

Prediction of UV Index (UVI) using TUV model over Iran

Rahnama, M.¹  | Sehat Kashani, S.²  | Mohammadi, A.³  | Pahlavan, R.⁴ 

1. **Corresponding Author**, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: m-rahnama@irimo.ir

2. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: savizsehat@yahoo.com

3. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: mohamadi.atefeh@yahoo.com

4. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: pahlavan1977@yahoo.com

(Received: 8 June 2022, Revised: 15 Oct 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 14 June 2023)

Summary

Ultraviolet radiation is defined as electromagnetic radiation with wavelengths in the range of 200-400 nm and is divided into three different bands. UVC is related to the wavelength from 200 to 280 nm, while UVB is related to the wavelength ranging from 280 to 315 nm and UVA is related to the wavelength from 315 nm to the visible level (400 nm). Ultraviolet radiation has beneficial effects such as making vitamin D and disinfecting effects. On the other hand, it causes harm such as burns and skin cancer, and damage to the eyes and immune system. Predicting the amount of UV radiation based on the UV index can be of great help to people's health. In this study, the tropospheric ultraviolet-visible (TUV) model was used to predict the UVI index. This model requires ozone, whiteness, and Aerosol Optical Depth (AOD) to forecast UVI. WACCM model data was used for ozone and whiteness column values from the ozone data of the GFS and AOD global forecasting systems. 612 case studies in the whole year of 2020 were selected from each of the 12 months of the year from different parts of the country. GFS, WACCM, and OMI data were extracted for the mentioned dates and interpolated at the desired points. Because OMI data is available locally at noon everywhere, case studies have been selected for noon. Then the interpolated values along with the length, width, and height of the points were given as input to the TUV model, and the UVI value was predicted. Due to the lack of access to the actual value of UVI in the country, OMI data was assumed as observational data and used to compare with the predicted value. Conventional statistical measures ME, MAE, RMSE, and Pearson correlation coefficient were used to validate the prediction value with observational data. The results showed that in January, February, April, November, and December, which are the coldest months of the year and the day length is shorter and the sun is less intense, so the error rate is lower than in other months (warm months of the year). However, in general, the forecast is very accurate. So that in all selected study cases, the values of ME, MAE, RMSE, and R are 0.16, 0.85, 1.13, and 0.93, respectively, which indicates the high accuracy of the forecast. The results also showed that the forecast error has a linear relationship with the AOD value. Thus, the higher the AOD value, the more negative the forecast error and underestimated forecast value.

In the warmer months of the year, the length of the day is longer and the intensity of the sun's radiation is higher, resulting in more errors. The amount of error is also related to the amount of light depth of the particles; the greater the AOD, the greater the error. The correlation coefficient diagram also showed that there is a high correlation between the forecast and observation values. This research is the first research in the field of forecasting the UV index in the country and has had satisfactory results.

Keywords: TUV model, UV index, GFS, WACCM, OMI spectrometer, AOD.

پیش‌بینی شاخص فرابنفش (UVI) با استفاده از مدل TUV روی ایران

مه‌دی رهنما^۱ | ساویز صحت کاشانی^۲ | عاطفه محمدی^۳ | راضیه پهلوان^۴

۱. نویسنده مسئول، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: m-rahnama@irimo.ir

۲. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: savizsehat@yahoo.com

۳. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: mohamadi.atefeh@yahoo.com

۴. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: pahlavan1977@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

چکیده

در این پژوهش از مدل فرابنفش قابل مشاهده وردسپهری TUV (Tropospheric Ultraviolet-Visible) برای پیش‌بینی شاخص پرتو فرابنفش استفاده شد. این مدل برای پیش‌بینی OMI (Ozone Monitoring Instrument) به داده‌های ازن، سپیدایی و عمق نوری ذرات معلق نیاز دارد. برای مقادیر ستون ازن و سپیدایی از داده‌های ازن سامانه پیش‌بینی جهانی GFS (Global Forecast System) و AOD (Aerosol Optical Depth) از داده‌های مدل WACCM (Whole Atmospheric Community Climate Model) استفاده شد. ۶۱۲ مورد مطالعاتی در کل سال ۲۰۲۰ از هر یک از ۱۲ ماه سال از نقاط مختلف کشور انتخاب شد. داده‌های GFS، WACCM و OMI برای تاریخ‌های ذکر شده استخراج و در نقاط مورد نظر درون‌یابی شدند. سپس مقادیر درون‌یابی شده به همراه طول، عرض و ارتفاع نقاط به‌عنوان ورودی به مدل TUV داده شدند و مقدار UVI (Ultraviolet Index) پیش‌بینی شد. به دلیل عدم دسترسی به مقدار واقعی UVI در کشور، داده OMI به‌عنوان داده مشاهداتی برای مقایسه با مقادیر پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. از سنج‌های متداول آماری (RMSE (Root Mean Squared Error)، MAE (Mean Absolute Error)، ME (Mean Error) و ضریب همبستگی پیرسون برای درستی‌سنجی مقدار پیش‌بینی با داده مشاهداتی استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار خطا با مقدار عمق نوری ذرات رابطه دارد؛ هر چه عمق نوری ذرات معلق بیشتر باشد، خطا نیز بیشتر است. نمودار ضریب همبستگی نیز نشان داد که بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده همبستگی بالایی وجود دارد. این تحقیق اولین پژوهش در زمینه پیش‌بینی شاخص پرتو فرابنفش در کشور می‌باشد که نتایج رضایت‌بخشی به همراه داشته است.

واژه‌های کلیدی: مدل TUV، شاخص پرتو فرابنفش، GFS، WACCM، سنجنده OMI، AOD.

۱. مقدمه

می‌شود، یک معیار متداول برای تعیین قدرت تابش خورشید در ایجاد آفتاب سوختگی است. شاخص پرتو فرابنفش (UVI) یک پارامتر بدون بعد است که می‌تواند در مکان‌های با ارتفاع زیاد مناطق گرمسیری حداکثر به ۲۰ برسد (بوچارت، ۲۰۱۴).

تابش فرابنفش به‌عنوان تابش الکترومغناطیسی با طول موج در محدوده ۲۰۰-۴۰۰ نانومتر تعریف می‌شود و به سه باند مختلف تقسیم می‌شود. UVC مربوط به طول موج از ۲۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر، UVB مربوط به طول موج در محدوده ۲۸۰ تا ۳۱۵ نانومتر و UVA مربوط به طول موج از ۳۱۵ تا ۴۰۰ نانومتر است. شاخص فرابنفش (UVI) یک استاندارد بین‌المللی برای

پرتو فرابنفش UV (Ultra Violet) منبع اصلی ویتامین D برای انسان است. از طرفی قرار گرفتن بیش از حد در معرض پرتو فرابنفش روی انسان، حیوانات و گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد (هادر و همکاران، ۲۰۰۷؛ هلتنون و همکاران، ۱۹۹۵؛ کرزیسین و همکاران، ۲۰۲۰). تأثیر پرتو فرابنفش بر پوست انسان با وزن دهی به طیف خورشیدی مورد بحث قرار گرفت (کینیسین و همکاران، ۲۰۰۷). فرمول تحلیلی ارائه شده توسط مک کینلی و دیفی (۱۹۸۷) به روز شده و به‌عنوان استاندارد توسط کمیسیون بین‌المللی ایکلیراز (Commission Internationale de l'Eclairage) تصویب شد. انتگرال (روی طول موج) تابش طیفی خورشیدی که با روش CIE وزن‌دهی

گردش برور دابسون (Brewer Dobson) BDC در قرن آینده تسریع می‌شود (اریکسون و همکاران، ۲۰۱۵) که منجر به کاهش سطح ازن در مناطق گرمسیری و افزایش آن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر (هگلین و شپرد، ۲۰۰۹) و تغییر در میزان پرتو UV رسیده به سطح می‌شود. درحالی‌که اجرای شیوه‌نامه مونترال میزان انتشار گازهای کلر و برم تخریب‌کننده ازن را به شدت کاهش می‌دهد، مطالعات اخیر در مورد تکامل ازن در شرایط تغییر اقلیم (اریکسون و همکاران، ۲۰۱۵) سؤالاتی را در مورد مقدار UV در آینده مطرح می‌کند (دیفی، ۱۹۹۱؛ هگلین و شپرد، ۲۰۰۹؛ لامی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لوکاس و همکاران، ۲۰۰۶).

مطالعات مدل شیمی - اقلیم متعدد (Numerous CCM chemistry-climate model)، افزایش گردش برور دابسون را به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، نشان داده است (هگلین و شپرد، ۲۰۰۹). گردش BDC توسط لوکاس و همکاران (۲۰۰۶) و اسمیت و کولن (۱۹۹۵) برای توضیح توزیع جغرافیایی ازن و میزان بخار آب در پوشش سپهر پیشنهاد شده است. BDC مربوط به جابجایی نصف‌النهاری در پوشش سپهر، با صعود هوا در مناطق گرمسیری و فرونشست در عرض‌های جغرافیایی قطبی است. سازوکاری که این گردش را هدایت می‌کند، اتلاف راسبی و امواج گرانشی است (مدرونیچ و فلوک، ۱۹۹۷)؛ بنابراین، قدرت BDC بستگی به انتشار و شکست امواج سیاره‌ای دارد. علاوه بر این، از دست دادن سریع کلروفلوئوروکربن‌ها (CFC Chlorofluorocarbons) زمان بازسازی ازن را کاهش می‌دهد (زپ و همکاران، ۲۰۰۷). تقویت BDC و بازیابی سریع ازن، توزیع ازن را در پوشش سپهر تغییر داده و بر پرتو فرابنفش در سطح تأثیر می‌گذارد.

هگلین و شپرد (۲۰۰۹) در شرایط تغییر اقلیم و با استفاده از شبیه‌سازی با CCMI (Chemistry Climate Model Initiative) پوشش سپهر، ۳/۸٪ افزایش UVI را در مناطق گرمسیری در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۹۰ پیش‌بینی نمودند.

اندازه‌گیری قدرت تابش پرتو فرابنفش در ایجاد آفتاب سوختگی در مکان و زمان خاص است. بر پایه استاندارد شاخص جهانی تابش فرابنفش خورشیدی، اگر این شاخص روی اعداد ۱ و ۲ باشد، بی‌خطر است. شاخص ۳، ۴ و ۵ نشان‌دهنده کم‌خطر بودن آن و شاخص ۶ و ۷ نشان‌دهنده خطر زیاد است. شاخص ۸، ۹ و ۱۰ بیانگر خطر بسیار زیاد و شاخص بیش از ۱۱ نشان‌دهنده خطر بسیار شدید است (سازمان جهانی بهداشت (WHO)، سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، برنامه زیست محیطی سازمان ملل (UNEP) و کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یون ساز (ICNIRP، ۲۰۰۲). بر همین اساس نیاز است تا اقدام‌های حفاظتی مختلفی برای جلوگیری از آسیب دیدن در برابر پرتو فرابنفش خورشید انجام داد. پیش‌بینی پرتو فرابنفش توسط مدل‌های عددی انجام می‌شود و تأثیر ارتفاع و فاصله خورشید، ازن پوشش سپهری، شرایط ابر، آلاینده‌های هوا، سپیدایی سطحی و ارتفاع زمین را در بر می‌گیرد که همه آن‌ها بر میزان تابش پرتو فرابنفش در سطح تأثیر می‌گذارند. پرتو فرابنفش بر زیست‌کره نیز تأثیر می‌گذارد (لامی و همکاران، ۲۰۱۷)؛ از جمله اکوسیستم‌های آبی که نقش مهمی در چرخه‌های بیوشیمیایی ایفا می‌کنند (دابسن، ۱۹۵۶). بهره‌وری فیتوپلانکتون‌ها به شدت به شدت تحت تأثیر تابش پرتو فرابنفش قرار دارد (یانگ، ۲۰۰۶) که می‌تواند بازخورد مثبت یا منفی بر اقلیم را به دنبال داشته باشد (اسمیت و کولن، ۱۹۹۵).

رستم پور و همکاران ۱۳۹۱ به بررسی میزان شدت پرتوهای فرابنفش خورشیدی نوع A در شهر همدان به صورت ماهانه و به مدت یک سال پرداختند. آن‌ها دریافتند که بیشترین و کمترین میانگین شدت پرتوهای فرابنفش نوع A در طول یک سال به ترتیب مربوط به ماه‌های شهریور و آذر بود. همچنین مقدار کل تابش UVA در طول یک سال نیز برابر با 19.74 ± 1.56 وات بر مترمربع بود.

شبیه‌سازی‌های مدل گردش جهانی نشان می‌دهد که

پروژه CCMI به دست آوردند. از آنجایی که آنگاز آنجایی که ابرها یکی از بزرگ‌ترین عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی‌های اقلیمی هستند، آن‌ها فقط UVI آسمان صاف را شبیه‌سازی کردند. با مقایسه مقادیر UVI مدل‌سازی‌شده با مقادیر UVI که از داده‌های ماهواره‌ای (محصول OMUVBd از OMI-Aura) و اندازه‌گیری‌های زمینی، مشاهده شد که بسته به منطقه، تفاوت‌های نسبی بین UVI به دست آمده از محاسبات CCMI/TUV و اندازه‌گیری‌های زمینی (بین ۵/۹٪ و ۱۰/۶٪) وجود داشت.

روشی برای پیش‌بینی UVI برای شرایط گردو خاک خاورمیانه برای اولین بار توسط روشن و همکاران (۲۰۲۰) ایجاد شد که از یک مدل سه بعدی منطقه‌ای میان مقیاس شیمی-هواشناسی استفاده نمودند. آن‌ها از مدل WRF-Chem برای پیش‌بینی مقدار تابش افقی جهانی (Global Horizontal Irradiance) استفاده نمودند و از طریق معادلات مربوط، مقدار UVI را در شهر دوحه قطر به دست آوردند. آن‌ها از طرح‌واره هواویز GOCART (Georgia Institute of Technology-Goddard) Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Regional Transport) و طرح‌واره شیمی RACM (Atmospheric Chemistry Mechanism) در مدل استفاده نمودند. سپس مقادیر UVI به دست آمده را با مقادیر سنجنده مشاهداتی از OMI مقایسه نمودند. آن‌ها توانایی پیش‌بینی مدل را برای روزهای آسمان صاف و همچنین در طول زمان نفوذ طوفان‌های گردوغبار در دوحه، قطر ارزیابی کردند. عملکرد پیش‌بینی UVI مدل با میانگین مطلق خطای کمتر از ۶٪ و ضریب همبستگی ۰/۹۳ قابل قبول بود. مطابق با مشاهدات، مدل پیش‌بینی کرد که شاخص UV در ظهر محلی می‌تواند از ۱۰ تا ۱۱ در روزهای آسمان صاف به حدود ۶ تا ۷ در طول شرایط همراه با گردوغبار معمولی در شبه‌جزیره عربستان کاهش یابد که مشابه نتایج در حالت پوشش ابری گسترده است.

کرزیسین و همکاران (۲۰۲۰) روشی برای بهبود پیش‌بینی شاخص پرتو فرابنفش (UVI) و مدت زمان قرار گرفتن در

آن‌ها در نیمکره شمالی ۹ درصد کاهش UVI را به دلیل افزایش انتقال ازن پیش‌بینی کردند. بایس و همکاران (۲۰۱۱)، تغییرات UVI را بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۱۰۰ محاسبه کردند و از افزایش ۰/۰۹٪ در مناطق گرمسیری، کاهش ۷/۵٪ و ۹/۸٪ در عرض‌های بالای جغرافیایی شمال و جنوب و کاهش ۴/۱٪ در عرض جغرافیایی میانی خبر دادند.

لامی و همکاران (۲۰۱۷) با جفت کردن مدل اقلیمی شیمی (CCMI) با مدل فرابنفش قابل مشاهده وردسپهری TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible) model (مدرونیچ و فلوک، ۱۹۹۷)، مقدار UVI را برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۱۰۰ پیش‌بینی کردند و به بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقدار UVI پرداختند. شبیه‌سازی‌های این مطالعه نشان دادند که میانگین سالانه UVI، احتمالاً در ربع اول قرن بیست و یکم در عرض‌های جغرافیایی میانی و بالای شمالی و ۲۰ تا ۳۰ سال بعد در عرض‌های جغرافیایی میانی و بالای جنوبی به مقادیر سال ۱۹۸۰ خود باز خواهد گشت. پس از رسیدن به این سطح، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که UVI تا سال ۲۱۰۰ به‌ویژه در نیمکره شمالی به کاهش ادامه خواهد داد.

پادراسکانین و همکاران (۲۰۱۸) نیز با استفاده از یک مدل تجربی UVI را در منطقه وجودی در شمال صربستان در روزهای با آسمان صاف در تمام فصول پیش‌بینی کردند. اندازه‌گیری‌های ازن زمینی برای این مکان، زوایای اوج خورشیدی و فاصله از خورشید به‌عنوان داده‌های ورودی برای مدل استفاده شد. تفاوت بین داده‌های مدل‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده به‌اندازه کافی کم بود. به‌طوری‌که به‌طوری‌که اختلاف مربع میانگین ریشه‌ها کمتر از ۰/۸ در تابستان و ۰/۳ در زمستان بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که این مدل تجربی را می‌توان برای پیش‌بینی UVI برای شرایط آسمان صاف در آن منطقه استفاده کرد.

لامی و همکاران (۲۰۱۹) مقادیر UVI را در ظهر خورشیدی با استفاده از مدل TUV و داده‌های ازن، دما و میدان‌های هواویز حاصل از شبیه‌سازی‌های اقلیمی فاز اول

ترتیب در ایستگاه‌های فرانسه و ایتالیا ارزیابی کردند. آتون و همکاران (۲۰۱۰) یک مطالعه اعتبارسنجی گسترده از اندازه‌گیری‌های تابش UV در ایستگاه‌های واقع در جنوب اسپانیا انجام داد. بروگنیز و همکاران (۲۰۱۶) محصولات ماهواره‌ای UVI از OMI را در سه ایستگاه زمینی در فرانسه که از نظر توپوگرافی و محیطی بسیار متفاوت هستند، اعتبارسنجی کردند. همه آن‌ها به این نتیجه رسیدند که داده‌های OMI دقت بالایی دارند و کاملاً قابل اعتماد هستند. تایپ و همکاران (۲۰۲۱)، به اعتبارسنجی داده‌های شاخص فرابنفش به‌دست‌آمده از سنجنده OMI برای شهر پونو (puno) پرداختند. نتایج اعتبارسنجی آن‌ها همبستگی قوی (۰/۹۳۷) بین داده‌های OMI و اندازه‌گیری‌های زمینی نشان داد. با توجه به این مطالعات، می‌توان از داده OMI به‌عنوان داده مرجع برای درستی سنجی پیش‌بینی UVI استفاده کرد.

در بخش ۲، داده‌ها و مدل مورد استفاده و روش کار معرفی می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده در بخش ۳ بررسی می‌شوند و در انتها نتیجه‌گیری کلی در بخش ۴ آورده خواهد شد.

۲. داده‌ها و روش کار

در این بخش به معرفی مدل و داده‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی UVI پرداخته می‌شود.

۲-۱. مدل TUV

برای پیش‌بینی پرتو فرابنفش (UVI) از مدل فرابنفش قابل مشاهده وردسپهری (TUV) استفاده شده است. مدل TUV (مدرونیچ، ۱۹۹۷) مورد استفاده گسترده جامعه علمی برای کاربردهایی از جمله فتوشیمی جو، رادیومتری خورشیدی و فتوبیولوژی محیطی قرار می‌گیرد. این مدل می‌تواند تشعشعات طیفی، تابش و شار آکتینیک (Actinic Flux) را در طول موج ۱۲۰-۷۵۰ نانومتر با تفکیک ۰/۱ نانومتر محاسبه نماید. همچنین انتگرال‌های طیفی وزنی شامل نوارهای طول موج قابل مشاهده (UVA، UVB،

معرض آفتاب برای به دست آوردن حداقل دوز اریتمال پیشنهاد کردند. آن‌ها یک سامانه همادی پیش‌بینی با مدل WRF متشکل از ۱۰ عضو (که در شرایط اولیه و مرزی متفاوت هستند) برای جستجوی بهترین عضو همادی برای پیش‌بینی ابرناکی تشکیل دادند. آن‌ها درستی سنجی پیش‌بینی UVI با استفاده از مدل TUV را در ایستگاه‌های Belsk (۲۰/۸ شرقی، ۵۱/۸ شمالی) و Racibórz (۱۸/۲ شرقی، ۵۰/۱ شمالی) انجام دادند که به ترتیب مکان‌های روستایی و شهری در لهستان هستند. آن‌ها نشان دادند که برای هر دو ایستگاه، ریشه میانگین درصد مربعات خطا برای مدت زمان قرار گرفتن در معرض خورشید از حدود ۳۰٪ به حدود ۱۵٪ و میانگین درصد خطای مطلق از حدود ۲۰-۲۵٪ به حدود ۱۰٪ تغییر می‌کند.

در این پژوهش، از مدل فرابنفش قابل مشاهده وردسپهری (TUV) برای پیش‌بینی UVI در آسمان صاف استفاده شده است. مدل TUV برای پیش‌بینی UVI به داده‌های ازن، سپیدایی و عمق نوری ذرات معلق (AOD Aerosol Optical Depth) نیاز دارد. AOD اندازه ذرات معلق در هوا (به‌عنوان مثال، مه شهری، ذرات دود، گردوغبار صحرا، نمک دریا) است که در یک ستون هوا از سطح زمین تا بالای جو توزیع می‌شود. برای داده‌های ستون ازن و سپیدایی از سامانه پیش‌بینی جهانی (Global Forecasting System) WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) استفاده شده است. ۶۱۲ مورد مطالعاتی در کل سال ۲۰۲۰ از هر یک از ۱۲ ماه سال از نقاط مختلف کشور برای ارزیابی درستی سنجی پیش‌بینی انتخاب شد. به دلیل در دسترس نبودن داده مشاهداتی واقعی UVI، از داده‌های سنجنده OMI برای ارزیابی پیش‌بینی استفاده شده است. تانسکانن و همکاران (۲۰۰۷) برآوردهای روزانه OMI را در ۱۷ ایستگاه که عمدتاً در شمال اروپا، یونان، آمریکای شمالی، نیوزیلند و جنوب آرژانتین توزیع شده‌اند، ارزیابی کردند. بوچارد و همکاران (۲۰۰۸) کل ستون ازن و مقادیر پرتو UV را به

مقدار $S(\lambda)$ در محدوده طول موج به ترتیب ۳۱۵-۴۰۰ نانومتر و ۲۸۰-۳۱۵ نانومتر برابر با یک و در خارج از این محدوده صفر است. برای پرتوهای اریتمی (Erythmal)، $S(\lambda)$ تابع حساسیت اریتمی (طیف عمل) CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) است که توسط مک کینلی و دیفی (۱۹۸۷) ارائه شده است و به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$\log_{10} S(\lambda) = \begin{cases} 0.0 & (250 - 298 \text{ nm}) \\ 0.094(298 - \lambda) & (298 - 328 \text{ nm}) \\ 0.015(139 - \lambda) & (328 - 400 \text{ nm}) \end{cases} \quad (2)$$

از این طیف عمل برای محاسبه شاخص UV به صورت ضربدر ۴۰ (WMO, ۱۹۹۷) محاسبه می شود. علاقه مندان برای کسب توضیحات بیشتر می توانند به (مدرونیچ و فلاک، ۱۹۹۷) مراجعه کنند.

۲-۲. داده GFS

برای مقادیر ستون ازن و سپیدایی از داده های GFS استفاده شده است. مدل GFS یک سامانه پیش بینی وضع هوا است که توسط مراکز ملی پیش بینی محیطی NCEP (National Centers for Environmental Prediction) تولید شده است. ده ها متغیر جوی از دما، باد و بارش گرفته تا رطوبت خاک و غلظت ازن جو از طریق این مجموعه داده در دسترس هستند. کره زمین با استفاده از GFS با تفکیک افقی ۲۸ کیلومتر بین نقاط شبکه پوشانده شده است که توسط پیش بینی های عملیاتی که وضع هوا را تا ۱۶ روز آینده پیش بینی می کنند، مورد استفاده قرار می گیرد. برای پیش بینی بین یک هفته تا دو هفته، تفکیک افقی بین نقاط شبکه به ۷۰ کیلومتر کاهش می یابد. GFS با هسته دینامیکی مکعب-کره حجم محدود (Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core) یا به اختصار به اختصار (FV3) و سامانه داده گواری درون یابی آماری نقاط شبکه (GSI Grid-Point Statistical Interpolation) ساخته شده است. GFS عملیاتی فعلی در

(UVC)، ضرایب فوتولیز (Photolysis Coefficients)، ضرایب جداسازی نوری (Photo Dissociation) (مقادیر J) و تشعشعات فعال زیستی (شاخص UV، آسیب DNA، تولید ویتامین D و غیره) را محاسبه نماید. انتشار تابش از طریق لایه های مختلف جوی (پوسته های کروی متحدالمرکز برای پرتو مستقیم خورشید، سطح موازی برای تابش پراکنده) با استفاده از تقریب سریع دو جریان یا یک طرح دستورات گسسته چند جریان محاسبه می شود. مدل TUV دارای ویژگی های مشارکت های جداگانه مستقیم و پراکنده، بارگیری آسان توابع وزنی، طول موج و شبکه های ارتفاعی متغیر، جذب ازن اکسیژن و دی اکسید گوگرد، پراکندگی توسط هوا، ابرها و ذرات معلق و قابلیت تغییر در طرحواره های انتقال تابشی است (مدرونیچ و فلاک، ۱۹۹۷).

مدل TUV شامل چندین کد به زبان فرترن است که هر یک شامل چندین زیررویه (Subroutine) هستند. این مدل از طریق وبسایت <https://www2.acom.ucar.edu/modeling/tuv-download> قابل دسترس است و در سیستم عامل های لینوکس و ویندوز قابل اجرا است. برای اجرای مدل TUV ابتدا نیاز است تا فایل ورودی طبق قالب پیشنهادی آماده شود. فایل ورودی شامل تاریخ مورد نظر (سال، ماه، روز و ساعت)، طول و عرض جغرافیایی، ستون ازن، سپیدایی، ابرناکی و AOD است. پس از اجرای فایل اجرایی مدل TUV، خروجی مورد نظر تولید می شود.

پرتو UV (Wm^{-2}) در مدل TUV (مدرونیچ و فلاک، ۱۹۹۷) با انتگرال گیری روی طول موج λ (nm) تابش طیفی $E(\lambda)$ ($Wm^{-2}nm^{-1}$) که توسط توابع طیفی مناسب $S(\lambda)$ (بدون بعد) وزن دهی شده است، به صورت فرمول زیر محاسبه می شود:

$$Irradiance = \int S(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$E(\lambda)$ تابعی از زاویه اوج خورشیدی، ارتفاع سطح و همچنین پروفایل های عمق نوری جاذب ها و پراکنده های جوی (مانند ازن و ابرها) است. برای UVA و UVB،

پوشش‌ایست متغیر است. در میان سپهر و گرم‌سپهر تفکیک عمودی تقریباً ۳ کیلومتر است.

۲-۴. داده OMI

در این مطالعه از داده‌های UVI محصول OMUVBd (هاویلا و همکاران، ۲۰۱۳) سنجنده پایش ازن (OMI) برای مقایسه با مقادیر پیش‌بینی استفاده شده است. OMI یک رادیومتر طیفی نزدیک به UV/Visible است که روی ماهواره Aura مربوط به سامانه پایش زمین ناسا قرار گرفته است. Aura در فاصله ۱۵ دقیقه پشت سر Aqua حرکت می‌کند که هر دو در یک الگوی قطبی خورشیدی همزمان، به دور زمین می‌چرخند. Aura در ۱۵ ژوئیه ۲۰۰۴ راه‌اندازی شد و OMI از ۹ اوت ۲۰۰۴ داده‌ها را جمع‌آوری کرده است.

محصولات داده OMI در چهار سطح پردازش در دسترس هستند: سطح ۰، سطح B1، سطح ۲ و سطح ۳. محصولات سطح ۰، سطح B1 و سطح ۲ حاوی داده‌های نوار مداری هستند، درحالی‌که محصولات سطح ۳ حاوی داده‌های جهانی هستند که در طول زمان (روزانه یا ماهانه) یا در فضا برای شبکه‌های با زاویه مساوی کوچک (طول جغرافیایی × طول جغرافیایی) که کل کره زمین را پوشش می‌دهند، ترکیب می‌شوند. محصول OMUVBd یک محصول سطح ۳ از سنجنده OMI است. محصولات جهانی روزانه سطح ۳ سنجنده OMI با استفاده از داده‌های روی شبکه‌های کوچک با تفکیک‌های (۰/۲۵) درجه × (۰/۲۵) درجه، (۰/۵) درجه × (۰/۵) درجه یا (۱) درجه × (۱) درجه تولید می‌شوند که کل کره زمین را پوشش می‌دهند. برای اطلاعات کلی در مورد محصولات داده OMI، به (احمد و همکاران، ۲۰۰۳) مراجعه کنید.

۵-۲. روش کار

همان‌طور که در مرور پژوهش‌های قبل آورده شد، شاخص فرابنفش به زاویه اوج خورشیدی، ارتفاع سطح،

۶۴ تراز قائم از سطح تا پوشش سپهر فوقانی و بر روی ۶ موزایک کروی-مکعبی با تفکیک افقی ۱۳ کیلومتر اجرا می‌شود. نسخه جدیدی از GFS که دارای ۱۲۷ تراز تا میان ایست (Mesopause) است به‌طور عملیاتی از ۳ فوریه ۲۰۲۱ قابل اجرا است. این شرایط اولیه چهار بار در روز برای پیش‌بینی در ساعات ۰۶، ۱۲ و ۱۸ گرینویچ در دسترس قرار می‌گیرد.

۲-۳. داده WACCM

برای مقادیر AOD از داده‌های مدل WACCM استفاده شده است. مدل WACCM یک مدل عددی جامع است که دامنه ارتفاعی از سطح زمین تا حدود ۵۰۰ کیلومتر تا ۷۰۰ کیلومتر ارتفاع را شامل می‌شود (کینیسون و همکاران، ۲۰۰۷؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷؛ مارش و همکاران، ۲۰۱۳). خروجی‌های این مدل برای ایجاد پیش‌بینی‌های منطقه‌ای توسط جامعه شیمی جو مورد استفاده قرار می‌گیرند. توسعه WACCM یک همکاری بین بخشی است که جنبه‌های خاصی از مدل‌سازی جو فوقانی (High Altitude Observatory) HAO، مدل‌سازی جو میانی Atmospheric Chemistry Observations & Modeling یا به‌اختصار (ACOM) و مدل وردسپهری CGD را با استفاده از مدل CESM (Community Earth System Model) از NCAR به‌عنوان یک چارچوب عددی مشترک یکپارچه می‌کند. اکنون مدل CESM2/WACCM بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی NASA/GMAO GEOS-5 در زمان واقعی اجرا می‌شود. WACCM یک مجموعه بزرگ از مدل CAM4 (Community Atmosphere Model version4) است و شامل همه پارامتری‌سازی‌های فیزیکی مدل CAM4 و یک هسته دینامیکی حجم محدود (گارسیا و همکاران، ۲۰۰۷) برای ردیابی فرارفت می‌باشد. تفکیک افقی ۱/۹ درجه عرض جغرافیایی در ۲/۵ درجه طول جغرافیایی است. تفکیک عمودی در پوشش سپهر پایین از ۱/۲ کیلومتر نزدیک میان‌ایست تا تقریباً ۲ کیلومتر نزدیک

انتخاب شده‌اند.

از سنج‌های متداول آماری ME، MAE، RMSE و R (ضریب همبستگی پیرسون) برای درستی‌سنجی مقدار پیش‌بینی با داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده است. اگر f_i مقدار پیش‌بینی، o_i مقدار مشاهده‌ای در نقطه i ام و n تعداد کل نقاط باشد:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - o_i| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2} \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

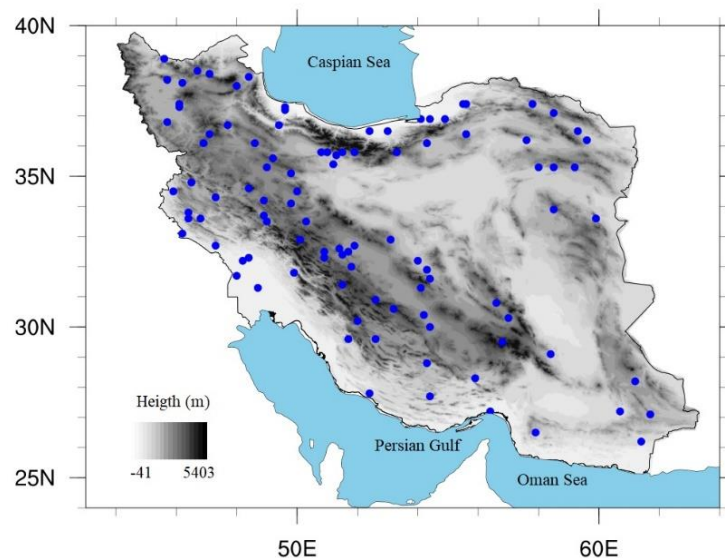
۳. بررسی نتایج درستی‌سنجی

۳-۱. رابطه بین خطای پیش‌بینی و پارامترهای مؤثر

برای بررسی این که این که این که چه پارامترهایی روی خطای پیش‌بینی UVI تأثیرگذار هستند، نمودار پراکنندگی خطای پیش‌بینی با هر یک از پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی شاخص پرتو فرابنفش در شکل ۲ ترسیم شده است. برای این منظور رابطه بین خطای پیش‌بینی و پارامترهای ستون ازن، سپیدایی، عمق نوری ذرات معلق و زاویه اوج خورشیدی بررسی شده است.

ستون ازن، سپیدایی، AOD و میزان ابرناکی جو بستگی دارد. در این پژوهش فرض شده است که آسمان صاف است؛ بنابراین با توجه به داده‌های همدیدی موجود، تاریخ‌ها و مکان‌هایی انتخاب شده‌اند که میزان پوشش ابر پایین، ابر متوسط و ابر بالا (cl و cm و ch) آن‌ها یا همگی صفر باشند یا حداکثر یکی از آن‌ها ۱ باشد. سعی بر این بوده است تا جایی که ممکن است در کل سال ۲۰۲۰ از هر یک از ۱۲ ماه سال زمان‌هایی که آسمان صاف بوده است، از نقاط مختلف کشور انتخاب شود که با این شرایط مجموعاً تعداد ۶۱۲ مورد مطالعاتی انتخاب شده است. نقاط انتخابی در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌های GFS، WACCM و OMI برای تاریخ‌های ذکر شده دانلود و به روش دوخطی (bilinear) در نقاط مورد نظر درون‌یابی شده‌اند. سپس مقادیر پیش‌بینی ستون ازن و سپیدایی از داده GFS و مقدار پیش‌بینی AOD از داده WACCM به همراه طول، عرض و ارتفاع نقاط به‌عنوان ورودی به مدل TUV داده شده‌اند و مقدار UVI پیش‌بینی شده است. به دلیل عدم دسترسی به مقدار واقعی UVI در کشور، داده OMI به‌عنوان داده مشاهده‌ای فرض شده است و برای مقایسه با مقدار پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاکه داده OMI در ظهر محلی هر نقطه موجود است، بنابراین موارد مطالعاتی برای ساعت ظهر



شکل ۱. نقاط انتخابی از کل کشور.

ماورا بنفش سطحی در هنگام وجود ذرات معلق جاذب UV مانند دود یا گردوغبار صحرا می‌شود. علاوه بر این، ذرات آلودگی لایه مرزی باعث تخمین بیش از حد تابش UV سطحی در مناطق شهری می‌شوند (تانسکانن و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، در مواقعی که مقدار AOD زیاد است، داده OMI، مقدار UV را بیش‌برآورد می‌کند و منجر به بروز ارزیابی منفی در درستی‌سنجی مقدار پیش‌بینی UVI می‌شود.

۳-۲. مقایسه پیش‌بینی UVI با داده OMI

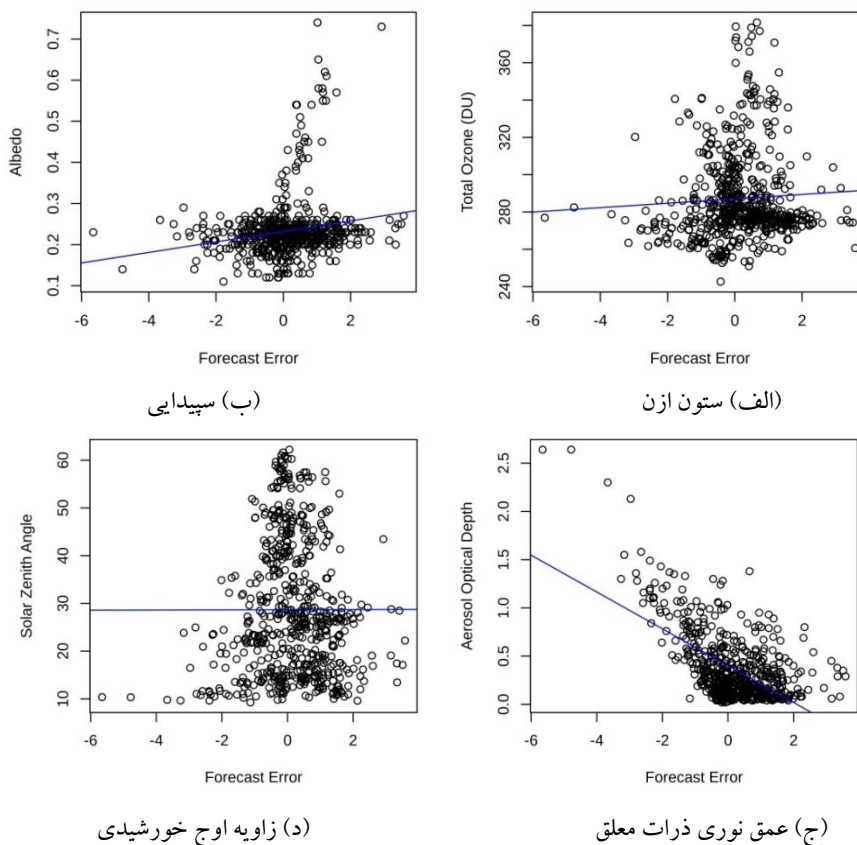
نمودار پراکندگی در ۶۱۲ مورد مطالعاتی انتخابی برای مقایسه مقدار پیش‌بینی با مقدار OMI به‌عنوان داده مشاهداتی، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نقاط پیش‌بینی UVI با مقدار مشاهده شده متناظر در اطراف خط نیمساز نمودار (خط قرمز رنگ) واقع شده‌اند و به‌خوبی با یکدیگر توافق دارند. این توافق بین مقدار پیش‌بینی و مشاهده در مقادیر کم UVI بیشتر برقرار است. در فصول گرم، مقدار UVI بیشتر از فصول سرد سال است و این خطای بیشتر در فصل گرم با نتایج پراساد و همکاران (۲۰۲۲) و اوه و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. با توجه به اینکه در فصول گرم سال، مدل‌ها قادر به ثبت تغییرات زیاد ستون ازن و اثر هواویزها نیستند (پراساد و همکاران، ۲۰۲۲)، خطای پیش‌بینی UVI در این مواقع از سال افزایش می‌یابد.

برای بررسی وجود یا عدم وجود یک رابطه خطی بین خطای پیش‌بینی (y) و هر یک از پارامترهای مذکور (x)، یک خط با رابطه $y = a + b \times x$ به هر یک از پارامترها برازش شده است که اطلاعات آن در جدول ۱ آورده شده است. همچنین خط برازش شده برای هر پارامتر به رنگ آبی در شکل ۲ ترسیم شده است. با توجه به جدول ۱ و شکل ۲ مشخص است که خطای پیش‌بینی با عمق نوری ذرات معلق یک رابطه خطی دارد؛ به این صورت که هر چه مقدار AOD بیشتر باشد، مقدار خطای پیش‌بینی نیز بیشتر و منفی است و مقدار پیش‌بینی کمتر از واقعیت برآورد شده است.

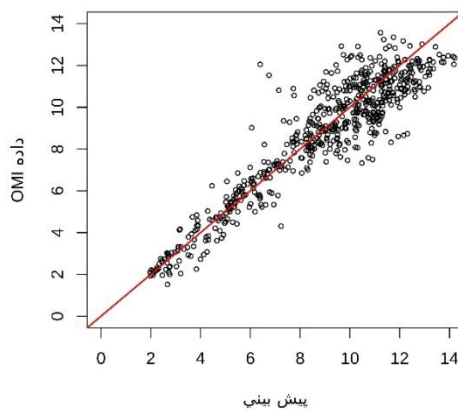
مطالعات درستی‌سنجی با داده‌های TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) نشان می‌دهد که برآورد تابش UV از سنجنده OMI به‌طور متوسط ۰-۳۰٪ بزرگ‌تر از داده‌های اندازه‌گیری زمینی است (تانسکانن و همکاران، ۲۰۰۷). ارزیابی سامانمند را می‌توان به جذب ذرات معلق در هوا از منابع طبیعی و انسانی نسبت داد. از آنجایی که محتوای دوده ذرات معلق در هوا به شدت موضعی است، این خطاها احتمالاً محلی هستند و لزوماً نشان‌دهنده خطا در برآورد منطقه‌ای UV سطح تولید شده توسط OMI نیستند. در الگوریتم تخمین UV، ضریب تضعیف از نسبت تابش‌های پراکندگی اندازه‌گیری شده و تابش خورشیدی در ۳۶۰ نانومتر با فرض اینکه ابرها و ذرات معلق در این طول موج غیرجذب هستند، مشتق می‌شود. این امر منجر به تخمین بیش از حد تابش پرتو

جدول ۱. مشخصات خط برازش شده بین خطای پیش‌بینی و پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی UVI.

پارامتر	A	b	P-value	R
ستون ازن	۲۸۷/۴	۱/۱۸	۰/۱۷	۰/۰۵
سپیدایی	۰/۲۳	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱۹
عمق نوری ذرات	۰/۴۰	-۰/۲	۰/۰۰۰۰۰	-۰/۶۰
زاویه اوج خورشیدی	۲۸/۶۷	۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۰۰



شکل ۲. رابطه بین خطای پیش‌بینی و (الف) ستون ازن، (ب) سپیدایی، (ج) عمق نوری ذرات معلق و (د) زاویه اوج خورشیدی.



شکل ۳. نمودار پراکندگی پیش‌بینی UVI و داده OMI.

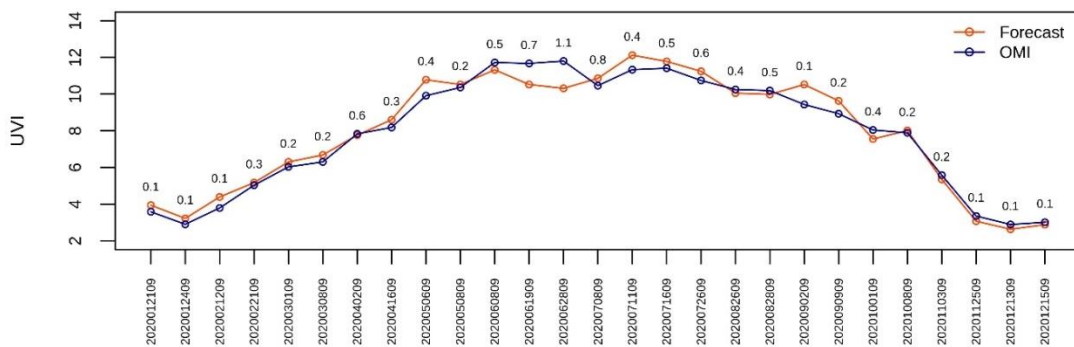
مشاهداتی بسیار نزدیک است، اما در ماه‌های گرم، اختلاف بیشتری دارند. میانگین مقدار AOD هر یک از تاریخ‌ها بالای هر نقطه نوشته شده است. در اکثر مواردی که مقدار AOD بیشتر است، پیش‌بینی و مشاهدات اختلاف بیشتری دارند. در کل، میانگین مقدار پیش‌بینی پرتو فرابنفش به میانگین مقدار آن از سنجنده OMI بسیار نزدیک است و اختلاف چندانی ندارند.

از مقدار پیش‌بینی UVI و داده OMI در تاریخ‌های انتخاب شده از کل ۱۲ ماه سال ۲۰۲۰ در ایستگاه‌های منتخب میانگین گرفته شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. در ماه‌های ۱، ۲، ۳، ۱۱ و ۱۲ میلادی که ماه‌های سرد سال هستند، مقدار شاخص پرتو فرابنفش کمتر از ماه‌های گرم سال است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در ماه‌های سرد سال مقدار پیش‌بینی به مقدار

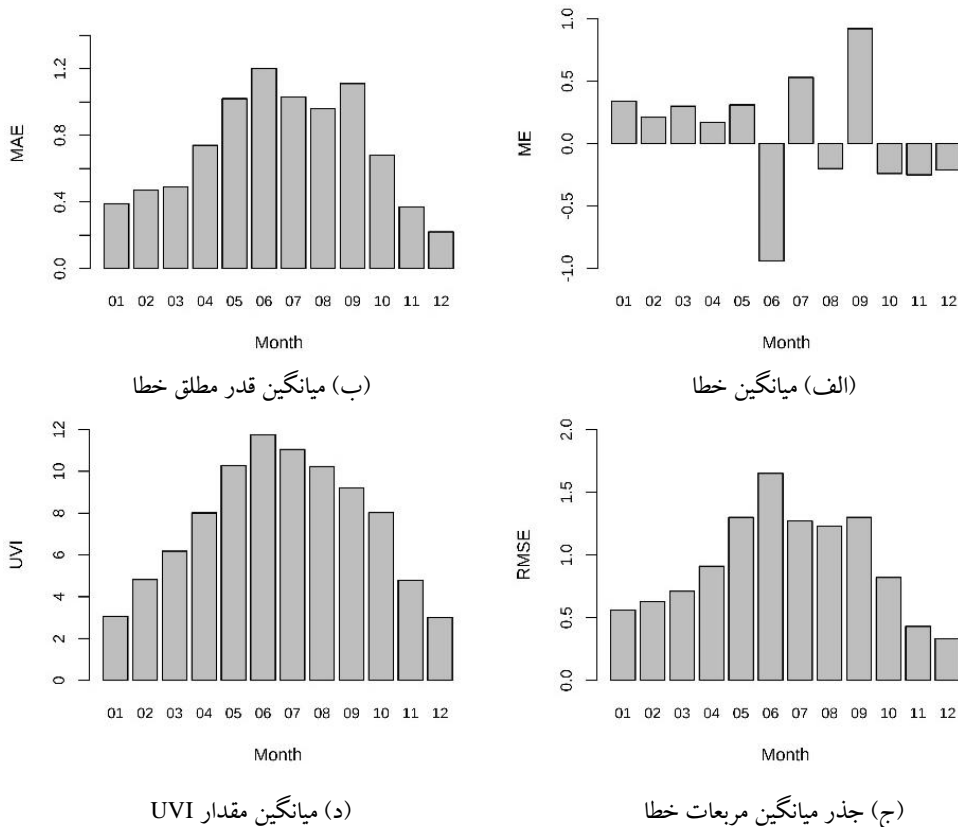
UVI کمتر از سایر ماه‌های سال است. به تبع آن مقدار خطا نیز در ماه‌های سرد سال کمتر از ماه‌های گرم است. در ماه‌های گرم سال طول روز بلندتر و شدت تابش خورشید بیشتر و در نتیجه مقدار خطا نیز بیشتر است. به‌عنوان مثال ماه ۰۶ میلادی (ماه ژوئن) که طبق شکل ۵ دارای بیشترین مقدار شاخص پرتو فرابنفش است، دارای بیشترین مقدار MAE، ME، RMSE و نسبت به سایر ماه‌های سال نیز است. در کل، مقدار خطا قابل ملاحظه نیست و نشان دهنده عملکرد خوب پیش‌بینی است.

۳-۳. خطای ماهانه

مقدار سنج‌های آماری $RMSE$ ، MAE ، ME و میانگین شاخص پرتو فرابنفش برای مقایسه مقدار پیش‌بینی UVI با استفاده از مدل TUV و داده OMI در هر یک از ماه‌های میلادی سال ۲۰۲۰ در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، در ماه‌های میلادی ۰۱ (ژانویه)، ۰۲ (فوریه)، ۰۳ (مارس)، ۱۱ (نوامبر) و ۱۲ (دسامبر) که ماه‌های سرد سال هستند و طول روز کوتاه‌تر و شدت تابش خورشید نیز کمتر است، میانگین مقدار



شکل ۴. میانگین مقدار پیش‌بینی UVI و داده OMI در تاریخ‌های منتخب؛ اعداد بالای هر نقطه، میانگین مقدار AOD در هر تاریخ است.

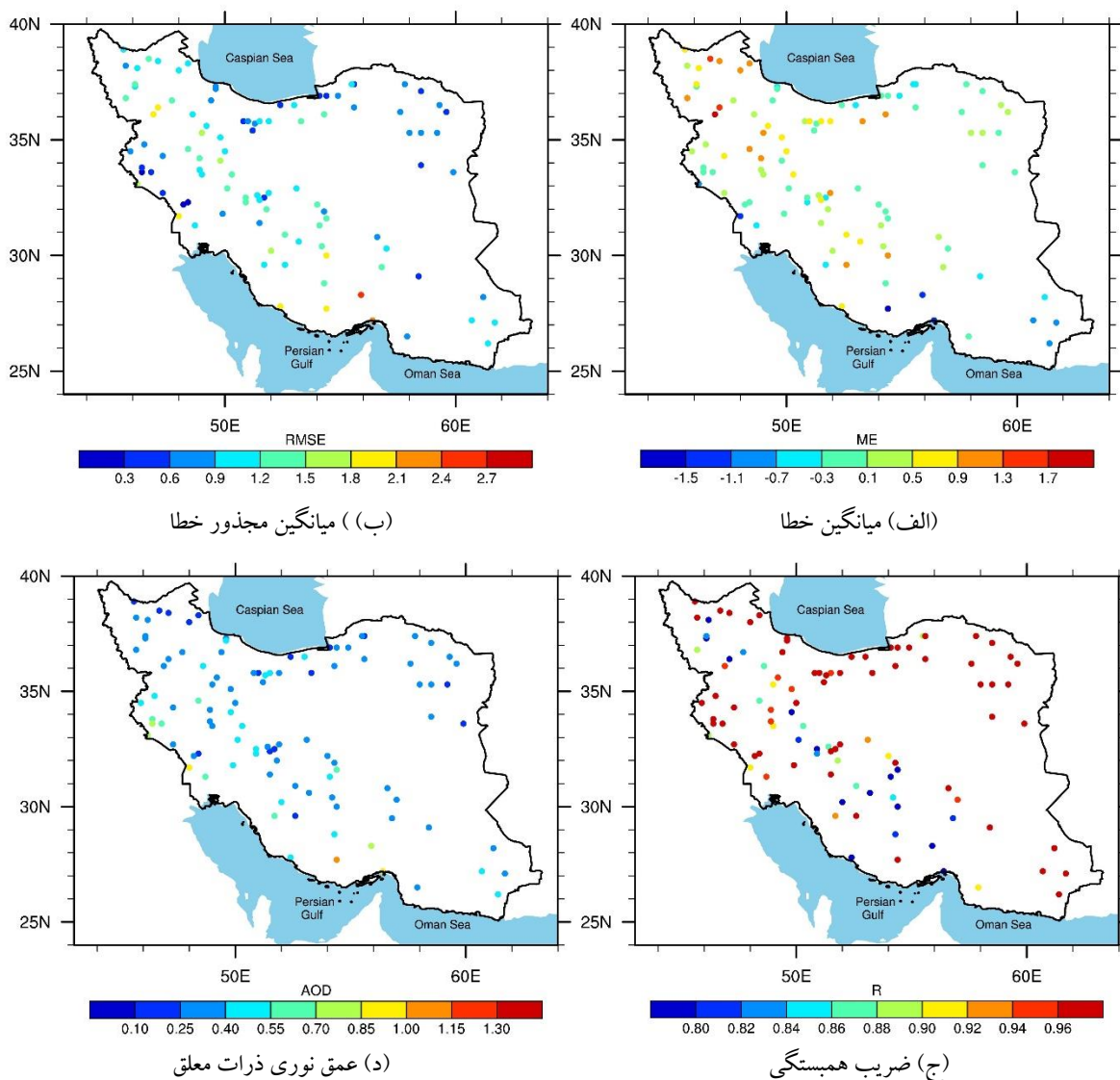


شکل ۵. خطای ماهانه پیش‌بینی؛ (الف) میانگین خطا، (ب) میانگین قدر مطلق خطا، (ج) جذر میانگین مربعات خطا، (د) میانگین مقدار UVI.

۳-۴. توزیع مکانی خطای پیش‌بینی

در موارد مطالعاتی پروژه حاضر، ۱۰۱ ایستگاه همدیدی از سراسر کشور طوری انتخاب شده‌اند که پراکندگی آن‌ها شامل کل کشور باشد و در تاریخ‌های منتخب دارای آسمان صاف باشند؛ بنابراین، نقاط ایستگاهی منتخب در عرض‌های جغرافیایی، طول‌های جغرافیایی و ارتفاع‌های مختلف و متنوع هستند. در هر نقطه ایستگاهی، سنجه‌های آماری ME ، $RMSE$ ، R و میانگین مقدار عمق نوری ذرات محاسبه و به صورت نقشه در شکل ۶ نشان داده شده است. برای محاسبه خطا، اختلاف مقدار پیش‌بینی UVI با

استفاده از مدل TUV و مقدار UVI از سنجنده OMI به‌عنوان داده مشاهداتی محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نقاطی که دارای مقدار AOD بیشتری هستند، مقدار خطای بیشتر و ضریب همبستگی کمتری نسبت به سایر نقاط دارند. به همان علتی که در بخش ۳-۱ بیان شد (تانسکانز و همکاران، ۲۰۰۷)، در زمان‌هایی که ذرات معلق در هوا وجود دارند، سنجنده OMI مقادیر UV را بیش از واقعیت تخمین می‌زند که این امر باعث بروز اریبی منفی در درستی‌سنجی پیش‌بینی UVI می‌شود.



شکل ۶. نقشه توزیع خطای پیش‌بینی در ایستگاه‌های منتخب؛ (الف) میانگین خطا، (ب) جذر میانگین مربعات خطا، (ج) ضریب همبستگی (د) میانگین مقدار AOD .

در این مواقع از سال افزایش می‌یابد؛ اما به‌طور کلی در این مطالعه، پیش‌بینی UVI دارای دقت بالایی است؛ به‌طوری‌که در کل موارد مطالعاتی منتخب، مقادیر ME، MAE، RMSE و R به ترتیب ۰/۱۶، ۱۳/۸۵، ۱/۰ و ۰/۹۳ هستند که نشان دهنده دقت بالای پیش‌بینی است. همچنین نتایج نشان دادند که خطای پیش‌بینی با مقدار AOD یک رابطه خطی دارد؛ به‌طوری‌که هر چه مقدار AOD بیشتر باشد، مقدار خطای پیش‌بینی نیز بیشتر و منفی است و مقدار پیش‌بینی کمتر از واقعیت برآورد شده است. زیرا در مواقعی که ذرات معلق در هوا وجود دارند، سنجنده OMI مقادیر UV را بیش از واقعیت تخمین می‌زند (تانسکانن و همکاران، ۲۰۰۷) که این امر باعث بروز اریبی منفی در درستی‌سنجی پیش‌بینی UVI می‌شود. این تحقیق اولین پژوهش در زمینه پیش‌بینی شاخص پرتو فرابنفش در کشور است که نتایج رضایت‌بخشی به همراه داشته است.

منابع

رستم پور، ن.، الماسی، ت.، رستم پور، م.، بیات، ح. و کریمی، س. (۱۳۹۱). بررسی میزان شدت پرتوهای فرابنفش خورشیدی نوع A در شهر همدان. *مجله پزشکی بالینی ابن سینا*، ۱۹(۶)، ۶۹-۷۴.

Ahmad, S.P., Levelt, P. F., Bhartia, P. K., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G. W., & Johnson, J. E. (2003). Atmospheric products from the ozone monitoring instrument (OMI). In Proc. SPIE, *Earth Observing Systems VIII*, 5151, 619-630.

Antón, M., Cachorro, V., Vilaplana, J., Toledano, C., Krotkov, N., Arola, A., Serrano, A., & de la Morena, V. A. (2010). Comparison of UV irradiances from Aura / Ozone Monitoring Instrument (OMI) with Brewer measurements at El Arenosillo (Spain) – Part 1: Analysis of parameter influence. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10(13) 6797-6827.

Bais, A., Tourpali, K., Kazantzidis, A., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Chipperfield, M.P., Dameris, M., Eyring, V., Garny, H., Iachetti, D., Jöckel, P., Kubin, A., Langematz, U., Mancini, E., Michou, M., Morgenstern, O., Nakamura, T., Newman, P. A., Pitari, G.,

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از مدل فرابنفش قابل مشاهده وردسپهری TUV برای پیش‌بینی UVI در ۶۱۲ مورد مطالعاتی در سال ۲۰۲۰ از نقاط مختلف کشور استفاده شد. این مدل برای پیش‌بینی UVI به داده‌های ازن، سپیدایی و عمق نوری ذرات معلق نیاز دارد. مقادیر ستون ازن و سپیدایی از GFS و مقادیر AOD از برون‌داد مدل WACCM استخراج و در نقاط مورد نظر درون‌یابی شدند. سپس مقادیر درون‌یابی شده به همراه طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع نقاط و زاویه تابش خورشیدی، به‌عنوان ورودی به مدل TUV داده شد و مقادیر UVI در نقاط مختلف پیش‌بینی شدند. به دلیل عدم دسترسی به مقدار واقعی UVI در کشور، از داده سنجنده OMI به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد. به دلیل این‌که داده OMI در ظهر محلی هر نقطه موجود است، بنابراین موارد مطالعاتی برای ساعت ظهر انتخاب شده‌اند. نتایج نشان دادند که در ماه‌های گرم سال که مقدار UVI بیشتر از ماه‌های سرد است، خطای پیش‌بینی نیز بیشتر است. خطای بیشتر پیش‌بینی UVI در تابستان با نتایج پراساد و همکاران (۲۰۲۲) و اووه و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. با توجه به اینکه در فصول گرم سال، مدل‌ها قادر به ثبت تغییرات زیاد ستون ازن و اثر هواویزها نیستند (پراساد و همکاران، ۲۰۲۲)، خطای پیش‌بینی UVI

Plummer, D. A., Rozanov, E., Shepherd, T. G., Shibata, K., Tian, W., & Yamashita, Y. (2011). Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7533-7545.

Brognez, C., Auriol, F., Deroo, C., Arola, A., Kujanpää, J., Sauvage, B., Kalakoski, N., Pitkänen, M. R. A., Catalfamo, M., Metzger, J. M., Tournois, G., & Da Conceicao, P. (2016). Validation of satellite-based noontime UVI with NDACC ground-based instruments: influence of topography, environment and satellite overpass time. *Atmospheric Chemistry and Physics*, European Geosciences Union, 16, 15049-15074.

Buchard, V., Brogniez, C., Auriol, F., Bonnel, B., Lenoble, J., Tanskanen, A., Bojkov, B., & Veefkind, P. (2008). Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-

- based measurements at two French sites. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8 (2), 4309-4351.
- Butchart, N. (2014). The Brewer-Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*, 52, 157-184.
- Diffey, B.L. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Physics in Medicine & Biology*, 36, 299-328. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/36/3/001>.
- Dobson, G. (1956). Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 236, 187-193.
- Erickson D. J., Sulzberger, B., Zepp, R.G., & Austin, A.T. (2015). Effects of stratospheric ozone depletion, solar UV radiation, and climate change on biogeochemical cycling: interactions and feedbacks, *Photochem. Photobiol. Sci*, 14, 127-148.
- Garcia, R. R., Smith, A. K., Kinnison, D. E., Camara, A., & Murphy, D. (2017). Modification of the gravity wave parameterization in the Whole Atmosphere Community Climate Model: Motivation and results. *J. Atmos. Sci.*, 74, 275-291, doi:10.1175/JAS-D-16-0104.1.
- Garcia, R. R., Marsh, D., Kinnison, D. E., Boville, B., & Sassi, F. (2007). Simulations of secular trends in the middle atmosphere, 1950-2003. *J. Geophys. Res.*, 112, D09301, doi:10.1029/2006JD007485.
- Hader, D. P., Kumar, H. D., Smith, R. C., & Worrest, R. C. (2007). Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci*, 6, 267-285, 10.1039/B700020K.
- Hegglin, M. I., & Shepherd, T. G. (2009). Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nature Geoscience*, 2, 687-691, 10.1038/ngeo604.
- Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33, 403-439, 10.1029/95RG02097, 10.1029/95RG02097.
- Hovila, J., Arola, A., & Tamminen, J. (2013). OMI/Aura Surface UVB Irradiance and Erythemal Dose Daily L3 Global Gridded 1.0 degree x 1.0 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
- Kinnison, D. E., Brasseur, G. P., Walters, S., Garcia, R. R., Sassi, F., Boville, B. A., Marsh, D., Harvey, L., Randall, C., Randel, W., Lamarque, J.-F., Emmons, L. K., Hess, P., Orlando, J., Tyndall, J., & Pan, L. (2007). Sensitivity of chemical tracers to meteorological parameters in the MOZART-3 chemical transport model. *J. Geophys. Res.*, 112, D20302, doi:10.1029/2006JD007879, 2007.
- Krzyżściński, J.W., Guzikowski, J., Pietruczuk, A., & Sobolewski, P. (2020). Improvement of the 24 hr forecast of surface UV radiation using an ensemble approach. *Meteorol Appl.* 27, e1865. <https://doi.org/10.1002/met.1865>.
- Lamy, K., Josse, B., Portafaix, T., Bencherif, H., Godin-Beekmann, S., Brogniez, C., Abraham, N. L., Akiyoshi, H., Archibald, A. T., Bekki, S., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Currie, R., Di Genova, G., Garcia, R. R., Deushi, M., Dhomse, S., Duncan, B. N., Hegglin, M. I., Horowitz, L. W., Jöckel, P., Kinnison, D., Lamarque, J. F., Lin, M. Y., Mancini, E., Marchand, M., Maréchal, V., Michou, M., Morgenstern, O., O'Connor, F. M., Nagashima, T., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D., Pyle, J. A., Revell, L. E., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Scinocca, J. F., Stenke, A., Strahan, S. E., Stone, K., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Tilmes, S., Yamashita, Y., Yoshida, K., & Zeng, G. (2017). Ultraviolet Radiation evolution during the 21st century. CCMI 2017. *Chemistry-Climate Model Initiative Science Workshop, Jun 2017*, Toulouse, France. fhal-01648231f.
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marechal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visioni, D., & Yoshida, K. (2019). Ultraviolet Radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 19(15): 10087-10110.
- Lucas, R., McMichael, T., Smith, W., & Armstrong, B. (2006). Solar ultraviolet radiation: global burden of disease from solar ultraviolet radiation. In: Prüss-Ustün, A., Zeeb, H., Mathers, C. & Repacholi, M. (Eds.) World Health Organization Public Health and the Environment Geneva 2006. Environmental Burden of Disease Series 13. Geneva, Switzerland: World Health Organization, p. 250

- https://www.who.int/uv/health/solaruvradfull_180706.pdf.
- Madronich, S., & Flocke, S. (1997). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. In: Zerefos, C. S. & Bais, A.F. (Eds.) *Solar Ultraviolet Radiation: Modelling, Measurements and Effects*. Berlin: Springer, 23–48.
- Marsh, D. R., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Lamarque, J. F., Calvo, N., & Polvani, L. M. (2013). Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM). *Journal of Climate*, 26 (19), doi:10.1175/JCLI-D-12-00558.1.
- McKinlay, A.F., & Diffey, B.L. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6, 17–22.
- Oh, S.T., Ga, D.H., & Lim, J.H. (2021). Mobile Deep Learning System that Calculates UVI Using Illuminance Value of User's Location. *Sensors*, 21, 1227. <https://doi.org/10.3390/s21041227>.
- Podrascanin, Z., Atlagic, M., Mijatovic, Z., & Sremac, A.F. (2018). Uv Index Forecasting in Vojvodina Region. *RAD Conf. Proc.* 3, 187–190.
- Prasad, S. S., Deo, R. C., Downs, N., Igoe, D., Parisi A. V., & Soar, J. (2022). Cloud Affected Solar UV Prediction With Three-Phase Wavelet Hybrid Convolutional Long Short-Term Memory Network Multi-Step Forecast System. in *IEEE Access*, 10, 24704-24720, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153475.
- Roshan, D.R., Koc, M., Abdallah, A., Martin-Pomares, L., Isaifan, R., & Fountoukis, C. (2020). UV Index Forecasting under the Influence of Desert Dust: Evaluation against Surface and Satellite-Retrieved Data. *Atmosphere*, 11, 96. <https://doi.org/10.3390/atmos11010096>.
- Smith, R. C., & Cullen, J. J. (1995). Effects of UV radiation on phytoplankton. *Reviews of Geophysics*, 33, 1211–1223, 10.1029/95RG00801, 10.1029/95RG00801.
- Taipe, C.W., Mendoza, E.G., & Flores, H.H. (2021). Validation of ultraviolet index data from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) based on measurements from meteorological stations in the city of Puno. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1841/1/012005.
- Tanskanen, A., Lindfors, A., Maatta, A., Krotkov, N., Herman, J., Kaurola, J., Koskela, T., Lakkala, K., Fioletov, V., Bernhard, J., McHenzie, R., Kondo, Y., O'Neill, M., Slaper, H., den Outer, P., Bais, A.F., & Tamminen, J. (2007). Validation of daily erythemal doses from OMI with ground-based UV measurement data. *J. Geophys. Res.*, 112, D24S44, doi:10.1029/2007JD008830.
- WMO (World Meteorological Organization. (1997). Report of the WMO-WHO Meeting of Experts on Standardization of UV Indices and their Dissemination to the Public, WMO/GAW Report No. 127, Geneva.
- World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). *Global solar UV index: a practical guide*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459>.
- Young, A.R. (2006). Acute effects of UVR on human eyes and skin. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 92, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.005>.
- Zepp, R., Erickson, D., Paul, Nigel., & Sulzberger, B. (2007). Interactive effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling. *Photochemical & photobiological sciences: Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 6, 286-300. 10.1039/b700021a.