

# استفاده از رگرسیون‌های غیرخطی در برآورد غلظت و تولید نقشه پراکندگی ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون با استفاده از تصاویر سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های زمینی

ارسلان قربانیان<sup>۱\*</sup>، علی محمدزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
a.ghorbanian@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
almoh2@gmail.com

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۷)

## چکیده

وجود ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون تأثیرات مخرب جدی بر روی سلامت افراد جامعه خواهد داشت. بنابراین داشتن اطلاعات در مورد میزان غلظت و نحوه پراکندگی آنها در شهر از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. امروزه از ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی در محدوده شهر برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. اگرچه این ایستگاه‌ها مقادیر آلودگی را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کنند اما به دلیل محدودیت تعداد آنها از لحاظ مکانی پیوستگی ندارند. برای حل این مشکل می‌توان از تصاویر سنجش از دوری برای برآورد میزان غلظت ذرات و تولید نقشه‌های پراکندگی آلودگی استفاده نمود. در این تحقیق به جای استفاده از داده‌های عمق اپتیکی که به طور غالب در بررسی و مطالعه آلودگی توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد، از تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز بدست آمده از تصاویر سنجنده مادیس استفاده می‌کنیم. مزیت استفاده از تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز نسبت به داده‌های عمق اپتیکی پیوستگی مکانی و قدرت تفکیک مکانی بهتر آنها می‌باشد. تولید نقشه روزانه آلودگی برای ۸ روز در سال ۱۳۹۶ در شهر تهران با استفاده از برقراری رگرسیون بین مقادیر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون انجام شده است. بررسی عملکرد رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و نمایی از جمله اهداف این تحقیق می‌باشد. میانگین مجذور همبستگی رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۵۹۱۲، ۰/۵۸۲۶، ۰/۵۸۰۸، ۰/۵۷۸۲ بدست آمده است. براساس نتایج بدست آمده رگرسیون نمایی بهترین عملکرد را برای تولید نقشه پراکندگی آلودگی داشته است.

**واژگان کلیدی:** بازتابندگی ظاهری سهم هواویز، PM10، رگرسیون غیرخطی، نقشه پراکندگی آلودگی، سنجنده مادیس

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

های رگرسیون خطی [۱۰ و ۱۱]، رگرسیون چندگانه<sup>۵</sup> [۱۲]، ۱۳ و ۱۴]، رگرسیون غیرخطی [۱۵، ۱۶ و ۱۷]، رگرسیون با وزن جغرافیایی<sup>۶</sup> [۱۸] شبکه‌های عصبی [۱۹ و ۲۰] و رگرسیون زمانی-مکانی<sup>۷</sup> [۲۱] توسط محققان برای تولید نقشه پراکندگی آلودگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از جمله مشکلات داده‌های عمق اپتیکی می‌توان به قدرت تفکیک مکانی پایین و عدم پیوستگی مکانی آنها اشاره کرد. محدودیت هدف تیره<sup>۸</sup> در برآورد میزان عمق اپتیکی دلیل اصلی وجود گسستگی مکانی در داده‌های عمق اپتیکی مادیس می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، عدم وجود ایستگاه زمینی اندازه‌گیری عمق اپتیکی در شهر تهران مانع دیگری برای استفاده از داده‌های عمق اپتیکی می‌باشد، زیرا در این شرایط توانایی ارزیابی و صحت سنجی داده‌های عمق اپتیکی فراهم نیست.

برای برطرف کردن مشکلات موجود در استفاده از داده‌های عمق اپتیکی در تولید نقشه آلودگی به صورت روزانه می‌توان از تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز<sup>۹</sup> (ACR) که در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد داده شدند استفاده کرد [۲۲]. در سال ۲۰۰۷ لی و همکاران [۲۲] با استفاده از روابط به دست آمده برای تخمین بازتابندگی سطح<sup>۱۰</sup> باند قرمز از بازتابندگی بالای جو<sup>۱۱</sup> باند مادون قرمز [۲۳] در جهت تولید تصویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز استفاده کردند. سپس با استفاده از اندازه‌گیری زمینی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون و روش رگرسیون خطی به تولید نقشه پراکندگی آلودگی پرداختند. دو مزیت اصلی تصویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز نسبت به داده‌های عمق اپتیکی، قدرت تفکیک مکانی بهتر و پیوستگی مکانی می‌باشد.

در این تحقیق از تصاویر سنجنده مادیس برای تولید تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز استفاده می‌شود. سپس در کنار تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز از داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی برای تولید نقشه روزانه پراکندگی آلودگی استفاده می‌شود. در این تحقیق عملکرد رگرسیون‌های خطی، توانی، نمایی و لگاریتمی برای تولید نقشه روزانه پراکندگی آلودگی مرتبط با ذرات

ذرات معلق<sup>۱</sup> نقش بسزایی در آب و هوای زمین، سهم رادیانس<sup>۲</sup> و فعل و انفعال صورت گرفته روی ابرها دارند [۱]. علاوه بر این وجود ذرات معلق آسیب‌های مخرب جدی بر روی سلامت افراد جامعه ایجاد می‌کند. ذرات معلق یکی از بزرگترین مشکلات شهرهای صنعتی و پرجمعیت می‌باشد و شهر تهران نیز درگیر آلودگی مرتبط با ذرات معلق می‌باشد.

بدین صورت بدست آوردن اطلاعات در مورد غلظت و نحوه پراکندگی آلودگی‌ها در شهر امری بسیار پراهمیت می‌باشد. در این راستا ایستگاه‌های آلودگی سنجی متعددی در سراسر شهر مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. اگرچه این ایستگاه‌های آلودگی سنجی میزان غلظت آلاینده‌های مختلف را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کنند، اما از لحاظ مکانی دارای پیوستگی نبوده و اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای را در اختیار می‌گذارند. برای حل این مسئله می‌توان از تصاویر سنجش از دوری در راستای برآورد و تولید نقشه آلودگی مرتبط با ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون استفاده کرد. باید خاطر نشان کرد که داده‌های سنجش از دوری مقادیر داده‌های مرتبط با آلودگی را در ستون جو اندازه‌گیری می‌کنند.

برای برآورد میزان و تولید نقشه‌های آلودگی با استفاده از سنجش از دور به طور کلی از دو نوع داده می‌توان استفاده نمود. این دو دسته داده شامل داده‌های عمق اپتیکی هواویز و داده‌های بازتابندگی ظاهری سهم هواویز می‌باشند. داده‌های عمق اپتیکی هواویز<sup>۳</sup> پراستفاده‌ترین نوع داده برای برآورد غلظت و تولید نقشه آلودگی می‌باشد [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. داده‌های عمق اپتیکی نشان دهنده میزان جذب و پراکنش امواج الکترومغناطیس در جو می‌باشند که با میزان غلظت آلاینده‌های موجود در جو ارتباط مستقیم دارد. همچنین محققان با استفاده تنها از داده‌های عمق اپتیکی در چندین سال به بررسی و پایش تغییرات کیفیت آب و هوا و آلودگی-های موجود در جو پرداخته‌اند [۹]. علاوه بر این داده‌های عمق اپتیکی تولید شده از تصاویر سنجنده مادیس<sup>۴</sup> به همراه اندازه‌گیری‌های زمینی ایستگاه‌های آلودگی سنجی با روش-

<sup>۵</sup> Multiple regression

<sup>۶</sup> Geographically weighted regression

<sup>۷</sup> Space-time regression

<sup>۸</sup> Dark target limitation

<sup>۹</sup> Aerosol's contribution apparent reflectance (ACR)

<sup>۱۰</sup> Surface reflectance

<sup>۱۱</sup> Top of atmosphere reflectance

<sup>۱</sup> Particulate matter

<sup>۲</sup> Radiance budget

<sup>۳</sup> Aerosol optical depth

<sup>۴</sup> MODIS

یکی دیگر از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق اطلاعات مربوط به غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون می‌باشد که از ایستگاه‌های آلودگی سنجی بدست آمده‌اند. اطلاعات مربوط به غلظت آلاینده مورد نظر برای ۸ روز متناظر و نزدیک‌ترین ساعت برداشت با تصاویر سنجش از دوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این اطلاعات به صورت میانگین ساعتی از سایت شرکت کنترل کیفیت هوا<sup>۳</sup> قابل دانلود می‌باشد. به طور کل از اطلاعات موجود در ایستگاه‌های آلودگی سنجی آورده شده در جدول ۲ در طول ۸ روز تحقیق استفاده شده است. برای هر روز از اطلاعات ۸ ایستگاه برای انجام رگرسیون بهره برده‌ایم.

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های آلودگی سنجی مورد استفاده در این تحقیق

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
اقدسیه- منطقه ۱	۵۱/۴۸۴۱۴	۳۵/۷۹۵۸۷
پارک رز- منطقه ۲۲	۵۱/۲۶۷۸۹	۳۵/۷۳۹۸۹
پونک	۵۱/۳۳۱۶۸	۳۵/۷۶۲۳
پیروزی- منطقه ۱۳	۵۱/۴۹۳۷۶	۳۵/۶۹۵۹۹
تربیت مدرس- منطقه ۶	۵۱/۳۸۱۵۷	۳۵/۷۱۷۵۱
ستاد بحران- منطقه ۷	۵۱/۴۳۱۲	۳۵/۷۲۷۰۸
شاد آباد- منطقه ۱۸	۵۱/۲۹۷۳۵	۳۵/۶۷۰۰۵
مسعودیه- منطقه ۱۵	۵۱/۴۹۹۰۲	۳۵/۶۳۰۰۳
میدان فتح- منطقه ۹	۵۱/۳۳۷۵۳	۳۵/۶۷۸۸۲
شهرداری منطقه ۱۹	۵۱/۳۶۲۵۲	۳۵/۶۳۵۲۱
شهرداری منطقه ۲۱	۵۱/۲۴۳۱۱	۳۵/۶۹۷۷۷۳
گلبرگ- منطقه ۸	۵۱/۵۰۶۱۳	۳۵/۷۳۱۰۳
شریف- منطقه ۲	۵۱/۳۵۰۹۴	۳۵/۷۰۲۲۷
شهرداری منطقه ۱۰	۵۱/۳۵۸۰۳	۳۵/۶۹۷۴۸

تهران بزرگترین شهر و پایتخت ایران می‌باشد که در استان تهران واقع شده است. جمعیت شهر تهران براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ بیشتر از ۸ میلیون نفر بوده است. تهران در جنوب رشته کوه البرز با مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع قرار دارد. شهر تهران در ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه تا ۳۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع متوسط آن در حدود ۱۲۰۰ متر می‌باشد. تهران از شمال توسط رشته کوه البرز و از جنوب و جنوب شرقی توسط کوه‌های ری و بی‌بی شهربانو محصور گشته است. این شهر به دلیل تردد وسایل نقلیه موتوری و حجم بالای ترافیکی درگیر مشکلات آلودگی شهری می‌باشد.

۳ Air.tehran.ir

معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. استفاده از رگرسیون‌های غیر خطی از جمله نمایی، لگاریتمی و توانی در کنار استفاده از داده‌های بازتابندگی ظاهری سهم هواویز نوآوری این تحقیق می‌باشد.

## ۲- مواد و روش

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس و داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی مرتبط با ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون استفاده شده است. بررسی عملکرد رگرسیون‌های متفاوت بر روی داده‌های ۸ روز در سال ۱۳۹۶ از منطقه شهرستان تهران صورت گرفته است.

### ۲-۱- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

سنجنده مادیس بر روی دو سکوی ترا<sup>۱</sup> و آکوا<sup>۲</sup> قرار دارد. این سنجنده تصویربرداری را در ۳۶ باند طیفی در قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر انجام می‌دهد. در این تحقیق از تصاویر سنجنده مادیس نصب شده بر روی سکوی ترا استفاده می‌کنیم. به دلیل وجود لایه‌های مخلوط جوی پیچیده‌تر در زمان گذر سکوی آکوا از سکوی ترا استفاده شده است [۲۲]. این سنجنده تصویربرداری را در ساعات ابتدایی روز انجام می‌دهد زیرا در این ساعات جو دارای شرایط پایدارتر و ساده‌تری می‌باشد [۲۲]. این سنجنده به صورت روزانه تصویربرداری از کل زمین را انجام می‌دهد و بدین ترتیب سنجنده مناسبی برای تولید نقشه‌های آلودگی روزانه می‌باشد. در این تحقیق از تصاویر MOD02HKM در قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده می‌شود. در جدول ۱ تاریخ و ساعت برداشت تصاویر مورد استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر سنجنده مادیس مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ساعت برداشت
۱	۱۳۹۶/۶/۱	۷:۴۰
۲	۱۳۹۶/۶/۳	۷:۳۰
۳	۱۳۹۶/۶/۷	۷:۰۵
۴	۱۳۹۶/۶/۹	۶:۵۵
۵	۱۳۹۶/۶/۱۰	۷:۳۵
۶	۱۳۹۶/۶/۱۲	۷:۲۵
۷	۱۳۹۶/۶/۱۶	۷:۰۰
۸	۱۳۹۶/۶/۱۸	۶:۳۵

۱ Terra  
۲ Aqua

## ۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق از تصاویر Level-1B و محصول MOD02HKM سنجنده مادیس که شامل تصاویر بازتابندگی بالای جو و رادیانس بالای جو<sup>۱</sup> می‌باشد، استفاده شده است. تصاویر خام با استفاده از نرم افزار Envi و ماژول MCTK<sup>۲</sup> به تصاویر بازتابندگی بالای جو تبدیل شده‌اند.

برای تولید تصویر بازتابندگی سطح باند قرمز از روی تصویر بازتابندگی بالای جو باند مادون قرمز از رابطه ۱ استفاده می‌کنیم [۲۳]. رابطه ۱ از جمله رابطه‌های مورد استفاده به صورت جهانی در جهت تولید داده‌های عمق اپتیکی هواویز توسط سنجنده مادیس می‌باشد.

$$\rho_{Red} = \frac{\rho_{NIR}^*(2.1\mu m)}{2} \quad (۱)$$

بدین صورت براساس [۲۲] می‌توان تصویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز که نمایش دهنده میزان آلودگی جوی می‌باشد و همبستگی خوبی با میزان غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون دارد را با استفاده از رابطه ۲ محاسبه کرد.

$$ACR = \rho_{Red}^* - \rho_{Red} - m \quad (۲)$$

در رابطه ۲، m میزان جذب و پراکنش مولکول‌های هوا،  $\rho_{Red}^*$  بازتابندگی بالای جو باند قرمز و  $\rho_{Red}$  بازتابندگی سطح باند قرمز می‌باشد که از رابطه ۱ بدست می‌آید. در تولید تصویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز فرض بر آن است که میزان جذب و پراکنش مولکول‌های هوا در شرایط تعادل و پایداری جو مقدار ثابتی می‌باشد.

به طور کلی در شرایط پایداری جو و عدم وجود وارونگی جوی ارتباط مستقیم بین ذرات معلق نزدیک سطح زمین و مجموع ذرات معلق (به صورت عمودی) وجود دارد. بدین صورت تصویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز ارتباطی مستقیم با میزان غلظت ذرات معلق خواهد داشت. در این تحقیق عملکرد رگرسیون‌های خطی و غیر خطی توانی، لگاریتمی و نمایی را که به ترتیب در روابط ۳ تا ۶ آورده شده‌اند بررسی خواهیم کرد. از تمام مقادیر

اندازه‌گیری شده آلودگی جهت انجام رگرسیون استفاده شده است. ضرایب مجهول برای هر روز به صورت جداگانه و بر اساس روش کمترین مربعات تعیین می‌شوند.

$$PM_{10} = k * ACR + b \quad (۳)$$

$$PM_{10} = k * ACR^b \quad (۴)$$

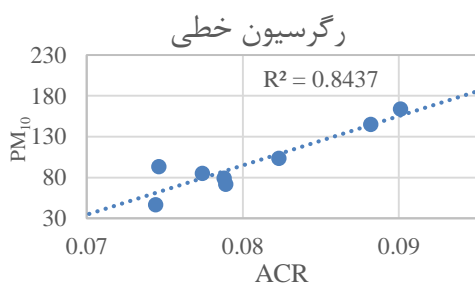
$$PM_{10} = k * \log(ACR) + b \quad (۵)$$

$$PM_{10} = k * e^{b*ACR} \quad (۶)$$

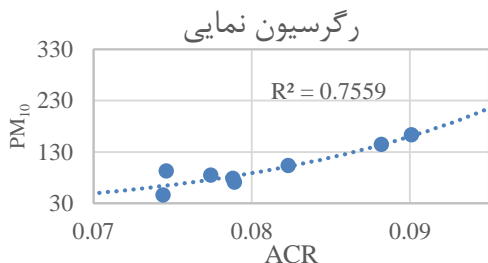
برای بررسی عملکرد رگرسیون‌های مطرح شده در روابط ۳ تا ۶ از مجذور همبستگی رگرسیون (ضریب تعیین)، همبستگی مقادیر تخمین زده شده ذرات معلق با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های آلودگی سنجی و مجذور میانگین مربع خطا (RMSE<sup>۳</sup>) استفاده خواهد شد.

## ۳- خروجی‌ها و تحلیل نتایج

پس از تولید تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز که در بخش قبل توضیح داده شد، رگرسیون‌های مورد نظر بین مقادیر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر میانگین ساعتی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون انجام شد. به عنوان نمونه در شکل‌های ۱ تا ۴ رگرسیون‌های انجام شده برای یکی از روزهای مورد بررسی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱- رگرسیون خطی بین مقادیر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون



شکل ۲- رگرسیون نمایی بین مقادیر بازتابندگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

<sup>۳</sup> Root mean square error

<sup>۱</sup> Top of atmosphere radiance

<sup>۲</sup> MODIS conversion toolkit

۰/۵۷۸۲ می‌باشند. براساس مقادیر متوسط مجذور همبستگی، رگرسیون خطی بهترین عملکرد و رگرسیون-های نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب عملکردهای ضعیف‌تری داشته‌اند.

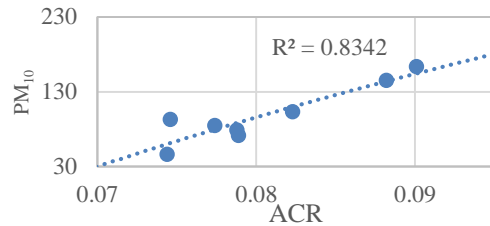
یکی دیگر از پارامترهایی که برای ارزیابی عملکرد رگرسیون‌های مورد بررسی قابل استفاده می‌باشد، همبستگی مقادیر تخمین زده شده توسط معادله برازش داده شده و مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی توسط ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی می‌باشد. در جدول ۴ می‌توان میزان همبستگی مقادیر تخمین زده شده با مقادیر مشاهده شده برای هر روز توسط رگرسیون‌های متفاوت را مشاهده کرد. جدول ۴ نحوه عملکرد رگرسیون‌های مورد استفاده در تخمین مقادیر آلودگی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای روز اول اگرچه رگرسیون خطی بالاترین مقدار مجذور همبستگی (ضریب تعیین) را در اختیار دارد اما رگرسیون نمایی بر اساس مقدار همبستگی، مقادیر آلودگی را با دقت بالاتری تخمین زده است.

جدول ۴- همبستگی مقادیر تخمین زده شده و مقادیر اندازه‌گیری شده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

ردیف	رگرسیون		
	توانی	لگاریتمی	نمایی
۱	۰/۹۳۱۹	۰/۹۱۳۳	۰/۹۳۳۹
۲	۰/۶۱۷۳	۰/۶۵۱۰	۰/۵۹۸۵
۳	۰/۸۶۸۵	۰/۸۷۵۵	۰/۸۶۴۲
۴	۰/۸۰۸۷	۰/۷۵۲۵	۰/۸۱۷۹
۵	۰/۸۱۵۰	۰/۷۴۶۷	۰/۸۴۶۰
۶	۰/۷۸۶۹	۰/۷۸۱۴	۰/۷۸۶۵
۷	۰/۷۷۱۲	۰/۷۸۱۵	۰/۷۶۶۶
۸	۰/۵۲۸۰	۰/۵۲۶۰	۰/۵۲۷۹

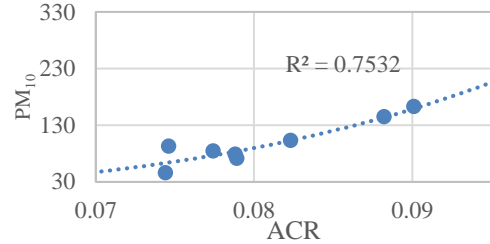
براساس جدول ۴ متوسط مقادیر همبستگی برای رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۷۵۹۷، ۰/۷۶۷۷، ۰/۷۵۳۵ و ۰/۷۶۵۹ می‌باشند. بدین صورت در برآورد مقدار غلظت ذرات معلق معادلات بدست آمده توسط رگرسیون‌های نمایی، توانی، خطی و لگاریتمی به ترتیب عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند. در جدول ۵ مقادیر میانگین مربع خطا برای هر روز و براساس رگرسیون‌های متفاوت آورده شده است.

رگرسیون لگاریتمی



شکل ۳- رگرسیون لگاریتمی بین مقادیر بازتابدگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

رگرسیون توانی



شکل ۴- رگرسیون توانی بین مقادیر بازتابدگی ظاهری سهم هواویز و مقادیر غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

عملیات نمایش داده شده در شکل‌های ۱ تا ۴ بر روی داده‌های تمامی روزها پیاده‌سازی شده و برای هر روز مقدار مجذور همبستگی به همراه معادله رگرسیون بدست آمده است. در جدول ۳ مجذور همبستگی رگرسیون‌های برازش داده شده برای ۸ روز مورد بررسی آورده شده است.

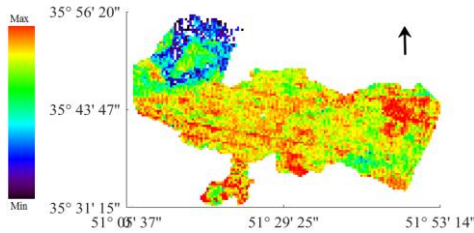
جدول ۳- مجذور همبستگی رگرسیون‌های خطی و غیرخطی برازش داده شده برای روزهای مورد بررسی

ردیف	رگرسیون		
	توانی	لگاریتمی	نمایی
۱	۰/۷۵۳۲	۰/۸۳۴۲	۰/۷۵۵۹
۲	۰/۴۷۳۶	۰/۴۲۳۸	۰/۴۴۷۹
۳	۰/۶۹۲۳	۰/۷۶۶۵	۰/۶۹۲۴
۴	۰/۶۹۰۵	۰/۵۶۶۳	۰/۷۰۲۳
۵	۰/۵۲۷۶	۰/۵۵۷۶	۰/۵۷۷۵
۶	۰/۵۴۹۹	۰/۶۱۰۷	۰/۵۵۲۸
۷	۰/۶۷۱۱	۰/۶۱۰۸	۰/۶۶۴۵
۸	۰/۲۶۷۲	۰/۲۷۶۷	۰/۲۶۷۲

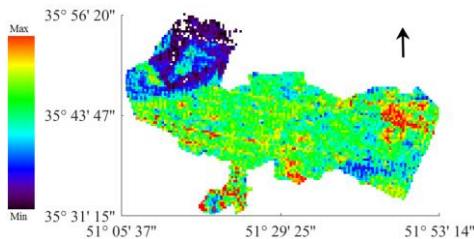
با توجه به جدول ۳ می‌توان دریافت که رگرسیون خطی براساس مجذور همبستگی بهترین عملکرد را در بین مدل‌های رگرسیون دیگر داشته است. متوسط مقادیر مجذور همبستگی رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۵۸۲۶، ۰/۵۹۱۲، ۰/۵۸۰۸ و ۰/۵۸۰۸

جدول ۵- میانگین مربع خطا مقادیر تخمین زده شده غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )

ردیف	رگرسیون			R <sup>2</sup>
	خطی	نمایی	لگاریتمی	
۱	۱۴/۲۷	۱۲/۹۷	۱۴/۷۰	۱۸/۳۸
۲	۱۱/۲۳	۱۱/۶۹	۱۱/۰۰	۱۱/۴۸
۳	۱۵/۰۹	۱۶/۱۰	۱۵/۱۸	۲۹/۰۰
۴	۲۹/۶۲	۲۷/۳۴	۳۰/۲۳	۲۷/۶۹
۵	۱۷/۸۲	۱۷/۴۳	۲۰/۴۹	۲۰/۰۷
۶	۲۱/۲۲	۲۱/۲۶	۲۱/۲۸	۲۶/۳۰
۷	۱۱/۵۲	۱۱/۹۰	۱۱/۴۹	۱۱/۸۳
۸	۲۱/۸۲	۲۱/۹۴	۲۱/۸۴	۲۱/۹۴



شکل ۷- تصویر پراکندگی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون شهر تهران با استفاده از رابطه بدست آمده از رگرسیون لگاریتمی

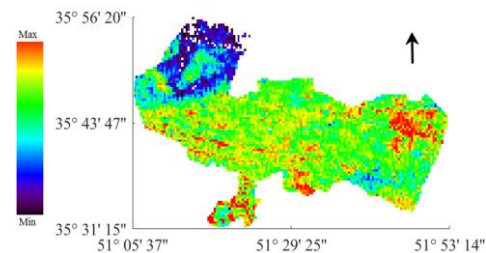


شکل ۸- تصویر پراکندگی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون شهر تهران با استفاده از رابطه بدست آمده از رگرسیون توانی

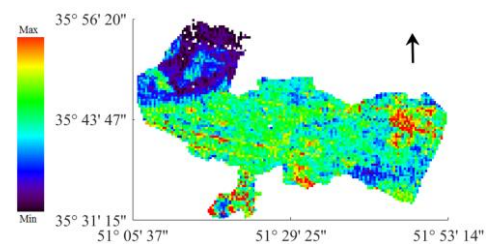
برای نمایش کلی میزان اختلاف مقادیر برآورد شده توسط رگرسیون‌های مختلف و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های آلودگی شکل ۹ آورده شده‌اند. شکل ۹ تفاوت مقادیر غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون را به ترتیب براساس رگرسیون خطی، نمایی، لگاریتمی برای تمام ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده در طول ۸ روز بررسی نمایش می‌دهد.

با توجه به اینکه در سه پارامتر مورد استفاده برای ارزیابی، ترتیب عملکرد رگرسیون‌های استفاده شده یکسان نبوده است، برای مشخص کردن روش بهتر از رتبه‌بندی رگرسیون‌ها استفاده می‌کنیم. در جدول ۶ رتبه‌بندی رگرسیون‌ها براساس ۳ پارامتر مجذور همبستگی مدل برازش داده شده، همبستگی مقادیر برآورد شده و مقادیر اندازه‌گیری شده و میانگین مربع خطا آورده شده است. براساس جدول ۶ و انجام رتبه‌بندی رگرسیون نمایی بهترین عملکرد را برای تولید نقشه آلودگی مرتبط با ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون دارد.

طبق جدول ۵ مقدار متوسط میانگین مربع خطا در تمام روزهای مورد بررسی برای رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۱۷/۸۲، ۱۷/۵۲، ۱۸/۲۷ و ۲۰/۸۳ می‌باشند. بدین صورت رگرسیون‌های توانی، لگاریتمی، خطی و نمایی به ترتیب عملکرد بهتری داشته‌اند. با استفاده از روابط بدست آمده از رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی، تصاویر پراکندگی ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون برای شهر تهران بدست آمده‌اند. تصاویر تولید شده توسط رگرسیون‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل‌های ۵ تا ۸ نمایش داده شده‌اند. نقشه‌های آلودگی آورده شده در اشکال ۵ تا ۸ مربوط به روز دوم مورد بررسی می‌باشند.

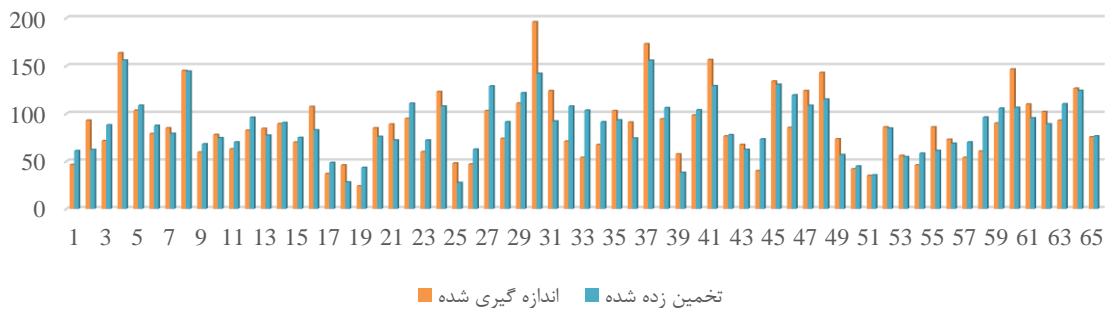


شکل ۵- تصویر پراکندگی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون شهر تهران با استفاده از رابطه بدست آمده از رگرسیون خطی

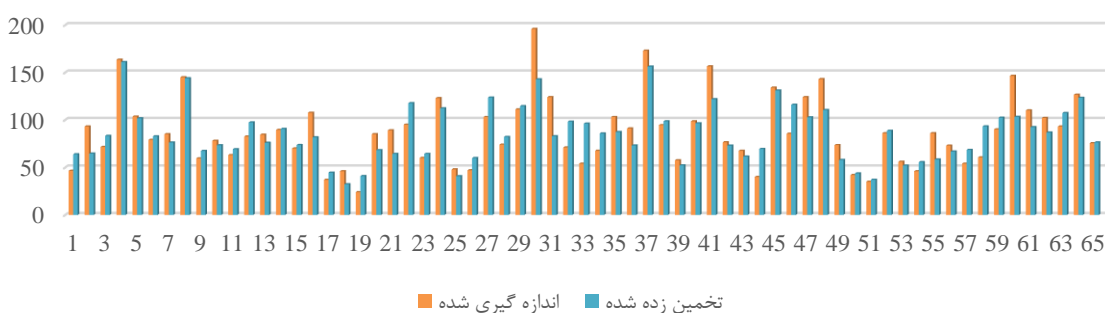


شکل ۶- تصویر پراکندگی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون شهر تهران با استفاده از رابطه بدست آمده از رگرسیون نمایی

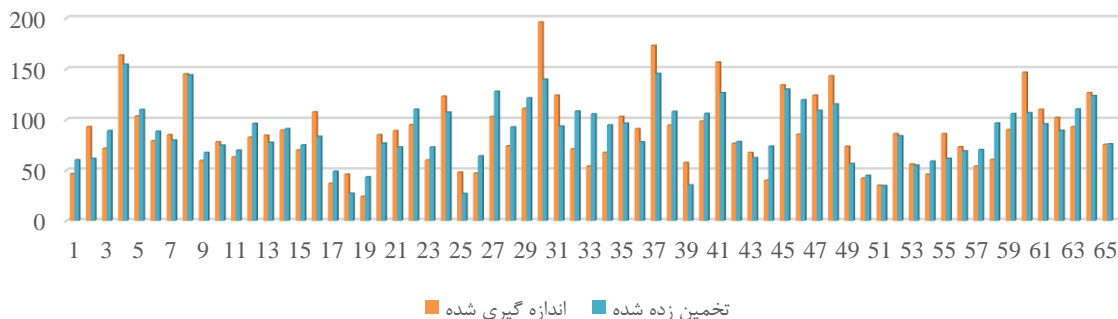
### رگرسیون خطی



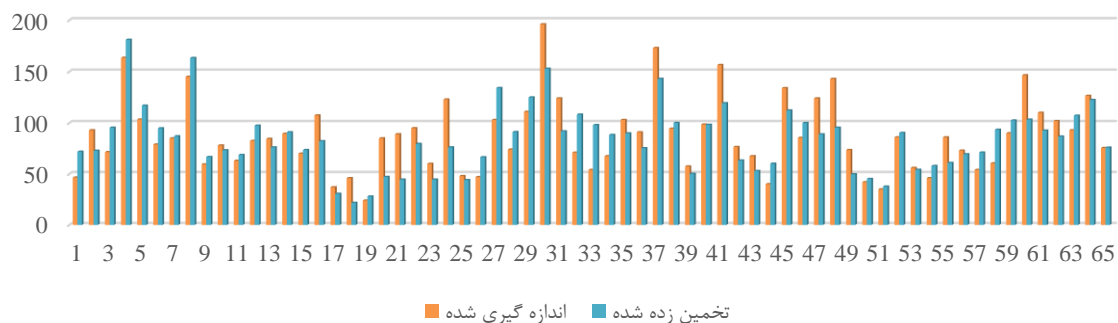
### رگرسیون نمایی



### رگرسیون لگاریتمی



### رگرسیون توانی



شکل ۹- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر برآورد شده براساس رگرسیون خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی (محور افقی، ایستگاه‌های مورد استفاده و محور عمودی، مقدار آلودگی را نمایش می‌دهند)

جدول ۶- رتبه‌بندی رگرسیون‌های مورد استفاده در جهت رتبه‌بندی بررسی و تعیین بهترین عملکرد

مجموع	میانگین مربع خطا	همبستگی مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده	مجذور همبستگی برازش	پارامتر ارزیابی رگرسیون
۶	۲	۳	۱	خطی
۴	۱	۱	۲	نمایی
۱۰	۳	۴	۳	لگاریتمی
۱۰	۴	۲	۴	توانی

همبستگی مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمین زده شده برای رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۷۵۹۷، ۰/۷۶۷۷، ۰/۷۵۳۵ و ۰/۷۶۵۹ بدست آمده است. با توجه به عدم یکنواخت بودن رفتار رگرسیون‌ها در سه پارامتر مورد بررسی، برای مشخص کردن روش رگرسیونی که بهترین عملکرد را دارا می‌باشد از رتبه‌دهی براساس پارامترهای ارزیابی استفاده کردیم. در نهایت پس از انجام رتبه بندی، رگرسیون نمایی بهترین عملکرد را در بین رگرسیون‌های دیگر دارا بود. به ترتیب رگرسیون‌های خطی، لگاریتمی، و توانی عملکردهای ضعیف‌تری در مقایسه با رگرسیون نمایی داشتند. در نهایت استفاده از الگوریتم‌های پیچیده‌تر از جمله‌های شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی بهتر پیشنهاد می‌شوند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد تصاویر بازتابندگی ظاهری سهم هواپز برای تولید نقشه‌های آلودگی مرتبط با ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون براساس رگرسیون‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه شهرستان تهران واقع در استان تهران بوده است. برای بررسی عملکرد رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی از سه پارامتر مجذور همبستگی رگرسیون (ضریب تعیین)، همبستگی مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و میانگین مربع خطا استفاده شد. متوسط مقادیر مجذور همبستگی (ضریب تعیین) رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۵۹۱۲، ۰/۵۸۲۶، ۰/۵۸۰۸ و ۰/۵۷۸۲ بدست آمده است. میانگین پارامتر

#### مراجع

- [1] Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F., & Kaufman, Y. J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112 (13).
- [2] Guo, Jian-Ping, Xiao-Ye Zhang, Hui-Zheng Che, Sun-Ling Gong, Xingqin An, Chun-Xiang Cao, Jie Guang (2009). "Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China." *Atmospheric Environment* 43, no. 37, 5876-5886.
- [3] Sun, L., Li, R. B., Tian, X. P., & Wei, J. (2017). Analysis of the temporal and spatial variation of aerosols in the Beijing-Tianjin-Hebei region with a 1 km AOD product. *Aerosol Air Qual. Res*, 17, 923-935.
- [4] Bilal, M., Nichol, J. E., & Spak, S. N. (2017). A new approach for estimation of fine particulate concentrations using satellite aerosol optical depth and binning of meteorological variables. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(2), 356-367.
- [5] Ma, Z., Liu, Y., Zhao, Q., Liu, M., Zhou, Y., & Bi, J. (2016). Satellite-derived high resolution PM2. 5 concentrations in Yangtze River Delta Region of China using improved linear mixed effects model. *Atmospheric Environment*, 133, 156-164.
- [6] He, Q., & Huang, B. (2018). Satellite-based high-resolution PM2. 5 estimation over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China using an improved geographically and temporally weighted regression model. *Environmental Pollution*, 236, 1027-1037.
- [7] Jung, C. R., Hwang, B. F., & Chen, W. T. (2017). Incorporating long-term satellite-based aerosol optical depth, localized land use data, and meteorological variables to estimate ground-level PM2. 5 concentrations in Taiwan from 2005 to 2015. *Environmental Pollution*.
- [8] de Hoogh, K., Héritier, H., Stafoggia, M., Künzli, N., & Kloog, I. (2018). Modelling daily PM2. 5 concentrations at high spatio-temporal resolution across Switzerland. *Environmental Pollution*, 233, 1147-1154.



- [9] Gupta, P., Khan, M. N., da Silva, A., & Patadia, F. (2013). MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: quantity and quality of the data for air quality monitoring. *Atmospheric pollution research*, 4(1), 43-52.
- [10] Chu, D. A., Kaufman, Y. J., Zibordi, G., Chern, J. D., Mao, J., Li, C., & Holben, B. N. (2003). Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(21).
- [11] Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: implications for air quality studies. *Geophysical research letters*, 30(21).
- [12] Benas, N., Beloconi, A., & Chrysoulakis, N. (2013). Estimation of urban PM<sub>10</sub> concentration, based on MODIS and MERIS/AATSR synergistic observations. *Atmospheric environment*, 79, 448-454.
- [13] Gupta, P., & Christopher, S. A. (2009). Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- [14] Li, C., Hsu, N. C., & Tsay, S. C. (2011). A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting. *Atmospheric Environment*, 45(22), 3663-3675.
- [15] Emili, E., Popp, C., Petitta, M., Riffler, M., Wunderle, S., & Zebisch, M. (2010). PM<sub>10</sub> remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote sensing of environment*, 114(11), 2485-2499.
- [16] Tian, J., & Chen, D. (2010). A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 221-229.
- [17] Lin, C., Li, Y., Yuan, Z., Lau, A. K., Li, C., & Fung, J. C. (2015). Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM<sub>2.5</sub>. *Remote Sensing of Environment*, 156, 117-128.
- [18] Zou, B., Pu, Q., Bilal, M., Weng, Q., Zhai, L., & Nichol, J. E. (2016). High-resolution satellite mapping of fine particulates based on geographically weighted regression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(4), 495-499.
- [19] Gupta, P., & Christopher, S. A. (2009). Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: 2. A neural network approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D20).
- [20] Wu, Yerong, Jianping Guo, Xiaoye Zhang, Xin Tian, Jiahua Zhang, Yaqiang Wang, Jing Duan, and Xiaowen Li (2012). "Synergy of satellite and ground based observations in estimation of particulate matter in eastern China." *Science of the Total Environment* 433, 20-30.
- [21] He, Q., & Huang, B. (2018). Satellite-based mapping of daily high-resolution ground PM 2.5 in China via space-time regression modeling. *Remote Sensing of Environment*, 206, 72-83.
- [22] Li, L. J., Ying, W. A. N. G., Zhang, Q., Tong, Y. U., Yue, Z. H. A. O., & Jun, J. I. N. (2007). Spatial distribution of aerosol pollution based on MODIS data over Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8), 955-960.
- [23] Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B. C., Li, R. R., & Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *IEEE T. Geosci. Remote.*, 35, 1286-1298.