

## بررسی میزان تأثیر آلاینده‌های جوی بر کارایی رابطه آنگستروم- پرسکات در برآورد تابش خورشید (مطالعه موردی: کرج)

سعیده کمالی<sup>۱</sup>، زهرا آقاشریعتمداری<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۲. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۱۱)

### چکیده

با توجه به اهمیت آگاهی از مقادیر تابش خورشیدی و همچنین تراکم اندک ایستگاه‌های تابش‌سنجی، ارائه مدل‌های برآورد تابش بر پایه سایر متغیرهای هواشناسی موجود موردنیاز مبرم می‌باشد. معادله تجربی آنگستروم - پرسکات که فرم کلی آن براساس داده‌های ساعات آفتابی است به‌طور گسترده برای برآورد تابش خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص واسنجی ضرایب این رابطه بر مبنای متغیرهای هواشناسی خاص هر منطقه صورت گرفته‌است؛ اما آنچه تاکنون در کشور ایران به آن پرداخته نشده است بررسی تأثیر آلودگی هوا به‌عنوان عامل کاهنده تابش دریافتی است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های روزانه تابش‌سنجی ایستگاه کرج در دوره سه‌ساله ۲۰۱۴-۲۰۱۶ واسنجی ضرایب رابطه آنگستروم-پرسکات با در نظر گرفتن متغیر شاخص آلودگی هوا در قالب مدل‌های خطی، نمایی و لگاریتمی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری نشان داد که مدل‌های اصلاحی با ساختار لگاریتمی با ضریب تبیین (۰/۵۹۱۱) دارای عملکرد بهتری نسبت به معادله کلی آنگستروم- پرسکات در برآورد تابش خورشیدی روزانه می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** مدل برآورد تابش کل خورشید، شاخص کیفیت هوا، مقیاس زمانی روزانه، ایستگاه کرج، ایران

### مقدمه

معادلات برآورد تبخیر \_ تعرق گیاه می‌باشد و تخمین مناسب آن در توسعه مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان اهمیت زیادی دارد (Almorox et al, 2004).

دسترسی به داده‌های تابش خورشید برای ارزیابی پتانسیل بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در هر محل ضروری است. در کنار روش‌های مبتنی بر مقادیر اندازه‌گیری شده تابش، روش‌های تجربی متعددی نیز بر مبنای مقادیر اندازه‌گیری شده عوامل هواشناسی ارائه شده‌اند. این روش‌ها از اهمیت بالایی برخوردارند چراکه به علت محدودیت‌های فنی، مالی و حتی سازمانی، داده‌های تابش در ایستگاه‌های اندکی اندازه‌گیری می‌شوند و حتی در بیشتر مناطق امکان دسترسی به این داده‌ها وجود ندارد و این امر به‌صورت جدی مانع از پیشرفت تحقیقاتی می‌شود که به تابش خورشید به‌عنوان ورودی نیاز دارند (Muneer et al, 2007; Yorukoglu et al, 2006).

در سال‌های اخیر تلاش برای دستیابی به روشی فراگیر به‌منظور برآورد تابش به‌صورت تابعی از متغیرهای رایج هواشناسی، زمینه‌ساز تحقیقات گسترده در زمینه تابش بوده است. به همین منظور روش‌های مختلف شبیه‌سازی و برآورد

خورشید منبع اولیه تأمین انرژی برای کلیه فرایندهای فیزیکی و شیمیایی در روی زمین است به همین دلیل برای تداوم زندگی در درجه اول اهمیت قرار دارد. استفاده از فن‌آوری انرژی خورشیدی که جز منابع انرژی پاک و تجدید پذیر است، در آینده ضروری است. تابش خورشیدی همچنین روی فرایندهای آب و هوایی که مشخص‌کننده محیط پیرامون ما می‌باشد، تأثیرگذار است.

درواقع تولیدات کشاورزی نوعی بهره‌برداری از انرژی خورشیدی می‌باشند. تابش از لحاظ شدت و مدت برای رشد و فتوسنتز گیاه ضروری است (Roodari and Zand-Parsa, 2013). برآورد تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین کاربردهای زیادی در علوم معماری، مهندسی انرژی، کشاورزی و هیدرولوژی دارد. به‌عنوان مثال برآورد درست مقدار تابش خورشیدی از اصول مهم و اصلی طراحی شبکه‌ها و برنامه‌ریزی آبیاری است. همچنین تابش خورشیدی عامل بسیار مهمی در

تابش خورشید ارائه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله روش‌های شبیه‌سازی می‌توان استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، روش‌های درون‌یابی مکانی و روابط همبستگی بین تابش ورودی خورشید و سایر متغیرهای هواشناسی را نام برد. متغیرهای هواشناسی که در روابط مختلف استفاده می‌شوند شامل: ساعات آفتابی، دمای هوا، ابری بودن، بارندگی، رطوبت نسبی، ترکیب، غلظت و اندازه ذرات موجود در جو و آب قابل بارش می‌باشند. این متغیرها به‌تنهایی یا همراه با هم در روابط مختلف به کار گرفته می‌شوند (Kamali and Moradi, 2004). با مروری اجمالی بر ضرایب مختلف رابطه آنگستروم- پرسکات که در مناطق مختلف جهان و با سری داده‌های مختلف به‌دست‌آمده است، مشاهده می‌شود که ضرایب این رابطه دارای تغییرپذیری بالایی است.

یکی از فرضیاتی که آنگستروم در رابطه خود به کار گرفت، ثابت بودن ضرایب رابطه با زمان بود به این معنی که با وقوع طول مدت تابش یکسان در روزهای مشابه در سال‌های مختلف و در یک محل، این ضرایب ثابت می‌باشند، درحالی‌که ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات به تغییرات طول مدت تابش خورشید در فواصل زمانی معین بستگی دارند. با توجه به این‌که طول مدت تابش خورشید به علت تبعیت از عواملی همچون وجود ابر در آسمان و مقدار آن در اصل دارای تغییرات تصادفی است، به تبع آن ضرایب مدل نیز با زمان و با تغییر شرایط محیطی موجود تغییر می‌کند و ثابت نیستند (Badescu, 2008). به‌طورکلی می‌توان گفت عواملی همچون عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه از سطح دریا، ارتفاع متوسط خورشید، مقدار بخارآب در جو و تجمع آلودگی‌ها در جو می‌توانند بر ضرایب رابطه تأثیر بگذارند.

نظر به اهمیت مقادیر تابش خالص خورشیدی در روابط مورد‌استفاده برای برآورد تبخیر- تعرق و نیاز آبی گیاهان و کاربردهای دیگر تابش خورشیدی در زمینه‌های مختلف معماری، صنعت و غیره لازم است مقادیر ضرایب رابطه در هر منطقه برای شرایط آن منطقه واسنجی و متناسب با شرایط حاکم بر آن ناحیه تعیین گردند. تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص واسنجی ضرایب این رابطه بر مبنای متغیرهای هواشناسی خاص هر منطقه صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به ارائه تابع اصلاح‌شده معادله آنگستروم- پرسکات (فرم درجه دوم، درجه سوم، لگاریتمی و نمایی) (Almorox et al, 2010; Katiyar et al, 2004) و یا در نظر گرفتن تأثیر سایر متغیرهای هواشناسی و عوامل جغرافیایی (طول جغرافیایی، جغرافیایی، ارتفاع، پوشش ابری، دما، بارندگی و رطوبت نسبی)

در ساختار رابطه (Jin et al, 2005; Muneer and Gul, 2000) اشاره کرد اما آنچه تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است در نظر گرفتن تأثیر آلودگی هوا به‌عنوان عامل کاهنده تابش دریافتی است.

عوامل دیگر نظیر ذرات معلق موجود در جو یا آلودگی جو می‌توانند تابش رسیده به سطح زمین را تحت تأثیر قرار دهند. (Zhao et al, 2013). ذرات معلق موجود در جو می‌توانند به‌طور مستقیم از طریق پراکنش و جذب تابش خورشیدی باعث کاهش تابش رسیده به سطح شوند و یا به‌طور غیرمستقیم به‌عنوان هسته تراکم عمل کرده که موجب افزایش بازتاب از طریق ابر می‌شوند. بر این اساس Zhao et al (2013)، با استفاده از اطلاعات اقلیمی ایستگاه‌های شبکه تابش سنجی و داده‌های آلودگی هوای چین بر مبنای رابطه آنگستروم- پرسکات به این نتیجه رسیدند که از بین مدل‌های خطی، نمایی و لگاریتمی مدل‌های لگاریتمی بهترین عملکرد را در برآورد تابش خورشید دارند.

همچنین در تحقیقی دیگر در چین بر اساس داده‌های پوشش ابری آسمان، سرعت باد، بارندگی، اثرات آلودگی هوا بر ساعات آفتابی را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که آلودگی هوا می‌تواند باعث کاهش ساعات آفتابی در مناطق مختلف چین گردد (Wang et al, 2012).

Yao et al (2017) با استفاده از داده‌های ۵۵ ساله تابش خورشیدی روزانه برای ایجاد مدل‌های محاسبه تابش پراکنده روزانه با استفاده از داده‌های آلودگی هوا یک روش جدید برای برآورد تابش پراکنده ارائه دادند و نشان دادند که مدل‌های اصلاحی بر اساس شاخص آلودگی هوا نسبت به مدل‌های معمولی عملکرد بهتری دارند.

همچنین Vakili et al (2015)، برای مدل‌سازی میزان جذب تابش خورشیدی روزانه با استفاده از روش شبکه عصبی در تهران، از اطلاعاتی نظیر دمای ماکزیمم روزانه، دمای مینیمم روزانه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ذرات معلق موجود در جو ( $PM_{10}$ )، به‌عنوان ورودی شبکه عصبی و تابش خورشیدی روزانه به‌عنوان خروجی و داده‌های یک‌ساله اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی روزانه استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد که تابش مدل‌سازی شده با استفاده از شبکه عصبی با ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ دقت قابل‌توجهی در برآورد تابش خورشیدی روزانه دارد.

با توجه به اینکه کشور ایران یکی از کشورهایی است که به‌اندازه کافی از تابش خورشیدی بهره‌مند است، در حال حاضر تنها ۲۵ ایستگاه تابش سنجی در ایران وجود دارد (به‌طور

شاخص آلودگی هوا (API) است. در نخستین گام کنترل کیفیت داده‌ها انجام شد. از بین داده‌های مورد استفاده متغیرهای مربوط به تابش (تابش کل و تعداد ساعات آفتابی) دارای موارد نقص آماری بودند. بنابراین، با توجه به هدف مطالعه که برآورد تابش کل دریافتی از خورشید بر رویه افقی در سطح زمین است، کنترل کیفیت آمار تابش با دقت بالا انجام گرفت. فرآیند کنترل کیفیت آمار تابش ایستگاه برمبنای الگوریتم کنترل کیفیت (Moradi, 2009) اجرا شد. حدود و مرزهای استاندارد این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

#### سطح یک- مقایسه تابش کل روزانه با تابش فراجو

در این مرحله تابش کل روزانه خورشید ( $R_s$ ) با تابش روزانه دریافتی به سطحی افقی در بالای جو ( $R_0$ ) مقایسه شد. مقادیر  $R_0$  برای این ایستگاه با توجه به روابط نجومی موجود و برای هر روز سال محاسبه شد و مقادیر  $R_s$  نیز همان اندازه گیری‌های روزانه می‌باشد.

$$0.03R_0 \leq R_s < R_0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

#### سطح دو- مقایسه تابش کل روزانه با تابش کل دریافتی در شرایط آسمان صاف

$$R_s < 1.1R_{CS} \quad (\text{رابطه ۲})$$

با اجرای مراحل اول و دوم این الگوریتم خط‌کشی برای کنترل کیفیت داده‌ها به دست می‌آید که در شکل (۱) می‌توان آن را مشاهده نمود. ناحیه زردرنگ در این نمودار منطقه‌ای است که داده‌های قابل پذیرش در آزمون‌های سطح یک و دو در آن قرار می‌گیرند.

#### رابطه آنگستروم- پرسکات

یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین روابط تجربی موجود در زمینه برآورد تابش خورشیدی بر سطح افقی رابطه آنگستروم است. مدل آنگستروم (Angstrom, 1924) بر پایه ضرایب تجربی  $a, b$  استوار است و در گروه روابط یک متغیره برآورد تابش قرار دارد. رابطه آنگستروم-پرسکات رابطه خطی ساده‌ای است که میزان تابش خورشید بر یک سطح افقی را از روی نسبت آن به مقدار تابش در یک روز صاف و بدون ابر با آسمان شفاف بیان می‌کند. آنگستروم در رابطه پیشنهادی خود کسر تابش ( $\frac{R_s}{R_0}$ ) را تابعی خطی از کسر ساعت آفتابی ( $\frac{n}{N}$ ) معرفی می‌کند.

$$\frac{R_s}{R_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

متوسط یک ایستگاه در هر ۶۵۹۲۰ کیلومترمربع) که در تمامی آن‌ها تابش کل خورشیدی (TSR)<sup>۱</sup> و همچنین در برخی از آن‌ها سایر مؤلفه‌های تابش مانند تابش پراکنده (DSR)<sup>۲</sup> و تابش بازتاب‌شده (RSR)<sup>۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود. از آنجاکه این داده‌ها تنها در محدودی از ایستگاه‌های هواشناسی ثبت می‌شوند، یافتن روابطی بین این مقادیر و سایر متغیرهای هواشناسی برای شبیه‌سازی و برآورد مقادیر تابش در نقاط فاقد ایستگاه مفید خواهد بود (Aghashariatmadary, 2011).

با توجه به تراکم اندک ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران، تدوین و گسترش مدل‌های برآورد تابش بر پایه سایر متغیرهای هواشناسی موجود مورد نیاز مبرم می‌باشد. بر این اساس، هدف اصلی از انجام این مطالعه دستیابی به روابطی است که بر مبنای آن‌ها بتوان با استفاده از داده‌های هواشناسی موجود به برآورد مقادیر تابش دریافتی از خورشید بر سطوح افقی در هر نقطه مورد نظر از کشور پرداخت؛ اما عوامل مختلفی از جمله آلاینده‌های موجود در جو می‌توانند تابش رسیده به سطح زمین را تحت تأثیر قرار دهند، هدف از این مطالعه، بررسی میزان تأثیر آلاینده‌های جوی بر روابط برآورد تابش خورشید و توسعه مدل‌های مختلف (مدل‌های خطی، نمایی و لگاریتمی) برآورد تابش خورشیدی بر اساس معادله آنگستروم- پرسکات با استفاده از داده‌های ساعات آفتابی روزانه و داده‌های آلودگی هوای روزانه است. در این مطالعه روشی جدید بر اساس داده‌های شاخص آلودگی هوا برای اصلاح و بهبود ضرایب معادله آنگستروم - پرسکات معرفی شده است.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های مورد استفاده

ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر ارتفاع در شهر کرج واقع در استان البرز است. در این بررسی ابتدا داده‌های تابش خورشیدی روزانه و ساعات آفتابی روزانه ایستگاه هواشناسی کرج از سازمان هواشناسی و داده‌های روزانه آلودگی هوا از مرکز پایش محیط‌زیست کرج در دوره آماری سه‌ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۶) دریافت شد و بانک اطلاعاتی به تفکیک سال تشکیل گردید. این بانک شامل داده‌های تابش کل خورشیدی ( $R_s$ )، تابش دریافتی بر رویه افقی در بالای جو ( $R_0$ )، کسر ساعات آفتابی ( $\frac{n}{N}$ ) و

1. Total Solar Radiation
2. Diffuse Solar Radiation
3. Reflected Solar Radiation

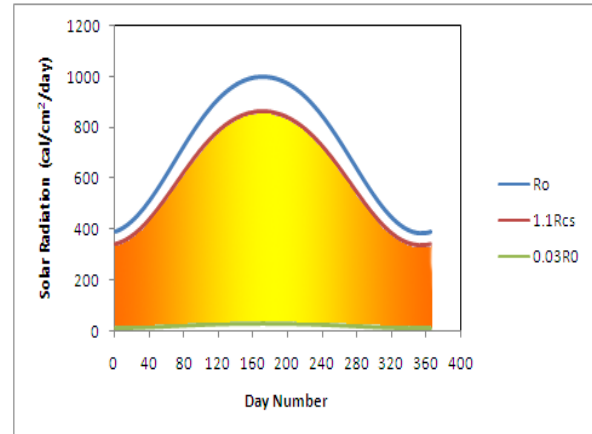
واسنجی مقادیر  $a = 0.25$  و  $b = 0.5$  بکار برده می‌شود. بررسی‌های مقدماتی نشان داده است که در ایستگاه‌های ایران  $a$  بین ۰/۲۱ در یزد تا ۰/۳۹ در کرمانشاه و  $b$  بین ۰/۳۴ در زنجان تا ۰/۶۲ در تبریز تغییر می‌کند (Khalili and Rezai, 1997).

### شاخص آلودگی هوا (Air Pollution Index)

شاخص آلودگی هوا، شاخصی جهت گزارش روزانه کیفیت هوا است. این شاخص به منظور آگاهی از درجه کیفیت هوا (پاک بودن یا آلوده بودن) و چگونگی اثرات سلامتی مرتبط با آن ارائه شده است. به عبارت دیگر API به اثرات سلامتی ناشی از مواجهه با هوای آلوده آگاه می‌سازد. شاخص آلودگی هوا برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، منوکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد محاسبه می‌شود (Tehran University of Sciences Institute for Environmental Research Air Pollution Research Center, 2011). مراحل محاسبه شاخص آلودگی هوا به این صورت است: الف) سنجش غلظت آلاینده‌های اصلی هوا در هر ایستگاه، ب) تبدیل غلظت هر آلاینده به API، طبق رابطه (۹)، ج) انتخاب بالاترین مقدار API به عنوان API آن ایستگاه. همچنین برای محاسبه شاخص آلودگی هوا از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$API = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BPHi - BPLo} (C_o - BPLo) + I_{Lo} \quad (9 \text{ رابطه})$$

که  $I_{Hi}$  مقدار API منطبق با  $BPHi$ ،  $I_{Lo}$  مقدار API منطبق با  $BPLo$ ، نقطه شکستی که بزرگ‌تر یا مساوی  $C_p$ ،  $BPLo$ ،  $C_p$ ، نقطه شکستی که کوچک‌تر یا مساوی  $C_p$  است. غلظت اندازه‌گیری شد (گِرد شده) برای آلاینده P است. همچنین برای به دست آوردن نقاط شکست از جدول (۱) استفاده می‌شود (Tehran University of Sciences Institute for Environmental Research Air Pollution Research Center, 2011).



شکل ۱- حدود پذیرش داده‌ها در آزمون‌های سطح یک و دو با توجه به حدود پذیرش تعیین‌شده برای داده‌های تابش، فرآیند کنترل کیفیت آمار ایستگاه به تفکیک سال صورت گرفت.

در این رابطه  $R_s$  تابش کلی دریافتی از خورشید بر رویه افقی در سطح زمین،  $R_0$  تابش کلی دریافتی از خورشید بر رویه افقی در بالای جو زمین،  $a$  و  $b$  ضرایب رگرسیون،  $n$  ساعات آفتابی حقیقی و  $N$  ساعات آفتابی نظری است. (رابطه ۴)

$$R_0 = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [ \omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) ] \quad (5 \text{ رابطه})$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (6 \text{ رابطه})$$

$$\omega_s = \arccos[ -\tan(\phi) \tan(\delta) ] \quad (7 \text{ رابطه})$$

$$\delta = 0.409 \sin\left[\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right] \quad (8 \text{ رابطه})$$

که در آن  $G_{sc}$  ثابت خورشیدی، که مقدار آن برابر است با  $0.082$  (مگاژول بر مترمربع بر روز)،  $d_r$ ، فاصله نسبی زمین-خورشید،  $\omega_s$ ، زاویه ساعتی خورشید،  $\delta$  زاویه میل خورشید،  $\phi$  عرض جغرافیایی بر حسب رادیان و  $J$  شماره روز ژولوسی است.

در شرایط عدم دسترسی به داده‌های تابش و صورت نگرفتن

جدول ۱- طبقات غلظت آلاینده‌ها جهت محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا (USEPA, 1998)

$O_3$ (PPM)	$PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ )	CO (PPM)	$SO_2$ (PPM)	$NO_2$ (PPM)	PSI	توصیف‌کننده
-	۰-۵۴	۰/۰-۴/۴	۰/۰۰۰-۰/۰۳۴	-	۰-۵۰	خوب
-	۵۵-۱۵۴	۴/۵-۹/۴	۰/۰۳۵-۰/۱۴۴	-	۵۱-۱۰۰	متوسط
۰/۱۲۵-۰/۱۶۴	۱۵۵-۲۵۴	۹/۵-۱۵/۴	۰/۱۴۵-۰/۲۲۴	-	۱۰۱-۱۵۰	غیربهداشتی برای گروه‌های حساس
۰/۱۶۵-۰/۲۰۴	۲۵۵-۳۵۴	۱۲/۵-۱۵/۴	۰/۲۲۵-۰/۳۰۴	-	۱۵۱-۲۰۰	غیربهداشتی
۰/۲۰۵-۰/۴۰۴	۳۵۵-۴۲۴	۱۵/۵-۳۰/۴	۰/۳۰۵-۰/۶۰۴	۰/۶۵-۱/۲۴	۲۰۱-۳۰۰	خیلی غیربهداشتی
۰/۴۰۵-۰/۵۰۴	۴۲۵-۵۰۴	۳۰/۵-۴۰/۴	۰/۶۰۴-۰/۸۰۴	۱/۲۵-۱/۶۴	۳۰۱-۴۰۰	خطرناک
۰/۵۰۵-۰/۶۰۴	۵۰۵-۶۰۴	۴۰/۵-۵۰/۴	۰/۸۰۵-۱/۰۰۴	۱/۶۵-۲/۰۴	۴۰۱-۵۰۰	بسیار خطرناک

زمانی است.

مقدار خطا در هریک از سنج‌های فوق با واحد متغیر مورداندازه‌گیری بیان می‌شود. با تقسیم مقادیر حاصل از هریک از این روابط، سنج موردبررسی برحسب درصد بیان می‌شود.  $RMSE$  اطلاعاتی را درباره کارایی کوتاه‌مدت مدل از طریق مقایسه جمله به جمله تفاضل مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده می‌دهد. هرچه مقدار  $RMSE$  کمتر باشد کارایی مدل بهتر است. این سنج هیچ‌گونه قضاوتی در مورد بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل ارائه نمی‌کند.  $MBE$  بیانگر کارایی بلندمدت مدل است و مقدار مثبت آن بیش‌برآورد مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد و برعکس هرچه مقدار  $MBE$  کمتر باشد کارایی مدل بیشتر است (Badescu, 2008). آماره  $NSE$  را نخستین بار در سال ۱۹۷۰، نش و ساتکلیف به کار گرفتند. مقدار این آماره از منفی بی‌نهایت تا ۱ است هرچقدر مقدار آماره به یک نزدیک‌تر باشد مدل به واقعیت نزدیک‌تر است (Nash-Sutcliffe Equation, 1970).

### نتایج و بحث

مدل آنگستروم- پرسکات تابش کل روزانه خورشید را با استفاده از کسر ساعات آفتابی ( $\frac{n}{N}$ ) برآورد می‌کند. در روش خطی آنگستروم- پرسکات تنها از یک متغیر هواشناسی یعنی تعداد ساعات آفتابی برای برآورد تابش استفاده می‌شود و مقادیر  $a$  و  $b$  به‌عنوان ضرایب رگرسیون در نظر گرفته می‌شوند، اما متغیرهای بسیاری می‌توانند بر میزان و شدت تابش خورشید تأثیر بگذارند. علاوه بر این، رابطه متقابل مورد استفاده در این تحقیق شامل تابش خورشیدی روزانه، متغیرها با یکدیگر نیز به‌خودی‌خود است و برآورد تابش را دشوار می‌سازد (Aghashariatmadary, 2011).

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل تابش خورشیدی روزانه، ساعات آفتابی و داده‌های آلودگی هوای روزانه در دوره آماری سه‌ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۶) می‌باشند. در گام اول کیفیت داده‌های تابش مورد بررسی قرار گرفت و پس از کنترل کیفیت داده‌ها در نهایت ۳۸۳ روز داده برای انجام تجزیه و تحلیل انتخاب شدند. از آنجاکه هدف از این تحقیق جستجوی روابطی برای برآورد تابش دریافتی بر رویه افقی در سطح زمین با استفاده از متغیرهای هواشناسی و با تأکید بر بررسی نقش شاخص آلودگی هوا (API) است، علاوه بر واسنجی ضرایب رابطه آنگستروم-پرسکات با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه

### روش‌های اعتبار سنجی مدل‌های برآورد تابش خورشید

علی‌رغم اینکه مقادیر حقیقی متغیر مورداندازه‌گیری و در نتیجه مقدار حقیقی خطا را نمی‌توان تعیین نمود اما بررسی‌ها نشان داده است که خطاهای تصادفی از قوانین آماری تبعیت می‌کنند (Crandall and Seabloom, 1970).

خطاهای سیستماتیک و تصادفی جزء لاینفک اندازه‌گیری‌ها بوده و در داده‌های اندازه‌گیری شده پنهان می‌باشند. این خطاها را می‌توان با روش‌های مختلف تعیین و آشکار نمود.

اما امکان حذف کامل آن‌ها وجود ندارد (BIPM, 1995). برای تعیین میزان کارایی مدل‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر معمولاً از سنج‌های آماری متعددی استفاده می‌شود. رایج‌ترین سنج‌های آماری معرف کارایی مدل میانگین درصد خطا (MPE)<sup>۱</sup>، جذر انحراف میانگین مربعات خطا از میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده (RMSE)<sup>۲</sup>، میانگین خطای اریبی (MBE)<sup>۳</sup>، میانگین خطای مطلق انحرافات (MABE)<sup>۴</sup> و معادله نش- ساتکلیف (NSE)<sup>۵</sup> هستند که این شاخص‌های آماری به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (Zhao et al, 2013):

$$MBE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (obs_i - mod_i) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$MABE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |obs_i - mod_i| \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$MPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{obs_i - mod_i}{obs_i} \right) \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \left| \frac{obs_i - mod_i}{obs_i} \right| \right) \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$REME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (obs_i - mod_i)^2}{m}} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (obs_i - mod_i)^2}{\sum_{i=1}^m (obs_i - \bar{obs}_i)^2} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

که  $obs_i$  تابش خورشیدی روزانه اندازه‌گیری شده در زمان  $i$ ،  $mod$  تابش خورشیدی محاسباتی در زمان  $i$ ،  $\bar{obs}_i$  متوسط تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در زمان  $i$  و  $m$  طول سری

1. mean percentage error  
2. root mean square error  
3. mean bias error  
4. mean absolute bias error  
5. Nash-Sutcliffe Equation

پس از محاسبه روابط رگرسیونی جدید که در ساختار آن‌ها نقش مؤلفه کیفیت هوا به‌عنوان یک عامل مؤثر در نظر گرفته شده است شاخص‌های خطا محاسبه‌شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل در جدول (۳) نمایش داده شده است.

کرج، سه مدل جدید با دخالت دادن API به‌دست آمد. این مدل‌ها توابعی از تابش دریافتی در بالای جو زمین ( $R_0$ )، شاخص آلودگی هوا (API) و کسر ساعات آفتابی ( $\frac{n}{N}$ ) می‌باشند و به ترتیب در فرم‌های نمایی، لگاریتمی و خطی به دست آمده‌اند (جدول (۲)).

جدول ۲- مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده برای برآورد تابش خورشیدی روزانه بر اساس ساعات آفتابی و شاخص آلودگی هوا

مدل	معادلات رگرسیونی
آنکستروم_ پرسکات	$\frac{R_s}{R_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right)$
نمایی	$\frac{R_s}{R_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c \exp\left(\frac{API}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right) \exp\left(\frac{API}{100}\right)$
لگاریتمی	$\frac{R_s}{R_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c \log\left(\frac{API}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right) \log\left(\frac{API}{100}\right)$
خطی	$\frac{R_s}{R_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{API}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right)\left(\frac{API}{100}\right)$

جدول ۳- نتایج شاخص‌های آماری محاسباتی حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام مدل‌های مورد استفاده

مدل	MABE	MPE	MAPE	RMSE	NSE
خطی	۰/۰۵۶۸	-۰/۰۲۵۲	۰/۱۰۶۹	۰/۰۷۳۷	۰/۵۸۹۱
نمایی	۰/۰۵۶۸	-۰/۰۲۵۲	۰/۱۰۶۹	۰/۰۷۳۹	۰/۵۸۶۴
لگاریتمی	۰/۰۵۶۶	-۰/۰۲۵۳	۰/۱۰۶۷	۰/۰۷۳۵	۰/۵۹۱۲
آنکستروم_ پرسکات	۰/۰۵۷۰	-۰/۰۲۶۵	۰/۱۰۸۲	۰/۰۷۴۵	۰/۵۸۰۸

فرم کلی معادله آنکستروم\_ پرسکات نشان‌دهنده این است که در مدل‌های مورد بررسی که در ساختار آن‌ها نقش مؤلفه کیفیت هوا به‌گرفته شده است نظر عنوان یک عامل مؤثر در فرم کلی معادله آنکستروم\_ شاخص‌های آماری خطا نسبت به پرسکات تا حدی کاهش یافته‌اند.

همچنین نمودار پراکنش ضریب گذرایی جو حاصل از داده‌های تابش خورشیدی روزانه مشاهداتی ایستگاه در مقابل ضریب گذرایی حاصل از داده‌های تابش روزانه هریک از مدل‌ها ترسیم گردید (شکل (۲)).

#### ضرایب مدل‌ها در ایستگاه مطالعاتی

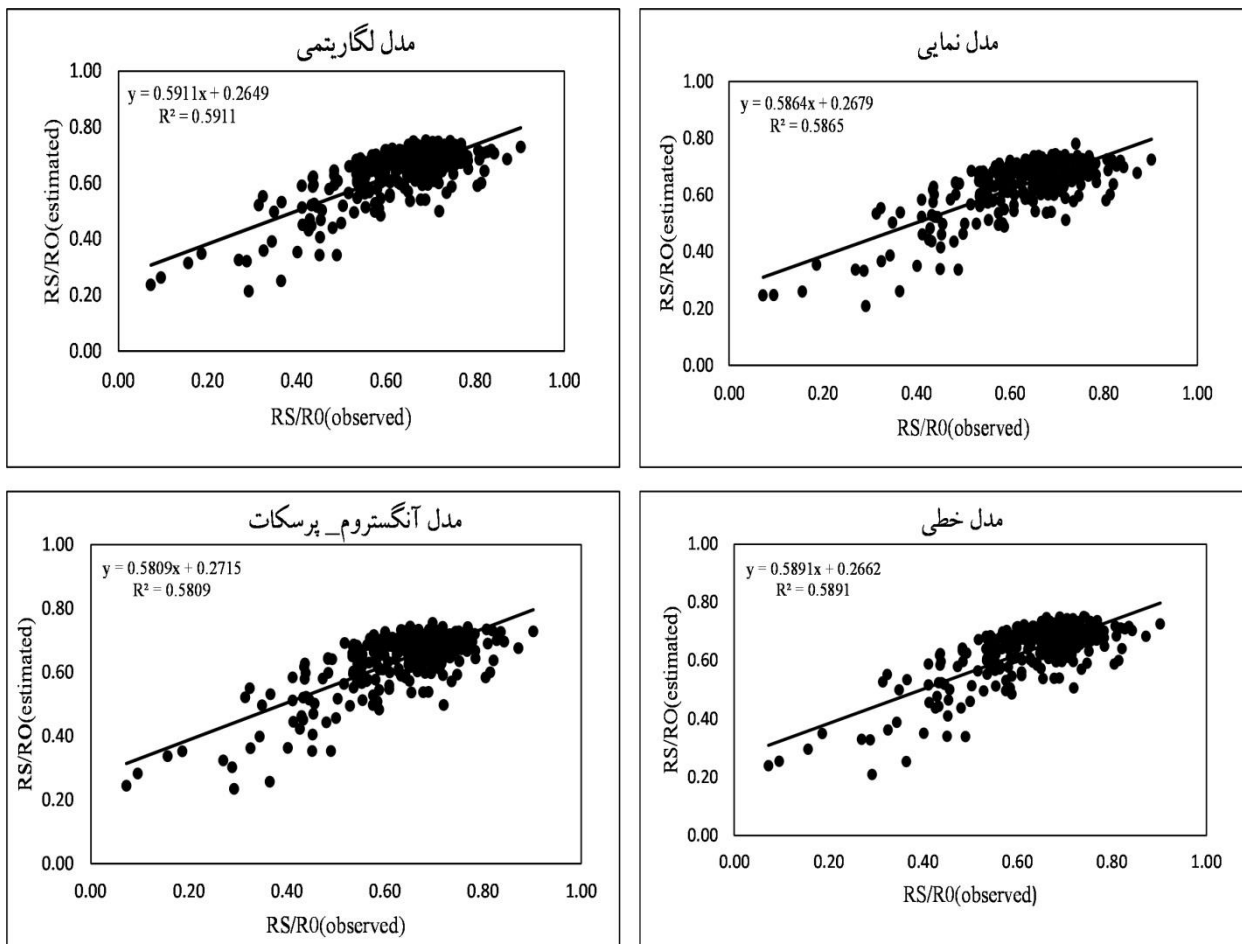
جدول (۴) نشان‌دهنده ضرایب معادله کلی آنکستروم\_ پرسکات و مدل‌های خطی، نمایی و لگاریتمی مورد استفاده برای برآورد تابش خورشیدی روزانه، بر اساس داده‌های ساعات آفتابی و داده‌های آلودگی هوای روزانه در ایستگاه هواشناسی کرج در دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۱۴ است. با توجه به ضرایب به دست آمده مشاهده می‌شود که مقادیر ضرایب a و b مدل لگاریتمی

نتایج شاخص‌های آماری جدول (۳) نشان می‌دهد که RMSE بین ۰/۰۷۳۵-۰/۰۷۴۵ تغییر می‌کند. کمترین مقدار آن ۰/۰۷۳۵ مربوط به مدل لگاریتمی و بیشترین مقدار آن ۰/۰۷۴۵ مربوط به مدل آنکستروم\_ پرسکات است. مقادیر MAPE مدل آنکستروم\_ پرسکات، خطی، نمایی و لگاریتمی به ترتیب ۰/۱۰۸۲، ۰/۱۰۶۹، ۰/۱۰۶۹ و ۰/۱۰۶۷ است. کمترین مقدار MPE مربوط به مدل‌های خطی و نمایی (۰/۰۲۵۲-) و بیشترین مقدار آن مربوط به فرم کلی معادله آنکستروم\_ پرسکات (۰/۰۲۶۵-) است.

ضریب تبیین فرم کلی معادله آنکستروم\_ پرسکات، مدل خطی، مدل نمایی و مدل لگاریتمی به ترتیب برابر است با ۰/۵۸۰۹، ۰/۵۸۹۱، ۰/۵۸۶۵ و ۰/۵۹۱۱ که بیشترین مقدار آن مربوط به مدل‌های لگاریتمی (۰/۵۹۱۱) و در سطح پنج درصد معنی‌دار است. مقایسه مقادیر متوسط شاخص‌های آماری نظیر MBE, MPE, MAPE, MABE, RMSE و NSE در ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از مدل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و

نشان‌دهنده این است که آلودگی هوا باعث کاهش تابش رسیده به سطح زمین می‌گردد.

تقریباً متناظر با ضرایب a و b معادله کلی آنگستروم-پرسکات است. همچنین مقادیر ضریب c در همه مدل‌های اصلاحی بر اساس شاخص کیفیت هوا دارای مقادیر منفی است که



شکل ۲- نمودار پراکنش ضریب گذرایی جو داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه کرج در مقابل ضریب گذرایی جو داده‌های حاصل از مدل‌های موردبررسی (آنگستروم-پرسکات، نمایی، خطی و لگاریتمی)

جدول ۴- ضرایب رگرسیونی مدل‌ها در ایستگاه مورد مطالعه

مدل	a	b	c	d
آنگستروم-پرسکات	۰/۲۱۶۵	۰/۵۴۶۴	-	-
نمایی	۰/۳۰۴۵	۰/۴۳۱۳	-۰/۰۲۳۸	۰/۰۳۱۶
لگاریتمی	۰/۲۲۳۵	۰/۵۳۶۹	-۰/۱۴۲۲	۰/۲۶۸۷
خطی	۰/۳۰۳۵	۰/۴۰۷۷	-۰/۰۷۲۲	۰/۱۱۸۳

معادله آنگستروم-پرسکات تحت تأثیر مشخصات جغرافیایی، ارتفاع و آلاینده‌های موجود در جو است؛ بنابراین با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، اثرات مشخصات جغرافیایی، ارتفاع و آلاینده‌های موجود در جو بر تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد تا بتوان به یک رابطه مناسب برای برآورد تابش خورشید در مناطقی که داده‌های

به‌طورکلی تغییر در ضرایب a و b معادله آنگستروم-پرسکات در نتیجه تغییرات فصلی و محلی در نوع، ضخامت ابرها، غلظت آلاینده‌ها و عرض جغرافیایی است. (Chen et al, 2006; Almorox et al, 2004) نشان دادند که ضرایب مدل آنگستروم-پرسکات تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و ارتفاع هستند. همچنین Zhao et al (2013) نشان دادند که تغییر در ضرایب

تابش در دسترس نیست دست یافت.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه از داده‌های آلودگی هوا برای اصلاح ضرایب معادله رگرسیونی آنگستروم- پرسکات استفاده شد. بر اساس داده‌های ساعات آفتابی روزانه و داده‌های شاخص آلودگی هوای روزانه در دوره آماری سه‌ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۶) در ایستگاه هواشناسی کرج، مدل‌های خطی، نمایی و لگاریتمی استفاده شدند و نتایج حاصل از مدل‌های اصلاحی با معادله کلی آنگستروم- پرسکات مقایسه شد.

نتایج نشان داد که اصلاح مدل‌ها بر اساس شاخص کیفیت هوا باعث بهبود نسبی عملکرد مدل نسبت به فرم کلی رابطه آنگستروم- پرسکات در برآورد تابش خورشیدی روزانه می‌شود. همچنین از بین مدل‌های اصلاحی (خطی، نمایی و لگاریتمی) مدل لگاریتمی با کمترین مقادیر شاخص‌های آماری خطا دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطی و نمایی در برآورد تابش خورشیدی روزانه می‌باشند.

مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج تحقیقات محققان مختلف از جمله Zhao et al و Vakili et al (2015) که نتیجه

گرفتند آلاینده‌های موجود در جو تابش رسیده به سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تطابق داده شد. Zhao et al (2013) از داده‌های روزانه کیفیت هوا برای اصلاح ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات در مناطق مختلف کشور چین استفاده کردند. نتایج نشان داد مقدار آماره‌های خطا در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است به‌عنوان مثال در ایستگاه لانژو که آلوده‌ترین منطقه در چین است آماره NSE بین ۰/۴۹۹-۰/۵۰۵ تغییر می‌کند که بیشترین مقدار آن مربوط به مدل‌های لگاریتمی است.

همچنین پس از محاسبه ضرایب رگرسیونی مدل‌ها در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی با توجه به ضریب منفی مربوط به داده‌های آلودگی هوا نتیجه گرفتند که آلاینده‌های موجود در جو باعث کاهش تابش رسیده به سطح زمین می‌شوند. در نهایت ضرایب رگرسیونی هریک از مدل‌ها محاسبه شد و نتایج نشان داد که با توجه به ضریب منفی شاخص API آلاینده‌های موجود در جو باعث کاهش تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین می‌شوند. نتایج حاصل از این مطالعه از نظر تأیید تأثیر منفی آلاینده‌های جوی بر میزان تابش رسیده از خورشید به زمین با نتایج تحقیق Zhao et al. (2013) تشابه دارد.

### REFERENCES

- Aghashariatmadary, Z. (2011). Evaluation of model for estimating total solar radiation at horizontal surfaces based on meteorological data, with emphasis on the performance of the angstrom model over iran. Ph. D. dissertation, University of Tehran. College of Agriculture and Natural Resources. (In Farsi).
- Almorox, J; Hontoria, C. (2004). Global sol radiation estimation using sunshine duration in spain. *Energy Convers Manage*; 45:1529-35.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *QJR Meteorol Soc*; 50:121-5.
- Badescu, V. (2008). Modeling solar radiation at the earth surface. Verlag Berlin Heidelberg. Springer.
- BIPM (1995), Guide to the expression of uncertainty in Measurement. ISBN92-67-10188-9, international bureau of weights and measures (BIPM), International standards organization.
- Chen, R; Lu, S; Kang, E; Yang, J; Ji, X. (2006). Estimating daily global radiation using two types of revised models in china. *Energy covers Manage*. 47:865-75.
- Crandall, K. C., Seabloom, R. W. (1970). Engineering fundamentals in measurement, Probability, Statistics, and Dimensions. McGrawhill.
- Jin, Z; Wu, Y; Yan, G. (2005). General for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. *Energy covers Manage*. 46:257-68.
- Kamali, Go-A; Moradi, I. (2004). Solar radiation (Fundamentals and applications in agriculture and renewable energy. *Meteorological Research Institute*. (In Farsi).
- Katiyar, Ak; Pandey, Ck. (2010). Simple correlation for estimating the global solar radiation on horizontal surfaces in India. *Energy covers Manage*. 35:5043-8.
- Khalili and Rezai Sadr. (1997). Estimation of solar radiation in iran, based on climate data. *Journal of Geographical Research* 84: 15-35. (In Farsi).
- Moradi, I. (2009). Quality Control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*. 34: 1-6. (In Farsi).
- Muneer, T., Younes, S., Munawwar, S. (2007). Discourses on solar radiation modeling. *Renew Sustain Energy Rev*. 11(4), 551-602.
- Muneer, T; Gul, MS. (2000). Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. *Energy Convers Manage*; 41:461-82.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual Models, Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282-290.
- Roodari, A; Zand-Parsa, Sh. (2013). Prediction of hourly intercepted solar radiation of wheat. *Journal of Agricultural Meteorology*. Vol. 1, No. 2, p. 1-10. (In Farsi).
- Tehran University of Sciences Institute for Environmental Research Air Pollution Research Center (APRC). (2011). A guide to calculation, determination and announcement of air quality



- index. Ministry of Health and Medical Education. (In Farsi).
- USEPA. (1998). Guideline for Reporting of Daily Air Quality – Pollutant Standards Index - (PSI). Environmental Protection Agency. Washington, DC.
- Vakili, M; Sabbagh-Yazdi, S-R; Kalhor, K; Khosrojerdi, S. (2015). Using artificial neural networks for prediction of global solar radiation in Tehran Considering particulate matter air pollution. *Energy procedia*. 74:1205-1212.
- Wang, Y; Zhao, N; Liu, C; Wang, Q. (2012). The magnitude of the effect of air pollution on sunshine hours in China. *J Geophys*; 117:D00V14.
- Yao, W; Zhang, Ch.; Wang, X; Shang, J; Zhu, Y; Zhang, S. (2017). The research of new daily solar radiation models modified by air quality index (AQI) in the region with heavy fog and haze. *Energy conversion and management*. 140-150.
- Yorukoglu, M., Celik, A. N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Convers Manage*. 47(20), 2441–2450.
- Zhao, N; Zeng, X; Han, Sh. (2013). Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China. *Energy conversion and Management*. 846-851.