورد بررسی در این پژوهش نشان داده است که این همبستگی در پاییز بیشترین میزان خود را داراست و در زمستان به پایین‌ترین میزان می‌رسد.

جز عوامل مؤثر بر بیماری‌های ریوی و قلبی است. همین امر اهمیت نظارت و پایش ذرات معلق را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نبود پراکندگی مناسب ایستگاه‌های آلودگی سنجی در مناطق، و تنظیم نبودن سخت‌افزارهای آلودگی سنجی جز عوامل دیگری است که نیاز به تخمین این ذرات را با استفاده از مدل‌های جغرافیایی و مکانی بیش از پیش مشخص می‌کند.

در مطالعات Kaufman (2002) درباره فراوانی گردوغبار در اتمسفر، به اهمیت وجود اطلاعات دریافتی از سنجنده مادیس در شناخت بهتر رفتار گردوغبار در اتمسفر به دفعات اشاره شده است. در شاخص NDDI (Normal Difference Dust Index) میزان بازتاب در باندهای شماره ۳ و ۷ سنجنده مادیس در منطقه جنوب شرق آسیا، در شناسایی گردوغبار مؤثر بوده است (Kaufman, 2002). Wang و همکاران (2010) نیز رابطه بین شاخص عمق بصری مودیس را با مقادیر غلظت ذرات معلق ایستگاه‌های زمینی بررسی کردند. آن‌ها با تأثیر دادن پارامتر رطوبت نسبی در مدل خود توانستند ضریب همبستگی R2 مدل خود را از ۰/۴۳ به ۰/۷۷ برای PM10 و از ۰/۳۳ به ۰/۸۵ برای PM2.5 افزایش دهند. منطقه مورد مطالعه آن‌ها در کشور چین قرار داشت و مدل مورد استفاده در این پژوهش رگرسیون خطی بوده است.

Fan و همکاران (2013) به بررسی آثار توفان‌های گردوغبار در سال ۲۰۰۹ در منطقه جنوب چین بر غلظت ذرات معلق ایستگاه‌های زمینی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان غلظت ذرات معلق در روزهای دارای توفان گردوغبار حدود دو برابر بیش از روزهای عادی بوده است. در مطالعات بیشتر مشخص شد که غلظت شیمیایی این توفان‌ها نیز موجب شده است برخی گازها، همچنین عناصری همچون آهن و یون‌ها دو تا سه برابر افزایش پیدا کند. همچنین، عناصر Na, Ti, Zn, Cu طی توفان‌های گردوغبار کاهش پیدا کرده بود. بنابراین، نتیجه گرفتند که این عناصر ناشی از منابع محلی است و تحت تأثیر توفان‌های گردوغبار به آن منطقه منتقل نشده است.

شرقی، در بخش جلگه‌ای خوزستان و با ارتفاع ۱۸ متر از سطح دریا واقع شده است. وجود کارخانجات بزرگ صنعتی، تأسیسات اداری و صنعتی شرکت مناطق نفت خیز جنوب و شرکت ملی حفاری ایران، اهواز را به یکی از مهم ترین مراکز صنعتی ایران تبدیل کرده و همین امر سبب شده است که مهاجران بسیاری روی به اهواز کنند. این شهر یکی از شهرهای ایران است که در آن بیشترین توفان‌های گردوغبار اتفاق می‌افتد. منشأ اکثر این توفان‌های گردوغبار کشور همسایه ایران، عراق و سوریه است و برخی توفان‌های اخیر منشأ داخلی نیز دارد (محیط‌زیست خوزستان، ۱۳۹۳). در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های آلودگی سنجی با مثلث و ایستگاه‌های هواشناسی به دایره مشخص شده است.



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های مورد استفاده (هواشناسی و آلودگی سنجی)

زمینی شامل دو دسته داده‌های آلودگی هوا (مقادیر غلظت ذرات) و داده‌های اقلیمی است. داده‌های آلودگی هوا تنها به منظور مدل سازی و اعتبارسنجی داده مدل نهایی استفاده شده است. داده‌های اقلیمی منطقه جز پارامترهای مؤثر در

در این پژوهش هدف اصلی مدل‌سازی تخمین غلظت ذرات معلق به کمک تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی است. بدین منظور از داده‌های اقلیمی و شاخص عمق بصری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای برای مدل‌سازی استفاده شده است. هدف دیگر در این پژوهش شناسایی بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین غلظت ذرات معلق است. بدین منظور دو مدل MLP و RPF بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهر اهواز مرکز استان خوزستان یکی از کلان شهرهای ایران است. این شهر که در بخش مرکزی شهرستان اهواز قرار دارد، در موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول

۲.۲. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از دو دسته داده‌ها استفاده شده است. نخست داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی و دوم داده‌های ماهواره‌ای. داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری

و تعداد ایستگاه‌های فعال کمی دارد. همین امر یکی از مواردی است که ضرورت استفاده از مدل‌های سنجش از دور را در تخمین غلظت آلودگی‌ها بیش از پیش مشخص می‌کند. شکل ۲ خلاصه‌ای از داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تقسیم‌بندی داده‌های مورد استفاده در پژوهش (منبع: نگارندگان)

برای منطقه مورد مطالعه نیز رابطه بین مقادیر ذرات معلق و جهت و سرعت باد در نمودارهای گلباد نشان داده شده است. در مطالعات قبلی بین سرعت باد و مقادیر PM10 رابطه منفی وجود دارد. همچنین، افزایش رطوبت هوا نیز موجب کاهش میزان PM10 در اتمسفر می‌شود. علت این امر این است که رطوبت نسبی معمولاً با وقوع بارندگی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و این بارندگی موجب می‌شود که آلودگی‌های موجود در هوا کاهش پیدا کند (Afzali et al., 2014; Azmi et al., 2010; Gvozdić et al., 2011).

این داده‌ها شامل رطوبت نسبی (SRH)، سرعت باد (SWS)، جهت باد (SWD)، میانگین دما (T)، و فشار سطح زمین (SP) است که از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه جمع‌آوری شده است. پارامترهای رطوبت سطحی، جهت و سرعت باد و فشار سطح زمین به صورت میانگین سه ساعته و پارامتر میانگین دما به صورت میانگین ۱۲ ساعته تهیه شده است. تا حد امکان سعی شده است ایستگاه‌هایی استفاده شوند که نزدیک‌ترین فاصله را با ایستگاه‌های آلودگی سنجی محیط‌زیست در منطقه مورد نظر دارند. در منطقه مورد نظر نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به

غلظت ذرات است و باید در مدل نهایی نیز به‌عنوان ورودی استفاده شود. نکته قابل توجه در این بخش این است که داده‌های اقلیمی به‌طور معمول با تناوب بیشتر و از ایستگاه‌های بیشتری در منطقه جمع‌آوری می‌شود، ولی داده‌های آلودگی هوا در منطقه تناوب جمع‌آوری نامناسب

۱.۲.۲. داده‌های زمینی

داده‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته داده‌های اقلیمی و داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی تقسیم شده است.

۲.۲.۲. داده‌های اقلیمی

عوامل اقلیمی به دو دسته کلی تأثیرگذار بر ذرات معلق شناخته می‌شود. عواملی با تأثیر مستقیم بر ذرات عبارت است از سرعت و جهت جریان هوا، لایه‌بندی دمای هوای اتمسفر نزدیک سطح زمین، بارش اتمسفری و جزآن و عواملی با تأثیر غیرمستقیم عبارت است از دمای هوا، رطوبت هوا، فرم ابرها و فشار هوا و جزآن (Hrdličková et al., 2008). به‌خوبی مشخص شده است که میزان غلظت ائروسول‌ها در فصل‌های گرم سال بیش از سایر فصل‌هاست. همچنین، روزهای هفته نیز با آخر هفته میزان ذرات معلق متفاوتی دارد (Hörmann et al., 2005). برخی مطالعات نشان داده شده است که مقادیر ذرات معلق تا حد زیادی تحت تأثیر سرعت و جهت باد است (برای مثال، Gupta, 2008; Liu et al., 2007; Tian & Chen, 2010).

دید افقی کمتر از ۵ کیلومتر (با توجه به اینکه تنها دو ایستگاه هواشناسی داده‌های مربوط به دید افقی را در اختیار نگارنده قرار داده بود) مربوط به روزهای دارای توفان گردوغبار بوده است. در مجموع، تعداد ۲۸ روز در کل سال ۱۳۹۲ در شهرستان اهواز دارای توفان‌های گردوغبار مشخص شده است.

۴.۲.۲. داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای (سنجنده MODIS)

سنسورهای مودیس روی سکوی ماهواره ای EOS^{۱۳} ناسا قرار گرفته است. این سنسور روی دو ماهواره Terra و Aqua به ترتیب از سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ شروع به کار کرده است. این دو ماهواره به صورت زمین‌آهنگ با مدار قطبی در ارتفاع حدود ۷۰۰ کیلومتری خط استوا در حال گردش به دور کره زمین است. زمان تقریبی عبور آن از بالای هر منطقه حدود ۱۰:۳۰ و ۱:۳۰ دقیقه زمان محلی LST^{۱۴} است. ماهواره مودیس دارای ۳۶ باند طیفی از ۰/۴۱ تا ۱۴ میکرون است. قدرت تفکیک مکانی این ماهواره بین ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر متغیر است. قدرت تفکیک زمانی این ماهواره در حدود یک یا دو روز است (Guo et al., 2014).

شاخص عمق بصری ذرات معلق استخراج شده از ماهواره مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ کیلومتر در نقطه نادیر و ۲۰×۴۰ کیلومتر در گوشه‌های تصویر تهیه می‌شود. این محصول مودیس با الگوریتم هدف تیره محاسبه و به نام MOD04 در محصولات مودیس که مخصوص آئروسول‌هاست در دسترس عموم قرار دارد ([ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/6/MOD04](http://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/6/MOD04)) . در الگوریتم مربوط به محاسبه این محصول از رابطه L2). بین باندهای مری و SWIR مودیس به عنوان شاخصی از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI-SWIR) و زاویه پراکنش استفاده شده است (Bilal et al., 2013; Levy et al., 2007). محصول MOD04 محصول ماهواره Aqua دارای قدرت تفکیک زمانی یک روزه و برخی پارامترهای

ایستگاه‌های آلودگی سنجی دو ایستگاه است با نام‌های اهواز و اهواز-کشاورزی که از داده‌های این دو ایستگاه استفاده شده است. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور برای کل سال ۱۳۹۳ تهیه شده است. در شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها با دایره مشخص شده است.

۳.۲.۲. داده‌های آلودگی ایستگاه‌های زمینی

به‌منظور مطالعه آلودگی هوا در منطقه مورد نظر داده‌های سال ۱۳۹۲ از شش ایستگاه زمینی استان خوزستان جمع‌آوری شده است. موقعیت این شش ایستگاه در شکل ۱ نمایش داده شده است. از بین این شش ایستگاه، به طور متوسط در روز چهار ایستگاه به طور ساعتی به جمع‌آوری داده‌های PM10 می‌پردازند. با توجه به این میزان غلظت PM10 در روزهای دارای توفان گردوغبار بسیار چشمگیر است. از بین داده‌های جمع‌آوری شده روزهای دارای توفان‌های گردوغبار تفکیک شده است.

در تعیین روزهای دارای گرد و غبار از دو روش استفاده شده است. در گزارش مربوط به روزهای دارای پدیده گردوغبار در شهرستان اهواز در سال ۱۳۹۲، تعداد بیست روز دارای توفان گردوغبار بوده است. در این گزارش منشأ حدود هشت توفان گردوغبار کشور عراق (۴۰٪) و منشأ چهار توفان محلی (۲۰٪) مشخص شده است. برای حدود ۴۰ درصد از این توفان‌ها هم منشأیی ذکر نشده است. نکته قابل توجه در این گزارش این است که در برخی روزهای دارای توفان گردوغبار، میزان پدیداری ایستگاه هواشناسی اهواز حداکثر ۵ کیلومتر گزارش شده است. بنابراین، میزان آستانه مربوط به توفان‌های گردوغبار برای تشخیص از طریق میزان پدیداری ایستگاه‌ها در این پژوهش نیز ۵ کیلومتر بوده است. همچنین، در ماه‌های شهریور، مهر، آبان و اسفند گزارشی از میزان توفان‌های گردوغبار یافت نشد. ماه بهمن نیز بدون هیچ‌گونه توفان گردوغباری گزارش شده است (محیط زیست خوزستان، ۱۳۹۳). بر اساس منابع ذکرشده

در این پژوهش آمده است. به طور کلی، تعداد داده‌های آلودگی در روزهای دارای توفان گردوغبار ۱۲۰ عدد بوده است. برای هر داده مقادیر نظیر آن برای شاخص عمق بصری از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است. داده‌های اقلیمی مربوط نیز بازه زمانی تهیه تصاویر ماهواره‌ای جداسازی شده و پایگاه داده مورد نیاز برای مدل‌سازی است.

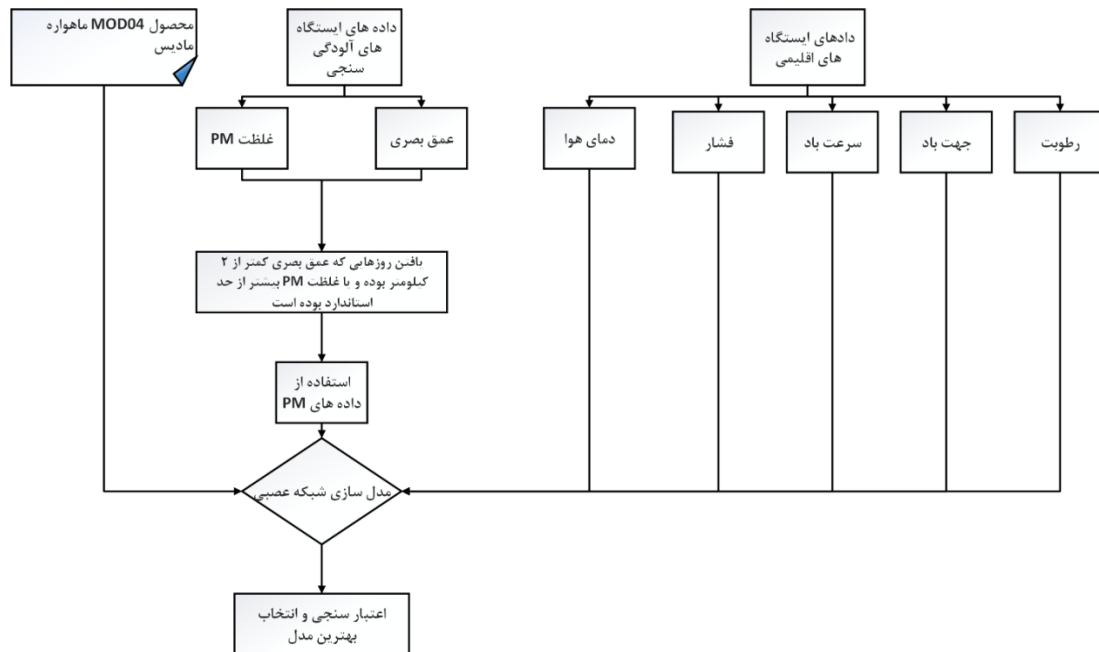
مربوط به آئروسول‌هاست. از جمله پارامترهای مورد استفاده در مطالعات آئروسول‌ها که در محصول ۰۴ این ماهواره موجود است تخمین شاخص عمق بصری ذرات معلق در طول موج‌های ۴۶۵، ۴۶۹، ۵۵۵ و ۲۱۰۰ نانومتر است. این طول موج‌ها به ترتیب منطبق بر باندهای ۱، ۳، ۴ و ۷ سنجنده مودیس است.

در جدول ۱ مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده

جدول ۱. فهرست و مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	نوع	تناوب زمانی	تعداد ایستگاه مورد استفاده	ساعت مورد استفاده	تعداد کل داده‌ها
۱	غلظت PM10	به صورت یک ساعته	۷ به طور معمول ۴ ایستگاه فعال	بازه زمانی ۱۱-۱۲، صبح به وقت محلی	۱۲۰
۲	هواشناسی	به صورت یک ساعته و داده‌های میانگین دما به صورت سه ساعته	۳	بازه زمانی ۱۱-۱۲. برای داده‌های دما از نزدیک‌ترین بازه استفاده شده است	مجموعه داده
۳	ماهواره‌ای	محصول MOD04	-	به صورت روزانه	

منبع: نگارنده

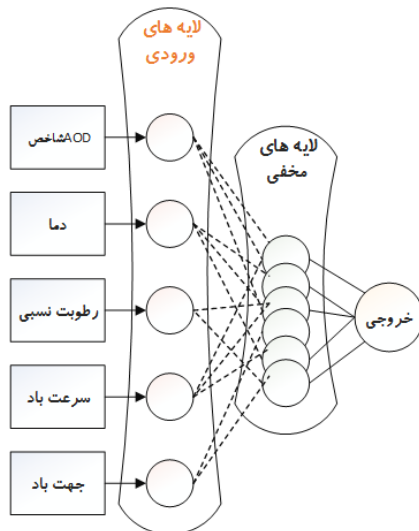


شکل ۳. مراحل انجام تحقیق (منبع: نگارندگان)

است. در ادامه درصدی از داده‌های استفاده شده در تهیه مدل به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل، دو شاخص RMSE و MAE استفاده شد که نتایج مربوط به هر کدام در ادامه آمده است.

• مدل شبکه عصبی

در مدل بازگشتی از شبکه عصبی سه لایه از نقاط وجود دارد: لایه ورودی، مخفی و خروجی. در مدل کنونی، به منظور تخمین مقادیر PM10 پنج لایه ورودی و یک لایه خروجی وجود دارد. لایه‌های ورودی پارامترهای دما، رطوبت نسبی، جهت باد، سرعت باد و مقدار شاخص عمق بصری هر ایستگاه است و خروجی مدل شبکه عصبی مربوط میزان PM10 هر ایستگاه در زمان تصویربرداری است. در مدل شبکه عصبی تعداد لایه‌های مخفی بین $2n+1$ و $2n+2$ لایه است (Demir, Ozdemir, Ozcan, Ucan, & Bayat, 2010) که در آن n تعداد گره‌ها در لایه ورودی و u تعداد گره‌های لایه خروجی است. شکل ۴ نشان‌دهنده مدل شبکه عصبی چند لایه است.



شکل ۴. دیاگرام مدل شبکه عصبی مصنوعی و لایه‌های ورودی، مخفی و خروجی. در این تصویر به ترتیب T میانگین دما، SRH رطوبت نسبی، SP فشار سطح زمین، SWD جهت باد، SWS سرعت باد، همچنین شاخص عمق بصری استخراج شده از محصولات ماهواره مودیس است. خروجی این مدل مقادیر پیش‌بینی شده PM10 است. (منبع: نگارندگان)

۳.۲. روش تحقیق

به منظور مدل‌سازی محتوای PM10 موجود در توفان‌های گردوغبار، نخست بر اساس داده‌های مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی و متغیر مربوط به دید افقی در این ایستگاه‌ها، روزهای دارای دید افقی کمتر از ۵ کیلومتر در دوره مطالعاتی مورد نظر استخراج شد. سپس، برای روزهای مورد نظر داده‌های محصول MOD04 سنجنده مادیس دانلود شد. با توجه به اینکه به منظور ایجاد رابطه بین تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی باید زمان اندازه‌گیری داده‌های زمینی حداقل فاصله را با زمان عبور ماهواره از منطقه داشته باشد، بنابراین داده‌ها مربوط به شاخص‌های اقلیمی شامل میانگین دما، فشار، سرعت و جهت باد و رطوبت نسبی است. PM جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های زمینی متناسب با زمان عبور ماهواره مشخص و انتخاب شده است. در شکل ۳ مراحل کلی انجام این پژوهش آمده است.

پس از تهیه داده‌های محصول MOD04 سنجنده مادیس با استفاده از نرم‌افزار ENVI و پلاگین MCTK این داده‌ها به تصاویر geotiff تبدیل شد. سپس، مقادیر متناظر ایستگاه‌های زمینی استخراج و پایگاه داده مربوط تشکیل شد. با توجه به این امر که شاخص عمق بصری سنجنده مادیس در پنج باند در دسترس است، نخست با استفاده از شاخص آماری همبستگی بهترین باند انتخاب شد. سپس، در مدل شبکه عصبی مصنوعی از این باند استفاده شده است.

۱.۳.۲. مدل‌سازی تخمین ذرات معلق

پس از مشخص شدن بهترین شاخص از روی تصاویر ماهواره‌ای، به منظور تخمین ذرات معلق و افزایش میزان دقت در مدل نهایی سایر پارامترهای اقلیمی، در ادامه با استفاده از مدل شبکه عصبی در نرم‌افزار SPSS با تعیین پارامترهای مربوط به مدل شبکه عصبی از جمله معماری شبکه، الگوریتم یادگیری، تعداد لایه‌های مخفی و سایر پارامترها مدلی برای پیش‌بینی مقادیر PM10 تهیه شده

شده است. در ادامه، نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده است. شبکه پرسپترون چندلایه یا تابع شعاع‌مدار تابعی از پیش‌بینی‌کننده‌ها (همچنین، متغیرهای مستقل یا ورودی‌ها) است که خطای پیش‌بینی متغیرهای هدف (خروجی‌ها) را حداقل می‌کند. این دو مدل ساختار معروف به معماری پیشخور دارد، چون رابطه‌های درون شبکه از لایه ورودی به لایه خروجی بدون هیچ بازگشتی به جلو جریان دارد. در اینجا، برای تمامی داده‌های مربوط به سال ۱۳۹۲ مدل MLP و RBF به‌طور جداگانه اجرا شده است.

۳. نتایج

۳.۱. رابطه بین ذرات معلق و شاخص عمق بصری

استخراج شده از تصاویر

با توجه به اینکه مقادیر شاخص عمق بصری از باندهای مختلف سنجنده مودیس قابل محاسبه و استخراج است، در این مرحله نخست، بین مقادیر شاخص عمق بصری استخراج شده از باندهای متفاوت مودیس و مقادیر ذرات معلق ایستگاه‌های زمینی همبستگی محاسبه شده است. محصول MOD04 که در این پژوهش استفاده شده است تنها شاخص عمق بصری را در باند یک به مرکز ۰/۶۶ میکرومتر، باند سه به مرکز ۰/۴۷ میکرومتر، باند چهار به مرکز ۰/۵۵ و باند هفت به مرکز ۲/۱۳ و در نهایت طول موج ۰/۴۲ میکرومتر ارائه می‌کند (جدول ۲).

مجموعه داده‌های ورودی این مدل از انواع مختلفی از داده‌ها شامل داده‌های ماهواره‌ای، هواشناسی و جزآن است. این داده‌ها به صورت تصادفی به میزان ۶۰ درصد برای آموزش شبکه، ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی و ۲۰ درصد برای آزمایش (نمونه‌های جدا نگه‌داشته شده) استفاده شده است. نمونه‌های آموزش برای اعتبارسنجی مجموعه‌ای مستقل از داده‌های ذخیره شده است که از آن‌ها برای پیدا کردن خطاهای رخ داده حین آموزش استفاده می‌شود. این امر از انجام آموزش بیش از حد جلوگیری می‌کند. از داده‌های آزمایش به منظور محاسبه مقادیر پیش‌بینی شده سپس محاسبه شاخص‌های RMSE و MAE استفاده شد. نمونه‌های جدا نگه‌داشته شده مجموعه مستقل دیگری از داده‌های ذخیره شده است که برای ارزیابی نهایی شبکه عصبی استفاده می‌شوند. خطای نمونه جدا نگه‌داشته شده تخمین درستی از قابلیت پیش‌بینی مدل است، زیرا خود این نمونه‌ها در ساخت مدل استفاده نمی‌شود.

به منظور افزایش سرعت محاسبات و دقت تخمین در مدل شبکه عصبی از نرمال‌سازی و استانداردسازی داده‌های ورودی استفاده شده است (رابطه ۲).

$$(2) \quad \frac{x - \text{mean}}{s}$$

که در آن X متغیر مورد نظر، mean میانگین و S انحراف معیار است.

در این پژوهش دو مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) تابع شعاع‌مدار (RBF) در پیش‌بینی استفاده

جدول ۲. همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص عمق بصری و PM10

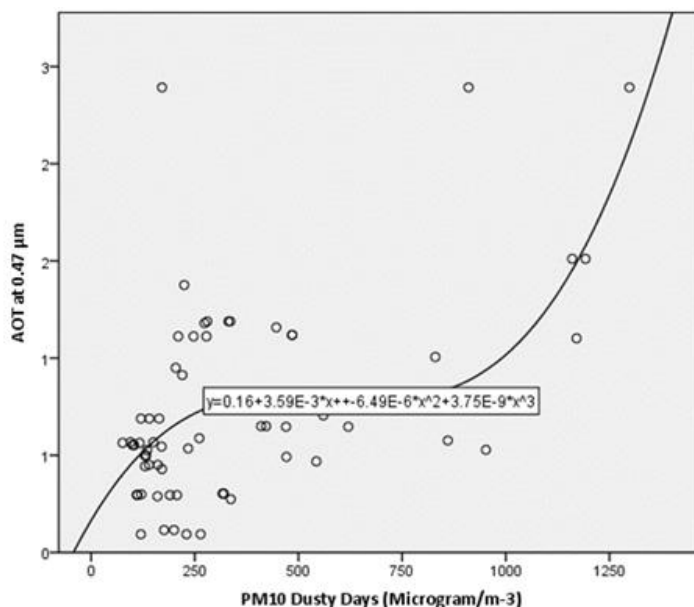
میزان همبستگی	میزان همبستگی	میزان همبستگی
۰/۴۰۸	AOD باند یک	۰/۳۰۸
۰/۴۹۳	AOD باند سه	۰/۳۸۹
-۰/۱۵۹	AOD باند چهار	۰/۳۸۹
	AOD باند هفت	-۰/۱۵۹

در زمینه تخمین مقادیر ذرات معلق به کمک تصاویر ماهواره‌ای، بیشتر از شاخص عمق بصری باند ۵۵۵ نانومتر استفاده شده است، ولی با توجه به همبستگی پایین‌تر این

همان‌گونه که میزان همبستگی باندی نشان می‌دهد، این میزان بین مقادیر شاخص عمق بصری باند سه مودیس و ذرات معلق بالاترین است. در بیشتر مطالعات انجام گرفته

شاخص عمق بصری باند به مرکز ۴۹۳ نانومتر آورده شده است.

شاخص با مقادیر ذرات معلق در این مقاله از باند ۴۶۹ نانومتر به منظور تخمین مقادیر ذرات معلق استفاده شده است. در شکل ۶ نمودار پراکنندگی مقادیر PM10 و میزان



شکل ۵. نمودار پراکنندی بین مقادیر PM10 و شاخص عمق بصری در باند ۴۷۶ نانومتر سنجنده مودیس. محور افقی داده‌های مربوط به مقادیر PM10 در ایستگاه‌های زمینی و محور عمودی مقادیر شاخص عمق بصری در باند ۴۷۶ نانومتر است (منبع: نگارندگان).

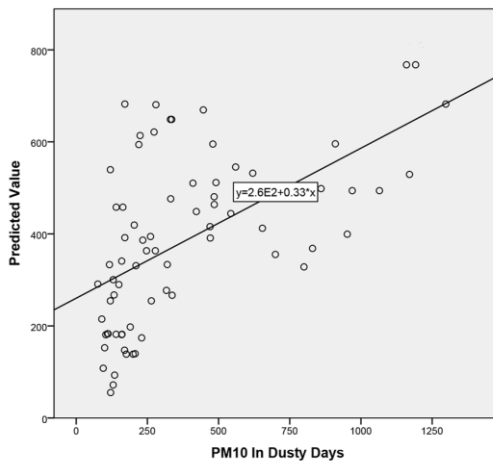
خروجی از مدل RBF همبستگی خطی کمتری با مدل MLP دارد. همین امر موجب شده است که پیش‌بینی‌های این مدل در تخمین غلظت ذرات معلق عدم قطعیت کمتری نسبت به مدل دیگر داشته باشد.

۲.۳. نتایج حاصل از اجرای مدل‌های شبکه عصبی

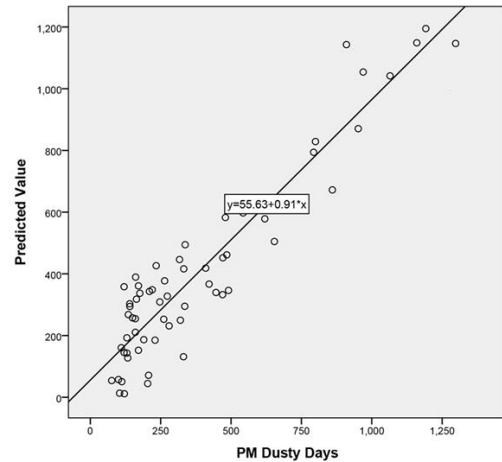
پس از اجرای مدل شبکه عصبی مصنوعی روی داده‌های ورودی و تخمین مقادیر PM10 سطح زمین نتایج حاصل از مدل‌ها در جدول ۳ گردآوری شده است. همان‌گونه که شکل ۷ مشخص شده است مقادیر

جدول ۳. مقایسه پارامترهای آماری مدل‌های اجرا شده با داده‌های زمینی PM10

R Square	انحراف معیار	مد	میانه	میانگین	
۰,۷۶	۲۹۶,۰۷۳	۲۹۶,۰۷۳	۱۵۶	۳۸۲,۹۱	مدل MLP
۰,۱۳۰۳۲۱	۱۷۳,۳۷۳	۱۷۳,۳۷۳	۶۰۹	۳۶۹,۲۵	مدل RBF
	۳۱۷,۳۴۸	۱۲۰	۲۶۱	۳۸۶,۱۵	داده‌های ایستگاه‌های زمینی



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) پراکندگی بین مقادیر PM10 تخمین زده شده با مقادیر زمینی؛ محور افقی حاوی مقادیر PM10 در روزهای دارای توفان گردوغبار و محور عمودی حاوی مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل شبکه عصبی MLP است. ب) پراکندگی ذرات PM10 با مقادیر پیش‌بینی شده از مدل RBF (منبع: نگارندگان)

شده است. با محاسبه مقادیر RMSE و شاخص MAE نیز مشخص شد مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP دارای مقادیر RMSE و MAE کمتری نسبت به مدل دیگر است. بنابراین، استفاده از این مدل به منظور تخمین مقادیر PM10 سطح زمین نتایج بهتری نسبت به دو مدل دیگر می‌دهد.

جدول ۵. جدول مقایسه بین مقادیر RMSE و MAE مدل‌های مورد استفاده در تخمین مقادیر PM10

MAE	RMSE	
۲۲,۷۷۶	۷۸,۸۵۳۵۴	مدل MLP
۵۲,۵۸۴	۱۳۶,۴۵۹۹	مدل RBF

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای نخستین بار دو مدل شبکه عصبی مصنوعی RBF و MLP به منظور مدل‌سازی تخمین غلظت ذرات معلق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی مقایسه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مشخص است که مدل MLP دارای نتایج پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به مدل RBF است. میانگین

۳.۳. اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های استفاده شده در این مقاله از دو شاخص RMSE و MAE استفاده شده است. RMSE ریشه توان دوم خطاها به منظور محاسبه میزان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل استفاده شده است. این شاخص هم به خطاهای تصادفی و هم به خطاهای سیستماتیکی حساسیت دارد. برای محاسبه این پارامتر از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Predict - Ground)^2} \quad (3)$$

که در آن n تعداد کل داده‌ها، Predict مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و Ground مقدار داده‌های زمینی است. این شاخص هر چه کمتر باشد، نشان‌دهنده صحت بهتر مدل نهایی است.

MAE میانگین خطاهای مطلق یکی از پر استفاده‌ترین شاخص‌ها برای نشان دادن میانگین خطاهاست. به منظور محاسبه این شاخص از رابطه (۴) استفاده شده است.

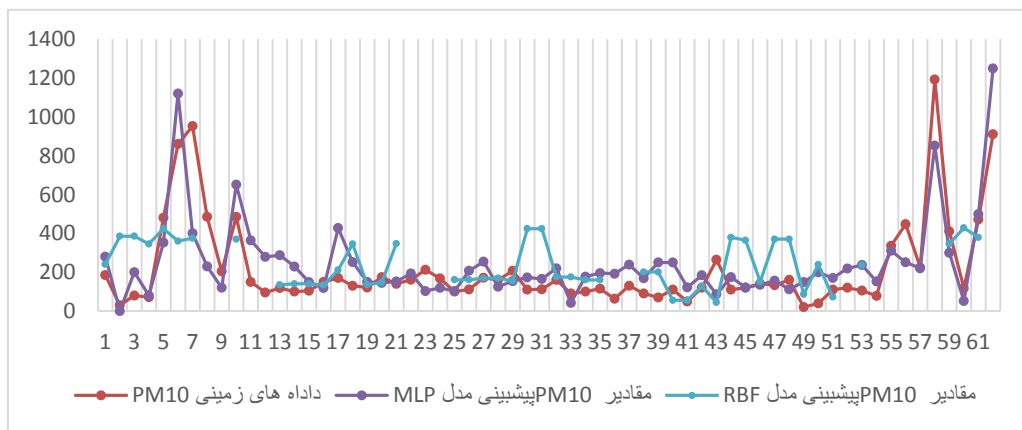
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Predict - Ground| \quad (4)$$

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مربوط به دو مدل شبکه مصنوعی عصبی و رگرسیون خطی در جدول ۵ نشان داده

MLP نیز نشانگر شباهت بیشتر این مدل به داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی دارند.

در شکل ۸، مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی PM10 در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

مقادیر خروجی این مدل در حدود ۳ میکروگرم بر مترمکعب با داده‌های ایستگاه‌های زمینی تفاوت دارد. از سوی دیگر، با مقایسه شاخص آماری میانه مدل RBF میزان میانه مقدار ۶۰۹ میکروگرم بر مترمکعب است، در صورتی که داده‌های ایستگاه‌های زمینی مقدار میانه‌ای برابر با ۲۶۱ دارد. سایر پارامترهای آماری محاسبه شده برای مدل



شکل ۸. نمودار مقایسه دو مدل MLP و RBF با مقادیر واقعی PM10 اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی

۲۰۰۲ به این سمت انجام شده است. تمامی این مطالعات بر تخمین غلظت ذرات معلق به کمک شاخص عمق بصری تصاویر ماهواره‌های مختلف در باند ۵۵۵ نانومتر بوده است. هر کدام از این مطالعات با ارائه مدل‌های رگرسیون خطی به صورت تجربی به دنبال افزایش میزان همبستگی بین خروجی مدل و مقادیر ایستگاه‌های زمینی بوده است. میزان همبستگی این مدل‌ها به علت آنکه به صورت تجربی بوده است، همواره با تغییر منطقه مطالعاتی تغییر می‌کند. برخی از این مدل‌ها با افزودن پارامترهای هواشناسی همچون رطوبت نسبی همبستگی خود را افزایش داده است. در این پژوهش از میان مدل‌های استفاده شده در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه و نتایج حاصل از محاسبه پارامترهای RMSE و MAE، میزان RMSE در مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی نتایج کمتری نسبت به سایر موارد دارد. از بین دو مدل RBF و MLP مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP نیز دارای میزان

همان‌گونه که شکل ۸ نشان می‌دهد، مدل MLP با دقت بهتری مقادیر PM10 را برای داده‌های نمونه پیش‌بینی کرده است. البته، این مدل در مقادیر بسیار بالای PM10 دقت کمتری دارد که ممکن است به علت کالیبره نبودن داده‌های زمینی آلودگی هوا باشد که بر اساس آن این مدل توسعه داده شده است.

با توجه به اینکه علم سنجش از دور در ابتدای راه بررسی‌های مربوط به آلودگی‌های هوا قرار دارد، بنابراین لازم است در زمینه استخراج شاخص‌های مرتبط با آلودگی‌های هوا قابل استخراج از تصاویر ماهواره‌ای مطالعات بیشتری شود. همچنین، با در نظر گرفتن این مسئله که قدرت تفکیک زمانی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت مدل‌های برآورد آلودگی هوا داراست، لازم است که بر بهبود قدرت تفکیک زمینی شاخص عمق بصری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای تمرکز بیشتری شود. در زمینه مطالعات زیادی از سال

آن ترکیب‌شدن انعکاس سطح زیرین با آن موجب عدم قطعیت، همچنین پیچیدگی بالا در تخمین غلظت توفان‌های گردوغبار می‌شود. از عوامل دیگر در کاهش صحت پیش‌بینی این مدل می‌توان به پراکندگی نامناسب و عدم کالیبره‌بودن ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی زمینی اشاره کرد. بهترین حالت، مقایسه مقادیر به‌دست آمده از سنجنده مادیس با مقادیر حاصل از شبکه آثرون در زمان و مکان است که متأسفانه کشور ما از وجود چنین ایستگاه‌هایی بی‌بهره است. به‌همین دلیل برای اعتبارسنجی اطلاعات به‌دست آمده از ماهواره، باید از اطلاعات ایستگاه‌های زمینی پایش آلودگی هوا بهره برد.

یادداشت‌ها

۱. مقاله استخراج‌شده از پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان «ارائه مدلی به‌منظور تخمین محتوای توفان‌های گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای»

2. particulate matter (PM)
3. Aerosol Optical Depth
4. Aerosol extinction coefficient
5. Total Ozone Mapping Spectrometer
6. Sea viewing Wide Field-of-view Sensor
7. Ozone Monitoring Instrument
8. Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance
9. MEdium Resolution Imaging Spectroradiometer
10. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
11. Deep Blue
12. Dark Target
13. Earth Observing System
14. Local Solar Time

RMSE کمتری نسبت به مدل RBF بوده است. میزان RMSE به‌دست آمده از مدل شبکه عصبی MLP ۷۸/۸ میکروگرم بر مترمکعب است که این مقدار در مقایسه با مدل RBF (با میزان ۱۳۶/۴۵ میکروگرم بر مترمکعب) مقادیر با صحت بیشتری دارد.

در مطالعات عوامل طبیعی به‌کمک تصاویر ماهواره‌ای همواره عدم قطعیت وجود دارد. از جمله منابع مهم عدم قطعیت در این پژوهش می‌توان از اندازه پیکسل‌های مورد استفاده برای تشخیص گرد و غبار نام برد که در هر گذر ماهواره، سطح زمین تنها توسط تعداد کمی از این پیکسل‌ها پوشیده می‌شود. در نتیجه، در ایستگاه‌های آلودگی سنج با ابعادی بسیار کوچک‌تر نسبت به سلول‌های سنجنده مادیس مواجهیم، به این علت که محصولات استاندارد شاخص عمق بصری سنجنده مودیس دارای قدرت تفکیک در حدود ۱۰ کیلومتر است. همین مشکل در مدل‌هایی بیشتر خود را نشان می‌دهد که به‌طور مستقیم از شاخص عمق بصری استفاده می‌کنند. همین امر موجب گرایش مطالعات اخیر به سمت ارائه مدل‌های استخراج AOD با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر از تصاویر ماهواره‌ای شده است. البته، این مدل‌ها خود نیز نیازمند اطلاعات جانبی فراوانی است. برخی از این اطلاعات همچون داده‌های ایستگاه‌های آثرون در کشور ایران موجود نیست و باید از داده‌های جایگزین استفاده کرد. همین امر نیز موجب عدم قطعیت در نتایج می‌شود. قرارگیری توفان‌های گردوغبار همانند لایه‌ای نیمه‌شفاف بر تصاویر ماهواره‌ای و در نتیجه

منابع

محیط‌زیست خوزستان. ۱۳۹۳. گزارش مربوط به تاریخ و منشأ توفان‌های گردوغبار در استان خوزستان در سال ۱۳۹۲. خوزستان.

Abdul, S., Saleh, H., Hasan, G. 2014. Geophysics & Remote Sensing Estimation of PM10 Concentration using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image, Vol. 3, No. 2. <http://doi.org/10.4172/2169-0049.1000120>.

Afzali, A., Rashid, M., Sabariah, B., Ramli, M. 2014. PM 10 Pollution: Its Prediction and Meteorological Influence in PasirGudang, Johor. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 18, No. 1, 12100. Retrieved from <http://stacks.iop.org/1755-1315/18/i=1/a=012100>.

Amiraslani, F., Dragovich, D. 2011. Combating desertification in Iran over the last 50 years: An overview of changing approaches. Journal of Environmental Management.

- Ångström, A. 1930. On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation. II. *Geografiska Annaler*, Vol. 12, pp. 130-159 CR–Copyright © 1930 Swedish Societ. <http://doi.org/10.2307/519561>.
- Azmi, S., Latif, M., Ismail, A., Juneng, L., Jemain, A. 2010. Trend and status of air quality at three different monitoring stations in the Klang Valley, Malaysia. *Air Quality, Atmosphere & Health*, Vol. 3, No. 1, pp. 53-64. <http://doi.org/10.1007/s11869-009-0051-1>.
- B, G., J, I., & G, M. 2011. An Artificial Immune Network Approach to Multi-Sensor Land Use/Land Cover Classification. *Remote Sensing of Environment*, 115, 600.
- B, S. C., F, G., H, S. A., W, L., X, L., T, T., & C, S. N. 2002. First Operational BRDF, Albedo Nadir Reflectance Products From MODIS.”. *Remote Sensing of Environment*, 83, 135.
- Bilal, M., Nichol, J. E., Bleiweiss, M. P., & Dubois, D. 2013. A Simplified high resolution MODIS aerosol retrieval algorithm (SARA) for use over mixed surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 136, 135–145. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.014>
- Bilal, M., Nichol, J.E. Chan, P.W. 2014. Remote Sensing of Environment Validation and accuracy assessment of a Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) over Beijing under low and high aerosol loadings and dust storms, Vol. 153, pp. 50-60.
- Chitranshi, S., Sharma, S. P., Dey, S. 2014. Satellite-based estimates of outdoor particulate pollution (PM₁₀) for Agra City in northern India. *Air Quality, Atmosphere & Health*. <http://doi.org/10.1007/s11869-014-0271-x>.
- Demir, G., Ozdemir, H., Ozcan, H. K., Ucan, O. N., & Bayat, C. 2010. an artificial neural network-based model for short-term predictions of daily mean PM₁₀ concentrations. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, Vol. 11, No. 3, pp. 1163-1171.
- Emili, E., Popp, C., Petitta, M., Riffler, M., Wunderle, S., Zebisch, M. 2010. PM₁₀ remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 11, pp. 2485-2499. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.024>
- Fan, Q., Shen, C., Wang, X., Li, Y., Huang, W., Liang, G., ... Huang, Z. 2013. Impact of a dust storm on characteristics of particle matter (PM) in Guangzhou, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 121-131. <http://doi.org/10.1007/s13143-013-0013-2>.
- Green, M., Kondragunta, S., Ciren, P., Xu, C. 2009. Comparison of GOES and MODIS aerosol optical depth (AOD) to aerosol robotic network (AERONET) AOD and IMPROVE PM_{2.5} mass at Bondville, Illinois. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), Vol. 59, December, pp. 1082-1091. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.59.9.1082>.
- Grgurić, S., Kržan, J., Gašparac, G., Antonić, O., Špirić, Z., Mamouri, R., ... Hadjimitsis, D. 2014. Relationship between MODIS based Aerosol Optical Depth and PM₁₀ over Croatia. *Open Geosciences*, Vol. 6, No. 1, pp. 2-16. <http://doi.org/10.2478/s13533-012-0135-6>.
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. a., Kang, P., Zhan, F. B., & Hong, S. 2014. Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 35(December), pp. 6522-6544. <http://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Gvozdić, V., Kovač-Andrić, E., Brana, J. 2011. Influence of Meteorological Factors NO₂, SO₂, CO and PM₁₀ on the Concentration of O₃ in the Urban Atmosphere of Eastern Croatia. *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 16, No. 5, pp. 491-501. <http://doi.org/10.1007/s10666-011-9256-4>.
- Gupta, P., & Christopher, S. A. (2008). Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8(1), 327–365. <https://doi.org/10.5194/acpd-8-327-2008>
- Hörmann, S., Pfeiler, B., Stadlober, E. 2005. Analysis and prediction of particulate matter PM₁₀ for the winter season in Graz. *Austrian Journal of Statistics*, Vol. 34, No. 4, pp. 307-326.
- Hrdličková, Z., Michálek, J., Kolář, M., Veselý, V. 2008. Identification of factors affecting air pollution by dust aerosol PM₁₀ in Brno City, Czech Republic. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 37, pp. 8661-8673. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.017>.
- J, K. Y., D, T., & O, B. 2002. A Satellite View of Aerosols in the Climate System. *Nature*, Vol. 419, 215.
- Kaufman, Y.J. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm-theory. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 23. <http://doi.org/10.1029/2001GL014492>.
- Kokhanovsky, A., Leeuw, G. 2009. Satellite aerosol remote sensing over land. *Vasa*. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-69397-0>.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Dubovik, O. 2007. Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging

- Spectroradiometer aerosol retrieval over land. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, No. D13. <http://doi.org/10.1029/2006JD007815>.
- Lu, D., Xu, X., Tian, H., Moran, E., Zhao, M., & Running, S. (2010). The Effects of Urbanization on Net Primary Productivity in Southeastern China. *Environmental Management*, 46(3), 404–410. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9542-y>
- Liu, Y., Franklin, M., Kahn, R., & Koutrakis, P. (2007). Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 107(1–2), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.022>
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., de la Rosa, J., Rosa, J. de la. 2007. Atmospheric particulate matter and air quality in the Mediterranean: A review. *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-7. <http://doi.org/10.1007/s10311-006-0071-0>.
- Tang, J., Xue, Y., Yu, T., Guan, Y. 2004. Aerosol Optical Thickness determination by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS (SYNTAM). In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. Proceedings. IEEE International*, Vol. 7, pp. 4371-4374. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370117>
- Tanr, D., Kaufman, Y. J., Herman, M., & Mattoo, S. 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS / EOS spectral radiances $N_e / X_p = N_e A \cos \theta = N_e A_p \omega P(\theta)$ (2), 102(3).
- V, M. G., L, K. R., R, R. K., G, K. V., & G, F. M. 2006. Statistical Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures from MODIS LST Data over the State of Mississippi. *GIS Science and Remote Sensing*, Vol. 43, No. 78.
- van de Hulst, H.C. 1948. Scattering in a Planetary Atmosphere. *apj*, Vol. 107, 220. <http://doi.org/10.1086/145005>.
- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., Su, L. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 1, pp. 50-63. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.009>.
- Wilkerson, W.D., IL, A.W.S.S.A., Center, U.E.T.A. 1991. Dust and sand forecasting in Iraq and adjoining countries. USAF Environmental Technical Applications Center. Retrieved from <http://www.amazon.com/Dust-sand-forecasting-adjoining-countries/dp/B0006OY6N2>.
- Yap, X.Q., Hashim, M., Marghany, M. 2011. Retrieval of PM₁₀ concentration from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) derived AOD in Peninsular Malaysia (pp. 4022–4025). *IEEE*. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050114>.