



Multidecadal Investigation of Integrated Surface Ultra-Violet Radiation and its Consistency with Total Column Ozone and Cloudiness

Haniyeh Baziyarpour^a, Ali Akbar Sabziparvar^{b*}

^a PhD Candidate in Agrometeorology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

^b Professor in Meteorology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 7 April 2022

Revised: 4 July 2022

Accepted: 6 July 2022

Abstract

Solar radiation that reaches the Earth's surface has a significant impact on human health, agricultural productivity, terrestrial, aquatic ecosystems, and air quality. The difficulties from shortage of experimental field data motivate the researchers to rely on other database such as satellites and reanalysis radiation data. In the present work, the integrated daily solar ultraviolet-visible radiation (total integral of ultraviolet-visible radiation from 200 to 440 nm) was extracted from the ERA5 reanalysis database during the historical period of 1979-2020. Moreover, Total Column Ozone (TCO), and the Percentage of Cloudiness (CF) were obtained from the same database. The study area was divided into eight clusters by Analytic Hierarchy Process (AHP) method and trend analysis was performed using Mann-Kendall test. Results indicated that mean annual integrated UV-VIS 200-440 radiation of north and northwest of the country has experienced a positive trend during the last four decades, but no significant trend was detected for other parts of the country. The study of the TCO also showed that in all eight clusters, the TCO trend during 1979 to 2000 has experienced a significant decreasing trend, but has increased from 2001 onward. The linear regression equations between UV-VIS200-440 with TCO and CF were also constructed for all time scales (monthly, seasonal, annual) and the corresponding coefficients of correlation were calculated accordingly. The maximum annual correlation (r) was found between UV-VIS200-440 and the cloudiness (0.81). However, the highest r between UV-VIS200-440 and the TCO was 0.25. This result highlights that the variation in cloudiness plays more important role on determination of surface UV radiation than the changes in ozone concentration. This study did not investigated the influence of aerosol optical depth on UV radiation. This issue demands further investigation for evaluating the impact of aerosols on incoming surface UV radiation reaching the ground.

Keywords: Iran UV Zoning, Analytic Hierarchy Process (AHP), Mann-Kendal Test, ERA5 Database, UV Trend

*.Corresponding author: AliAkbar Sabziparvar Email: swsabzi@basu.ac.ir Tel: 09121859970

How to cite this Article: Baziyarpour, H., & Sabziparvar, A.A. (2024). Multidecadal investigation of integrated surface Ultraviolet radiation and its consistency with total column ozone and cloudiness.

Journal of Geography and Environmental Hazards,13(1),243-264.

DOI:10.22067/geoeh.2022.76097.1211



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76097.1211> 


جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شماره چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص ۲۶۴-۲۴۳

مقاله پژوهشی

واکاوی چنددهه‌ای تغییرات تابش تجمعی روزانه فرابنفش سطحی در ایران و همبستگی آن با تغییرات

ازون کلی و ابرناکی

هانیه بازیارپور- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

علی اکبر سبزی پرور^۱ - استاد هواشناسی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۱۵

چکیده

تابش فرابنفش خورشیدی رسیده به سطح زمین تأثیر بیولوژیکی قابل توجهی بر سلامت انسان، حیوانات، گیاهان و اکوسیستم‌های زمینی و آبی دارد. پایش مستمر تغییرات شدت تابش فرابنفش و ازون کلی در ایران فقط در دو ایستگاه انجام می‌شود که در دوره‌هایی به خاطر مشکلاتی از جمله کالیبراسیون و هزینه سنگین نگهداری با مشکلاتی مواجه شده است. این مشکلات انگیزه استفاده از دیگر منابع اطلاعاتی نظیر ماهواره‌ها و داده‌های باز تحلیل را در طیف‌های مهم الکترومغناطیسی خورشید فراهم می‌نماید. در پژوهش حاضر، تابش تجمعی روزانه فرابنفش-مرئی (انترگرال کلی تابش فرابنفش-مرئی از طول موج ۲۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر) حاصل از پایگاه داده بازتحلیل ERA5، ازون کلی و درصد ابرناکی مربوط به دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۰ در گستره ایران مورد بررسی قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به ۸ خوشه تقسیم و بررسی روند در سری داده‌ها با استفاده از آزمون من-کندال انجام شد. نتایج میانگین شدت تابش تجمعی فرابنفش-مرئی

Email: swsabzi@basu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۸۵۹۹۷۰

نحوه ارجاع به این مقاله:

بازیارپور، هانیه، سبزی پرور، علی اکبر؛ ۱۴۰۳. واکاوی چنددهه‌ای تغییرات تابش تجمعی روزانه فرابنفش سطحی در ایران و

همبستگی آن با تغییرات ازون کلی و ابرناکی. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۳(۱). صص ۲۶۴-۲۴۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76097.1211>

(UV-VIS200-440) نشان داد در مقیاس سالانه در نواحی شمال و شمال غرب کشور (خوشه‌های ۵، ۶، ۷ و ۸) روند مثبت وجود دارد، اما در سایر مناطق روند معنی‌داری مشاهده نشد. مطالعه سری زمانی ازون کلی کشور نیز نشان داد در هر ۸ خوشه مطالعه شده ازون کلی در سال‌های ۱۹۷۹ الی ۲۰۰۰ روند کاهشی معنی‌دار و از سال ۲۰۰۱ میلادی به بعد روند افزایشی معنی‌دار را تجربه نموده است. در این پژوهش به منظور تخمین تابش در نقاط فاقد ایستگاه، روابط رگرسیونی خطی بین تابش تجمعی (۲۰۰ الی ۴۴۰ نانومتر) با ازون کلی و ابرناکی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه استخراج شدند. بررسی ضرایب همبستگی بین سری زمانی تابش فرابنفش-مرئی (۲۰۰ الی ۴۴۰ نانومتر) با ابرناکی و ازون کلی نشان داد در هر سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه، تابش با ابرناکی همبستگی قوی‌تری نسبت به ازون کلی دارد. به طوری که در مقیاس سالانه بیشترین ضریب همبستگی تابش فرابنفش-مرئی با ابرناکی ۰/۸۱ و برای ازون کلی ۰/۲۵ به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: خوشه‌بندی سلسله مراتبی، پهنه‌بندی تابش روزانه، آزمون من-کندال، پایگاه داده ERA5، روند تابش فرابنفش.

۱- مقدمه

تابش اشعه فرابنفش خورشیدی (UV) که به سطح زمین می‌رسد تأثیر قابل توجهی بر سلامت انسان، بهره‌وری کشاورزی، اکوسیستم‌های زمینی و آبی و کیفیت هوا دارد (داگلاس و همکاران ۲۰۱۱)^۱ و ویلیامسون و همکاران (۲۰۱۴)^۲. ازون استراتوسفری یک گاز طبیعی است که بخشی از تابش‌های مضر UV خورشید را فیلتر می‌کند. ازون استراتوسفری به‌طور مؤثر بخش زیادی از تابش فرابنفش خورشیدی را در طول موج‌های ۲۰۰ تا ۳۱۵ نانومتر جذب می‌کند، که در غیر این صورت به‌طور بالقوه به حیات بیوسفر آسیب می‌رساند. در اواسط دهه ۱۹۷۰ کشف شد که انتشار مواد شیمیایی حاوی کلر ساخته دست بشر می‌تواند باعث تخریب لایه ازن شود. پروتکل مونترال در سال ۱۹۸۹ به اجرا درآمد و مواد متعددی را که باعث تخریب لایه ازن می‌شوند ممنوع کرد. از سال ۱۹۹۷ تا اواسط دهه ۲۰۰۰ آشکار شد که کاهش در ستون ازون کلی (TCO) تقریباً در تمام عرض‌های جغرافیایی غیرقطبی متوقف شده است (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۰۷)^۳. بااین حال، سرعت بهبود تحت تأثیر تغییرات دما، گردش جو و چرخه‌های تشکیل و تخریب ازون توسط نیتروژن و هیدروژن است. میزان تابش فرابنفش خورشیدی دریافت شده در هر مکان خاص روی سطح زمین

¹ Douglass et al, 2011

² Williamson et al, 2014

³ WMO, 2007

علاوه بر میزان ازون در جو به موقعیت خورشید در افق و ابرناکی نیز بستگی دارد. در ایران مطالعات زیادی در زمینه تابش فرابنفش انجام نشده است. در ادامه به چند نمونه از این مطالعات اشاره می‌شود. موقری و خسروی در سال ۱۳۹۳ در پژوهشی به بررسی توزیع مکانی شاخص پرتو فرابنفش در گستره ایران پرداختند. در این پژوهش به منظور محاسبه میزان پرتو فرابنفش، ۹۴ ایستگاه موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد در مقیاس سالانه، ۴ درصد از مساحت کشور از شاخص پرتو فرابنفش متوسط برخوردار است که برخی شهرهای حاشیه دریای خزر را در برمی‌گیرد. ۵۴ درصد از سطح کشور که نیمه شمالی کشور را شامل می‌شود، شاخص زیاد پرتو فرابنفش دریافت می‌کند و ۴۲ درصد از مساحت کشور که عموماً استان‌های جنوبی کشور را در برمی‌گیرد، از میزان شاخص خیلی زیاد برخوردار است (موقری و خسروی، ۱۳۹۳). **سبزی‌پرور و سیف‌زاده** در سال ۱۳۹۹ با استفاده از مدل انتقال تابش لایه‌ای TUV5 به برآورد تابش تجمعی روزانه UVA در سه حالت شرایط آسمان کاملاً صاف، کاملاً ابری و واقعی در مناطق مرکزی ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد بیشینه تابش UVA در نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه متمرکز است که در فصول گرم سال غالباً در شرق و در فصول سرد سال در نواحی مرکزی و جنوب غرب منطقه مستقر است. در تحقیق دیگری سبزی‌پرور و سیف‌زاده (۱۳۹۹) به واکاوی تأثیر ابرناکی بر تابش فرابنفش تجمعی روزانه UVB در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پرداختند. برآوردها در شرایط آسمان کاملاً صاف و ابری حکایت از حضور بیشینه تابش UVB در فصل تابستان در نواحی جنوبی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه داشت. بر اساس نقشه‌های به دست آمده در این پژوهش، کمینه مقادیر روزانه UVB نیز در تمامی شرایط مورد بررسی در فصل زمستان مشاهده شد. سبزی‌پرور و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از مدل تابش مالتی استریم (چند چشمه-ای) و جو چندلایه‌ای به ارائه میانگین‌های درازمدت تابش‌های بیولوژیکی UVA، UVB، آفتاب‌سوختگی و آب‌مروراید چشمی در مقیاس $1/25^\circ \times 1/25^\circ$ اقدام نمودند. در این تحقیق نشان داده شده که در توزیع جغرافیایی تابش‌های بیولوژیکی موقعیت سمت‌الرأس خورشید (زاویه پرتوهای خورشید با خط عمود بر محل) نقشی مهم‌تر از ازون ایفا می‌کند. **فرج‌زاده اصل و همکاران (۱۳۹۳)** به تحلیل تغییرات تابش فرابنفش در چهار مقیاس زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه در منطقه اصفهان پرداختند. نتایج حاصل از برازش روند تغییرات فصلی نشان داد مقدار تابش در فصل بهار روندی افزایشی داشت. در حالی که این روند برای دیگر فصل‌ها کاهشی بود. همچنین نتایج نشان داد بیشترین شاخص تابش فرابنفش (UV Index) به مقدار $11/5$ در اواسط تابستان و کمترین آن به مقدار $0/5$ در زمستان رخ داد. **رستم‌پور و همکاران (۱۳۹۱)** در پژوهشی به بررسی میزان شدت تابش ماهانه UV-A در شهر همدان پرداختند. این مطالعه به صورت مقطعی و در مدت یک سال انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد بیشینه میانگین UV-A در شهریور با میزان $27/1 \pm 3/09$ وات بر مترمربع، حدود دو برابر از مقدار مجاز (۱۰ وات بر مترمربع) توسط WHO بیشتر بود.

کمینه میانگین تابش UV-A نیز حدود ۱۸٪ از این مقدار مجاز تجاوز کرد. علت این اختلاف به ارتفاع زیاد شهر همدان از سطح دریا نسبت داده شده است.

پایش تغییرات شدت تابش فرابنفش و ازون در ایران به صورت محدود فقط در دو ایستگاه انجام می شود که به صورت غیر پیوسته و نامنظم است. مطمئناً در کشور پهناوری همچون ایران، اندازه گیری نامنظم تنها در دو ایستگاه نمی تواند کافی باشد و این امر ضرورت استفاده از داده های شبکه ای جهت بررسی میزان تابش فرابنفش و ازون، همچنین بررسی تغییرات این تابش به خصوص در سال های اخیر را نشان می دهد. داده های ERA5 نسل پنجم داده های بازتحلیل مرکز پیش بینی های میان مدت اروپا ECMWF از اقلیم جهان برای ۴ تا ۷ دهه اخیر است. ERA5 تخمین های ساعتی را برای تعداد زیادی از مقادیر جوی، امواج اقیانوسی و سطح زمین فراهم می کند. برآورد عدم اطمینان توسط روش Ensemble تحت ده بخش در فواصل سه ساعته انجام می شود. این قبیل برآوردهای عدم اطمینان از نزدیک با محتوای اطلاعاتی سیستم مشاهده موجود مرتبط است که با گذشت زمان به طور چشمگیری تکامل یافته است. چند نمونه از پژوهش هایی که با استفاده از داده های تابش فرابنفش ERA5 انجام شده است در ادامه ذکر می شود. شیا و همکاران (۲۰۲۱)^۱ به بررسی اثر افزایش ابر ناشی از تخریب ازون بر میزان UV رسیده به سطح در سبیری در فصل بهار با استفاده از داده های ERA5 پرداختند. آن ها نتیجه گرفتند که از بین رفتن لایه ازن استراتوسفر باعث افزایش اشعه فرابنفش رسیده به سطح می شود. در مقابل، افزایش ابرهای مرتفع ناشی از تخریب ازون منجر به کاهش تابش UV سطح می شود. آن ها با یک تجزیه و تحلیل ترکیبی به این نتیجه رسیدند که اثر افزایش ابر قوی تر از اثر از بین رفتن ازون استراتوسفر در منطقه مورد مطالعه است. راکس سات و همکاران (۲۰۲۱)^۲ به پیش بینی دقیق تابش فرابنفش سطحی برای کاربردهای بالینی با شبکه عصبی در استان ناکون پاتوم تایلند پرداختند و دقت مدل ها را با استفاده از داده های تابش فرابنفش، ابرناکی و ازون کلی ERA5 مورد ارزیابی قرار دادند.

در زمینه بررسی روند طولانی مدت داده های فرابنفش نیز مطالعاتی انجام شده است. گلندورف و همکاران (۲۰۰۴)^۳ به بررسی روند تابش فرابنفش در سری زمانی دو ایستگاه در یونان و فنلاند پرداختند. نتایج نشان داد روند معنی داری در این دو سری زمانی در داده های تابش فرابنفش مشاهده نمی شود. سمدلی و همکاران (۲۰۱۲)^۴ به بررسی روند تغییرات تابش فرابنفش سطحی در انگلستان پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۸ روند قابل توجهی در میزان حداکثر شاخص UV روزانه (۶/۶٪ در هر دهه) دیده می شود. اما هیچ ارتباطی بین تغییرات UV سطح و مقادیر ازون کل وجود نداشت که نشان می دهد میزان UV

1 Xia et al, 2021

2 Raksasat et al, 2021

3 Glandorf et al, 2004

4 Smedley et al, 2012

بیشتر تحت تأثیر تغییرات در پوشش ابر است. برنارد و استایرل (۲۰۲۰)^۱ به بررسی روند در سری زمانی تابش فرابنفش ۱۹۹۶-۲۰۱۸ در قطب جنوب پرداختند. نتایج این مطالعه شواهدی ارائه کرد که نشان می‌دهد شاخص (UVI) اندازه‌گیری شده توسط طیف‌سنج‌های SUV-100 در سه سایت قطب جنوب (قطب جنوب، ارتفاعات Arrival، و ایستگاه پالمِر) در حال کاهش است. به‌عنوان مثال، یک روند نزولی قابل توجه ۵/۵ درصد در هر دهه (۹۵٪ سطح اطمینان) در ارتفاعات Arrival برای زمستان (دسامبر تا فوریه) گزارش شد. فانتولکیس و همکاران (۲۰۱۸)^۲ با استفاده از داده‌های بیست‌وپنج سال اندازه‌گیری طیفی UV-B در کانادا، اروپا و ژاپن، به بررسی روند و اثرات تغییرات در ازون، آئروسول، ابرها و آلبدو بر میزان تابش UV-B پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد در نیمکره شمالی تغییرات طولانی‌مدت در تابش UV-B رسیده به سطح، در مکان‌های مختلف به‌طور قابل توجهی متفاوت است. محرک‌های اصلی این تغییرات، تغییرات در آئروسول و ازون کلی گزارش شد. فانتولکیس و همکاران (۲۰۲۰)^۳ در پژوهشی به بررسی روند در سری زمانی تابش فرابنفش در اروپا پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل ازون کلی و داده‌های طیفی UV ثبت شده در چهار ایستگاه اروپایی طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ نشان داد تغییرات درازمدت در UV عمدتاً ناشی از تغییرات در آئروسول، ابرناکی و آلبدو سطح است، درحالی‌که تغییرات در ازون کلی نقش کمتری دارد. اون و همکاران (۲۰۱۹)^۴ به بررسی ویژگی‌های روزانه، فصلی و سالانه GSR، UVB (۲۸۰-۳۱۵ نانومتر) و UVA (۳۱۵-۴۰۰ نانومتر) ازون کلی و غلظت آئروسول‌ها، از سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۱۶ پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد هیچ روند قابل توجهی در تابش فرابنفش برای دوره مورد مطالعه در مقیاس سالانه و فصلی وجود نداشت. همین امر در مورد عوامل مؤثر بر تابش فرابنفش، ازون کلی، GSR و عمق نوری آئروسول صادق بود.

تحقیقاتی که تا کنون در کشور انجام شده است، به علت نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی، تغییرات بلندمدت میزان تابش فرابنفش و وجود روند احتمالی در آن مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 اقدام به پهنه‌بندی تابش فرابنفش (انتگرال کلی تابش فرابنفش از طول‌موج ۲۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر که در کل مقاله به خاطر تلخیص تابش فرابنفش نوشته می‌شود) و ازون کلی و ابرناکی و همچنین بررسی تغییرات میزان تابش فرابنفش و ازون کلی و ابرناکی طی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ در گستره ایران می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که در این تحقیق امکان جداسازی تابش ناشی از ۴۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر در داده‌های بازتحلیل ERA5 وجود نداشت و به این دلیل محدوده طیف مورد مطالعه (۲۰۰-۴۴۰ نانومتر) فرابنفش نام‌گذاری شد.

1 Bernhard and Stierle, 2020

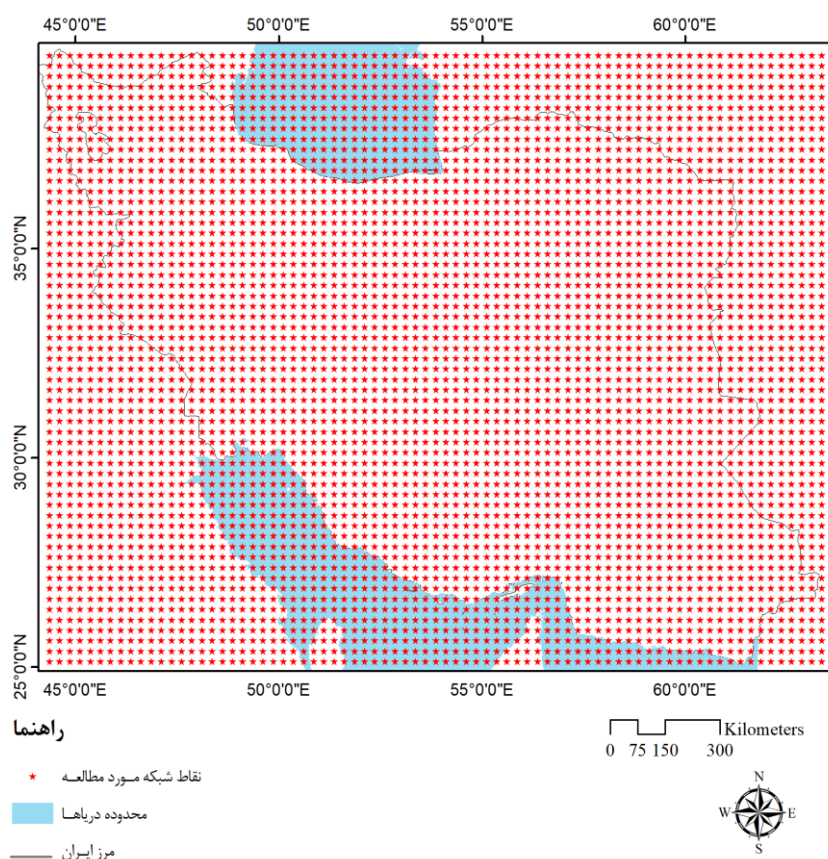
2 Fountoulakis et al, 2018

3 Fountoulakis et al, 2020

4 Aun et al, 2019

۲- منطقه مورد مطالعه

کشور ایران با وسعت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومترمربع در نیم کره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده است. این کشور، بین دو نصف النهار 44° و 64° شرقی و دو مدار 25° و 40° شمالی قرار گرفته است. حدود ۹۰٪ خاک ایران در محدوده فلات ایران واقع شده است و کشوری کوهستانی محسوب می شود. علاوه بر گسترش عرضی، رشته کوه های البرز و زاگرس مهم ترین تأثیر را در آب و هوای ایران دارند. افزون بر این، دو گستره آبی بزرگ در شمال و جنوب، رژیم های دمایی و بارشی خاصی را در کشور ایجاد می کند. به طوری که شرایط رطوبتی در این سرزمین از زمین های فوق العاده خشک تا زمین های بسیار مرطوب را شامل می شود. در این پژوهش، کشور ایران و نواحی اطراف آن به صورت شبکه ای با فاصله نقاط ۲۵ کیلومتر مورد مطالعه قرار گرفت. تعداد نقاط مورد بررسی در این پژوهش ۴۵۴۳ نقطه است که توزیع نقاط شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- توزیع جغرافیایی نقاط شبکه مورد مطالعه

۳- مواد و روش‌ها

داده‌های ERA5

پایگاه اطلاعاتی ECMWF یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های داده بازتحلیل در جهان است که مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد (دی و همکاران، ۲۰۱۱)^۱. بازتحلیل داده‌های مدل را با استفاده از قوانین فیزیک با داده‌های مشاهده‌ای از سراسر جهان ترکیب می‌کند و یک مجموعه داده کامل و سازگار جهانی ایجاد می‌کند. این اصل که داده‌گذاری^۲ نامیده می‌شود، مبتنی بر روشی است که توسط مراکز عددی پیش‌بینی آب‌وهوا استفاده می‌شود، که در آن هر چند ساعت (۱۲ ساعت در ECMWF) پیش‌بینی قبلی با مشاهدات جدید در دسترس، با روشی بهینه ترکیب می‌شود تا بهترین تخمین جدید از وضعیت جو تولید شود. ERA5 نسل پنجم بازتحلیل ECMWF برای آب‌وهوا و اقلیم جهانی در ۴ تا ۷ دهه گذشته است. در این پژوهش داده‌های تابش فرابنفش بازتحلیل ERA5 ابتدا به صورت میانگین ماهانه و با رزولوشن مکانی ۲۵*۲۵ کیلومتر برای گستره ایران از آدرس <https://cds.climate.copernicus.eu> دریافت شد. این داده‌ها مربوط به انتگرال کلی تابش فرابنفش و بخشی از تابش visible از طول موج ۲۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر می‌باشند که از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ (کل دوره موجود) دانلود گردید. با توجه به اینکه محدوده طول موج‌های visible از طول موج‌های مربوط به تابش فرابنفش قابل تفکیک نیست، تابش فرابنفش (UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀) در مقاله به کل این محدوده از ۲۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر اشاره دارد. همچنین داده‌های ازون و ابرناکی به صورت میانگین ماهانه و با رزولوشن مکانی ۲۵*۲۵ کیلومتر دانلود و پس از کنترل کیفی با استفاده از نرم‌افزار R و اطمینان از نرمال بودن و عدم وجود داده‌های پرت مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها توسط نرم‌افزار Open Netcdf به صورت شبکه‌ای برای ۴۵۴۳ نقطه برای گستره کشور استخراج گردید.

خوشه‌بندی سلسله مراتبی

خوشه‌بندی سلسله مراتبی روشی است که به کمک ویژگی‌ها^۳ یا صفت‌های^۴ مشاهدات، آن را به گروه‌های مشابه طبقه‌بندی می‌کند. انتخاب ویژگی‌های مناسب برای این کار، یکی از مسائل مهمی است که باید در نظر گرفته شود. از طرف دیگر استانداردسازی داده‌ها نیز مطرح است تا مقیاس اندازه‌گیری صفت یا ویژگی‌ها باعث انحراف تابع فاصله نشود. در این پژوهش نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R آزمون شد و برای انجام روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و خوشه‌بندی با استفاده از داده‌های میانگین تابش فرابنفش سالانه، میانگین ابرناکی سالانه و میانگین ازون سالانه و عرض جغرافیایی و ارتفاع از

1 Dee et al, 2011

2 Data assimilation

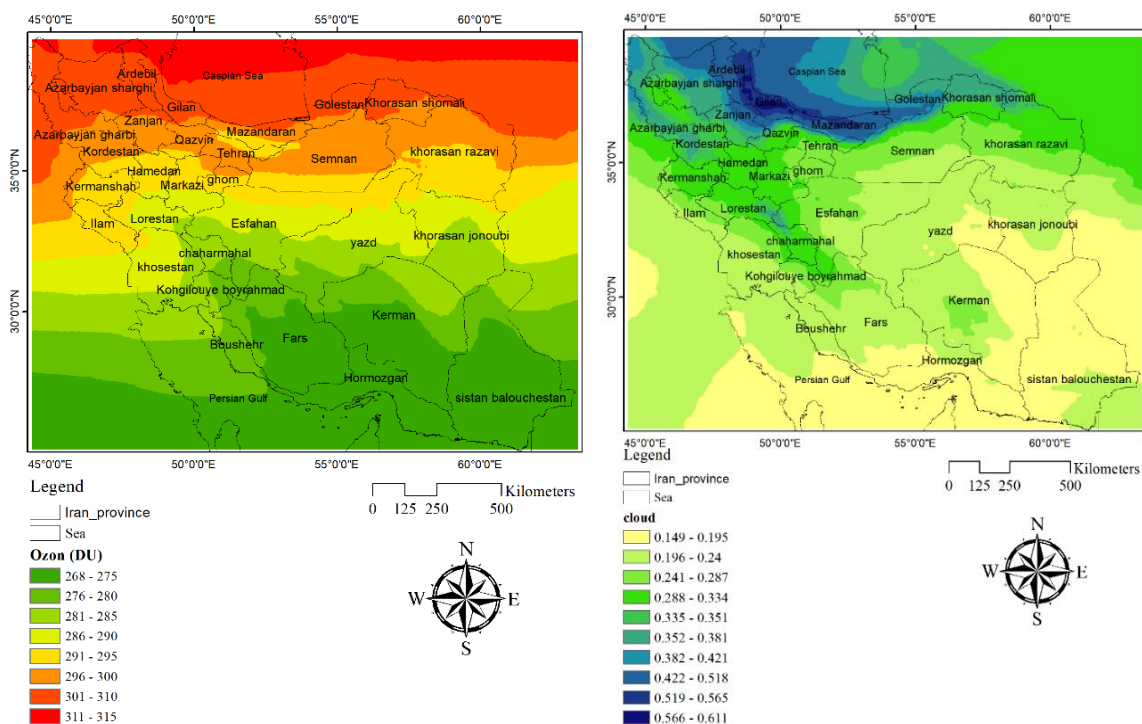
3 Features

4 Attributes

سطح دریا انجام شد. در روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی از فاصله اقلیدسی جهت محاسبه فاصله استفاده گردید (رابطه ۱). هر چه همبستگی بیشتر باشد فاصله کمتر در نظر گرفته می‌شود. به طوری که با اندازه‌گیری فاصله اقلیدسی متغیرهای میانگین تابش فرابنفش سالانه، میانگین ابرناکی سالانه و میانگین ازون سالانه و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مربوط به نقاط مورد مطالعه، همبستگی و همانندی نقاط مشخص می‌شود.

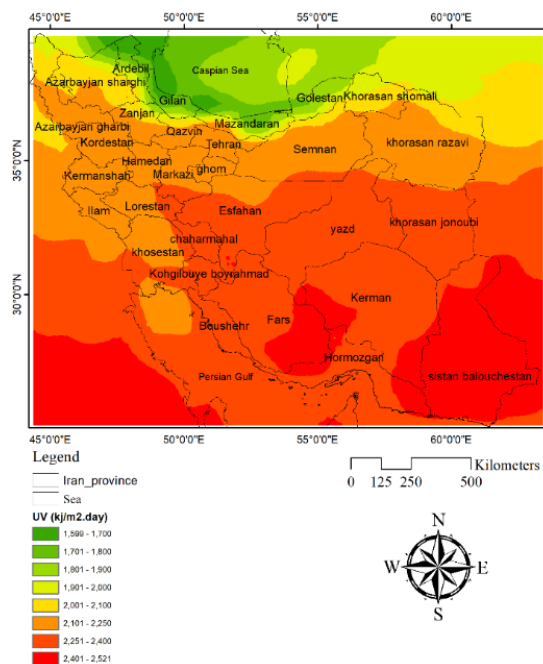
$$D_{euc} = (\sum_{i=1}^P (x_i - y_i)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

شکل ۲ مربوط به پهنه درونیابی شده (با روش IDW) مربوط به میانگین سالانه ابرناکی (راست) و میانگین سالانه ازون کلی (چپ) است. شکل ۳ پهنه تابش تجمعی روزانه UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ را نشان می‌دهد. در نهایت منطقه مورد مطالعه به ۸ خوشه تقسیم شد که پهنه‌بندی خوشه‌های تعیین شده در شکل ۴ آورده شده است. در این پژوهش پهنه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS ترسیم شد.



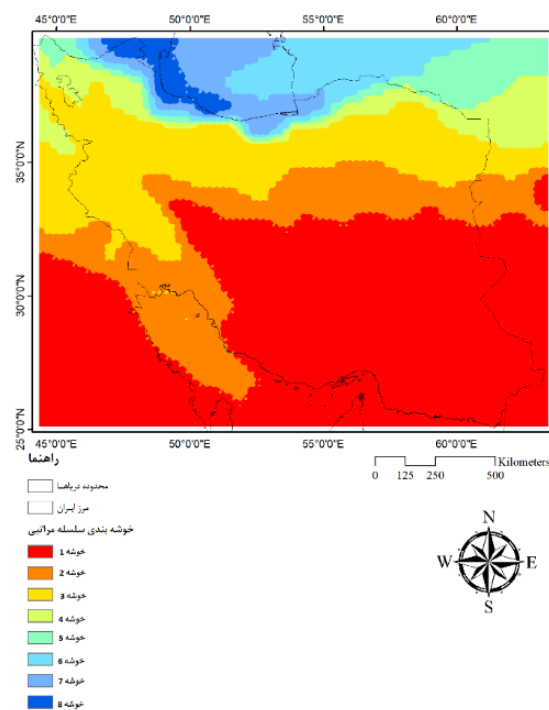
شکل ۲- توزیع جغرافیایی میانگین سالانه ازون کلی و ابرناکی (۱۹۷۹-۲۰۲۰) منطقه مورد مطالعه با استفاده از

روش IDW



شکل ۳- توزیع جغرافیایی میانگین سالانه تابش فرابنفش تجمعی روزانه (۲۰۲۰-۱۹۷۹) منطقه مورد مطالعه با

استفاده از روش IDW



شکل ۴- پهنه خوشه‌بندی سلسله مراتبی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش IDW

آزمون من-کندال

جهت بررسی وجود روند در سری زمانی داده‌های تابش فرابنفش، ازون و ابرناکی از آزمون من-کندال در بستر نرم‌افزار آماری R استفاده شد. آزمون من-کندال، آزمون ناپارامتریک رتبه مینا جهت بررسی روند است. در این آزمون تحت فرض H_0 داده‌ها از سری که مستقل و دارای توزیع یکسان می‌باشند گرفته شده‌اند. آزمون من-کندال با استفاده از روابط ۲ و ۳ انجام می‌شود:

$$s = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i), \text{ where } \text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, x > 0 \\ 0, x = 0 \\ -1, x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که واریانس فرآیند از معادله (۳) تعیین می‌شود.

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (3)$$

که در این رابطه m تعداد دسته‌ها با داده‌های گره‌دار و t_i تعداد داده‌های گره‌دار در هر دسته m می‌باشد.

روش Sen's slope

Sen (۱۹۶۸) با توسعه و بسط یک سری مطالعات آماری که Thiel (۱۹۵۰) به انجام رسانده بود یک روش ناپارامتری را جهت تحلیل سری‌های زمانی ارائه نمود. این روش نیز همانند روش من-کندال از تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بهره می‌گیرد. اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه می‌باشد. مراحل کلی انجام این آزمون به شرح زیر می‌باشد: محاسبه شیب بین هر جفت داده مشاهده‌ای با استفاده از رابطه ۴:

$$Q = \frac{X_t - X_s}{t - s} \quad (4)$$

که در آن، X_s و X_t به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان‌های s و t ، و t یک واحد زمانی بعد از زمان s می‌باشد. با اعمال رابطه (۴) برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده حاصل می‌آید که از محاسبه میانه این سری زمانی شیب خط روند (Q_{med}) به دست می‌آید. مقدار مثبت Q_{med} حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان دهنده نزولی بودن روند است. در این پژوهش محاسبه ضرایب همبستگی و استخراج معادلات رگرسیون چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

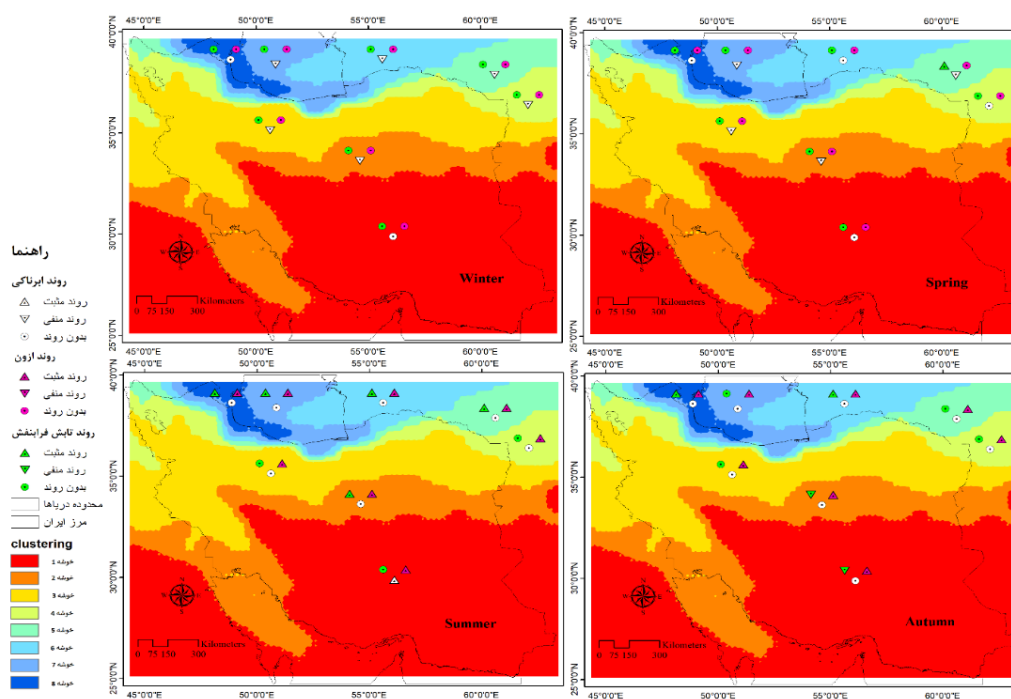
۴- نتایج و بحث

۴-۱ مقیاس فصلی

در این پژوهش تغییرات سالانه تابش فرابنفش ($UV-VIS_{200-440}$)، ازون کلی و ابرناکی در طول دوره‌ی آماری ۴۲ ساله، در ۸ خوشه در محدوده مورد مطالعه بررسی شد و وجود یا عدم وجود روند با استفاده از آزمون من-کندال مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به شکل ۵ در فصل زمستان تغییرات میزان ابرناکی در تمام خوشه‌های مورد بررسی منفی بوده است اما این روند کاهشی به جز در خوشه‌های ۱ و ۸ در سایر خوشه‌ها معنی‌دار بوده است. در رابطه با ازون کلی و $UV-VIS_{200-440}$ روند معنی‌داری در هیچ‌کدام از خوشه‌ها در فصل زمستان وجود نداشت. تغییرات میزان ابرناکی در فصل بهار نیز در تمام خوشه‌ها کاهشی بوده است اما فقط در خوشه‌های ۲، ۳، ۵ و ۷ این روند کاهشی معنی‌دار بوده است. تغییرات $UV-VIS_{200-440}$ در فصل بهار در تمام خوشه‌ها افزایشی است اما فقط در خوشه ۵ این روند معنی‌دار است و در فصل بهار هیچ‌گونه روند معنی‌داری در رابطه با میزان ازون کلی وجود ندارد. تنها روند معنی‌دار موجود در میزان ابرناکی در فصل تابستان مربوط به خوشه ۱ است که می‌تواند مربوط به مناطق جنوب شرقی ایران و پدیده مونسون باشد. تغییرات ابرناکی در خوشه‌های شمالی (۸، ۷ و ۶) کاهشی است اما روند معنی‌دار نیست. تغییرات $UV-VIS_{200-440}$ فصل تابستان در خوشه‌های ۲، ۵، ۶، ۷ و ۸ دارای روند افزایشی معنی‌دار است و میزان ازون کلی در فصل تابستان در تمام خوشه‌ها روند افزایشی معنی‌دار داشته است. همچنین روند ازون کلی در فصل پاییز در تمام خوشه‌ها به‌طور معنی‌دار افزایش یافته است. $UV-VIS_{200-440}$ در خوشه‌های ۸ و ۶ روند افزایشی و در خوشه‌های ۱ و ۲ کاهشی بوده است و در سایر خوشه‌ها روندی مشاهده نشد. بررسی داده‌های ابرناکی نشان می‌دهد که در فصل پاییز میزان ابرناکی در خوشه‌های ۶ و ۸ کاهش یافته است. هر چند این کاهش روند معنی‌داری ندارد اما به نظر می‌رسد علت افزایشی بودن روند $UV-VIS_{200-440}$ در این خوشه‌ها، کاهش ابرناکی باشد. همچنین علت روند کاهشی تابش تجمعی $UV-VIS_{200-440}$ در خوشه‌های ۱ و ۲ در فصل پاییز روند افزایشی ازون کلی می‌باشد زیرا طبق جدول ۳ در این دو خوشه روند افزایشی ازون کلی شیب بیشتری نسبت به سایر خوشه‌ها دارد.

نتایج ضرایب همبستگی (r) تابش با ازون و ابرناکی (جدول ۴) نیز نشان داد r مربوط به $UV-VIS_{200-440}$ و ابرناکی بسیار بیشتر از $UV-VIS_{200-440}$ و ازون کلی است. در مجموع، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به ابرناکی و $UV-VIS_{200-440}$ است. بیشترین ضریب همبستگی ابرناکی و $UV-VIS_{200-440}$ مربوط به فصل پاییز و بهار که دارای درصد بالایی از ابرناکی است می‌باشد و کمترین ضریب همبستگی ابرناکی و $UV-VIS_{200-440}$ مربوط به فصل زمستان است که می‌تواند مربوط به کاهش تابش فرابنفش به دلیل مایل بودن زاویه تابش

خورشید در فصل زمستان باشد. بیشترین همبستگی ازون با تابش فرابنفش مربوط به فصل تابستان در خوشه ۶ است که به دلیل ابرناکی بسیار کم در این فصل در مناطق کویری میزان تابش فرابنفش نسبت به فصول دیگر بیشتر تحت تأثیر تغییرات ازون و زوایای سمت‌الرأس کمتر بوده است. کمترین ضرایب همبستگی ازون و UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ مربوط به فصل زمستان و پاییز است. این نتایج با نتایج دیو پریز^۱ و همکاران نیز که در سال ۲۰۱۹ به بررسی ارتباط بین تابش فرابنفش خورشیدی (UV) و ازون پرداختند هم سو است. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین ضریب R^2 بین ازون و تابش فرابنفش مربوط به شرایط آسمان صاف به مقدار ۰/۴۵ بود.



شکل ۵- روند فصلی تابش فرابنفش روزانه (UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀)، ازون کلی و ابرناکی در خوشه‌های مورد مطالعه

جدول ۱- آماره سطح معنی‌داری (آزمون من-کندال) و شیب Sen میانگین‌های فصلی تابش فرابنفش (۱۹۷۹-۲۰۲۰)

Cluster\Test	Winter		Spring		Summer		Autumn		
	p-value	Sen's slope Kj/m ² .year	p-value	Sen's slope Kj/m ² .year	p-value	Sen's slope Kj/m ² .year	p-value	Sen's slope Kj/m ² .year	
Cluster 1	0.530	0.444	0.696	0.200	0.747	-0.045	<	0.0001	-0.906
Cluster 2	0.135	0.696	0.053	0.852	0.016	0.182	0.001	0.001	-0.865
Cluster 3	0.948	-0.073	0.222	0.975	0.474	0.164	0.095	0.095	-0.612
Cluster 4	0.329	-0.646	0.233	1.127	0.075	0.707	0.588	0.588	-0.202
Cluster 5	0.795	-0.138	0.022	1.402	0.046	1.007	0.802	0.802	0.093
Cluster 6	1.000	-0.002	0.076	1.994	0.008	1.871	0.020	0.020	0.546
Cluster 7	0.172	0.517	0.054	1.893	0.023	2.226	0.072	0.072	0.803
Cluster 8	0.729	-0.315	0.146	1.931	0.044	2.860	0.009	0.009	1.282

جدول ۲- آماره سطح معنی‌داری (آزمون من-کندال) و شیب Sen (درصد در سال) میانگین‌های فصلی ابرناکی (۱۹۷۹-۲۰۲۰)

Cluster\Test	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	p-value	Sen's slope Percent/year	p-value	Sen's slope Percent/year	p-value	Sen's slope Percent/year	p-value	Sen's slope Percent/year
Cluster 1	0.435	-0.1	0.258	-0.1	0.041	0.0	0.270	0.1
Cluster 2	0.046	-0.1	0.014	-0.1	1.000	0.0	0.307	0.0
Cluster 3	0.018	-0.2	0.032	-0.1	0.153	0.0	0.518	0.1
Cluster 4	0.003	-0.3	0.076	-0.1	0.791	0.0	0.897	0.0
Cluster 5	0.048	-0.2	0.022	-0.1	0.745	0.0	0.845	0.0
Cluster 6	0.027	-0.2	0.114	-0.1	0.260	-0.1	0.269	-0.1
Cluster 7	0.005	-0.2	0.042	-0.2	0.410	-0.1	0.179	-0.1
Cluster 8	0.056	-0.1	0.091	-0.1	0.242	-0.1	0.072	-0.1

جدول ۳- آماره سطح معنی‌داری (آزمون من-کندال) و شیب روند Sen (دابسون در سال) میانگین‌های فصلی ازون کلی (۱۹۷۹-۲۰۲۰)

Cluster\Test	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	p-value	Sen's slope (Du/year)	p-value	Sen's slope (Du/year)	p-value	Sen's slope (Du/year)	p-value	Sen's slope (Du/year)
Cluster 1	0.752	0.097	0.280	0.169	< 0.0001	0.314	< 0.0001	0.244
Cluster 2	0.986	0.001	0.583	0.094	< 0.0001	0.301	< 0.0001	0.253
Cluster 3	0.965	-0.002	0.828	0.029	0.000	0.249	0.000	0.214
Cluster 4	0.850	0.031	0.713	-0.034	0.002	0.216	0.002	0.199
Cluster 5	0.816	0.052	0.423	-0.086	0.006	0.219	< 0.0001	0.216
Cluster 6	0.853	0.019	0.696	-0.057	0.003	0.218	0.004	0.211
Cluster 7	0.828	0.029	0.862	-0.025	0.003	0.211	0.002	0.201
Cluster 8	0.931	0.013	0.948	-0.017	0.030	0.202	0.006	0.174

جدول ۴- ضرایب همبستگی فصلی بین تابش فرابنفش تجمعی روزانه با ازون کلی (TCO) و ابرناکی (CF)

Clusters	and CF UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀				and TCO UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀			
	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn
Cluster 1	-0.78	-0.91	-0.69	-0.83	0.2	-0.37	0.24	-0.4
Cluster 2	-0.77	-0.91	-0.54	-0.86	0.03	-0.43	0.24	-0.43
Cluster 3	-0.56	-0.92	-0.7	-0.93	-0.13	-0.48	0.13	-0.49
Cluster 4	-0.49	-0.91	-0.77	-0.94	-0.12	-0.48	0.31	-0.44
Cluster 5	-0.66	-0.9	-0.82	-0.91	-0.23	-0.44	0.41	-0.33
Cluster 6	-0.7	-0.9	-0.88	-0.83	-0.31	-0.41	0.58	-0.19
Cluster 7	-0.69	-0.89	-0.89	-0.88	-0.34	-0.37	0.52	-0.11
Cluster 8	-0.69	-0.87	-0.89	-0.92	-0.28	-0.34	0.39	-0.05

در جدول ۵ روابط رگرسیون خطی چند متغیره مربوط به خوشه‌های مورد مطالعه در هر فصل ارائه شده است. در این روابط واحد ابرناکی بر حسب صدم، ازون کلی بر حسب دابسون و تابش فرابنفش بر حسب کیلوژول بر مترمربع بر روز است.

جدول ۵- معادلات رگرسیون خطی چندمتغیره مربوط به تابش فرابنفش ($UV-VIS_{200-440}$)، ازون کلی TOC و

ابرنیکی CF در مقیاس فصلی

Clusters	Winter	Spring
Cluster 1	$1889.081 + UV-VIS_{200-440} = 0.279TCO - 679.4CF$	$UV-VIS_{200-440} = -0.217TCO - 854.13CF + 3074.946$
Cluster 2	$UV-VIS_{200-440} = 0.224TCO - 627.436CF + 1738.858$	$UV-VIS_{200-440} = -0.02TCO - 909.195CF + 2953.504$
Cluster 3	$UV-VIS_{200-440} = 0.147TCO - 457.288CF + 1602.044$	$UV-VIS_{200-440} = 0.142TCO - 1051.38CF + 2910.157$
Cluster 4	$UV-VIS_{200-440} = 0.182TCO - 399.716CF + 1440.785$	$UV-VIS_{200-440} = 0.412TCO - 1285.659CF + 2849.056$
Cluster 5	$UV-VIS_{200-440} = -0.006TCO - 407.444CF + 1415.160$	$UV-VIS_{200-440} = 0.117TCO - 1178.85CF + 2905.706$
Cluster 6	$UV-VIS_{200-440} = -0.151TCO - 416.739CF + 1420.317$	$UV-VIS_{200-440} = 0.212TCO - 1213.679CF + 2742.818$
Cluster 7	$UV-VIS_{200-440} = -0.560TCO - 545.662CF + 1591.753$	$UV-VIS_{200-440} = 0.64TCO - 1280.567CF + 2610.607$
Cluster 8	$UV-VIS_{200-440} = -0.816TCO - 711.382CF + 1711.114$	$UV-VIS_{200-440} = 0.723TCO - 1628.137CF + 2695.511$
	Summer	Autumn
Cluster 1	$UV-VIS_{200-440} = 0.27TCO - 424.669CF + 2944.653$	$UV-VIS_{200-440} = -0.779TCO - 487.195CF + 2407.587$
Cluster 2	$UV-VIS_{200-440} = 0.471TCO - 491.204CF + 2892.395$	$UV-VIS_{200-440} = -0.45TCO - 546.715CF + 2188.832$
Cluster 3	$UV-VIS_{200-440} = 0.781TCO - 673.848CF + 2862.215$	$UV-VIS_{200-440} = -0.086TCO - 635.524CF + 2002.077$
Cluster 4	$UV-VIS_{200-440} = 1.417TCO - 1006.816CF + 2699.712$	$UV-VIS_{200-440} = -0.09TCO - 586.346CF + 1872.791$
Cluster 5	$UV-VIS_{200-440} = 1.603TCO - 1108.187CF + 2618.299$	$UV-VIS_{200-440} = 0.244TCO - 521.511CF + 1668.137$
Cluster 6	$UV-VIS_{200-440} = 2.845TCO - 1230.386CF + 2200.607$	$UV-VIS_{200-440} = 0.295TCO - 562.612CF + 1598.888$
Cluster 7	$UV-VIS_{200-440} = 3.975TCO - 1295.804CF + 1811.524$	$UV-VIS_{200-440} = 0.182TCO - 835.276CF + 1686.477$
Cluster 8	$UV-VIS_{200-440} = 5.11TCO - 1684.114CF + 1532.337$	$UV-VIS_{200-440} = -0.34TCO - 1078.882CF + 1804.393$

• در معادلات فوق واحد ابرنایی صدم، واحد ازون کلی دابسون و واحد تابش تجمعی کیلو ژول بر مترمربع در روز می‌باشد.

۴-۲- مقیاس سالانه

جدول ۶ مقادیر P -value و شیب مربوط به هر ۳ متغیر برای هر منطقه را در مقیاس سالانه نشان می‌دهد و در شکل ۶ نیز روند تابش فرابنفش، ازون کلی و ابرنایی در هر منطقه، در مقیاس سالانه بر روی نقشه نشان داده شده است. بررسی نتایج تغییرات زمانی تابش فرابنفش ($UV-VIS_{200-440}$) در مقیاس سالانه نشان داد در مناطق ۵، ۶، ۷ و ۸ روند افزایشی معنی‌داری وجود دارد که این چهار خوشه در نوار ساحلی شمال کشور واقع شده‌اند (شکل ۶). در سایر مناطق (۱ تا ۴) روند معنی‌داری در ($UV-VIS_{200-440}$) مشاهده نگردید. بیشترین میزان روند در مقیاس سالانه تابش فرابنفش $UV-VIS_{200-440}$ مربوط به خوشه ۸ است که به میزان

کمترین میزان روند در مقیاس سالانه نیز مربوط به خوشه ۵ و به میزان $1/4 \text{ kJ/m}^2$ در سال افزایش یافت. بیشترین میزان روند در مقیاس سالانه نیز مربوط به خوشه ۵ و به میزان $0/5 \text{ kJ/m}^2$ در سال افزایش یافت.

جدول ۶- آماره سطح معنی داری (آزمون من-کندال) و شیب روند (Sen) میانگین‌های سالیانه تابش، ابرناکی و

ازون کلی (۱۹۷۹-۲۰۲۰)

Cluster/Test	UV-VIS200-440		CF		TCO	
	p-value	Sen's slope Kj/m ² .year	p-value	Sen's slope Percent/year	p-value	Sen's slope (DU/year)
Cluster 1	0.282	-0.206	0.649	0.0	0.010	0.218
Cluster 2	1.000	0.000	0.288	0.0	0.017	0.202
Cluster 3	0.633	-0.065	0.186	0.0	0.190	0.142
Cluster 4	0.401	0.188	0.020	-0.1	0.315	0.111
Cluster 5	0.006	0.513	< 0.0001	-0.1	0.362	0.106
Cluster 6	< 0.0001	1.081	0.002	-0.1	0.333	0.108
Cluster 7	< 0.0001	1.319	0.002	-0.1	0.214	0.104
Cluster 8	< 0.0001	1.435	0.008	-0.1	0.159	0.097

بررسی تغییرات زمانی میزان ابرناکی نیز نشان می‌دهد علت روند افزایشی تابش فرابنفش در مناطق ۵، ۶، ۷ و ۸ احتمالاً مربوط به روند معنی دار کاهش ابرناکی می‌باشد. همچنین در خوشه ۴ نیز روند کاهش در سطح ۹۵ درصد معنی دار است، که اثر آن بر تغییرات زمانی UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ در این خوشه دیده می‌شود. به طوری که در خوشه ۴ با توجه به جدول ۶ تغییرات UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ دارای شیب مثبت و افزایشی است اما این تغییرات افزایشی در طی دوره مورد مطالعه روند معنی داری ندارد. روند کاهش ابرناکی در خوشه‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸، به میزان ۰/۱ درصد به ازای هر سال در کل دوره است.

نتایج بررسی روند تغییرات میانگین ازون کلی سالانه در طول دوره آماری ۴۲ ساله نشان داد تغییرات زمانی میزان ازون کلی در طول دوره آماری در تمام مناطق افزایشی بوده است. اما طبق جدول ۶ تنها در منطقه ۱ و ۲ روند معنی دار افزایشی مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش چن^۱ و همکاران (۲۰۱۹) نیز با نتیجه به دست آمده در این پژوهش مبنی بر افزایشی بودن روند ازون کلی در دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۵، سازگاری دارد.

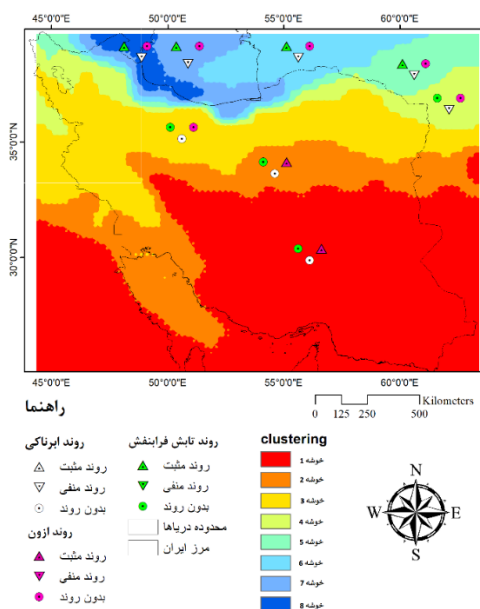
همچنین بررسی سری زمانی ازون کلی نشان داد در ابتدای دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ تغییرات کاهش و سپس افزایشی شده است. بررسی‌ها نشان داد در ۸ خوشه مورد مطالعه از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۰ روند کاهش معنی داری وجود داشته است (جدول ۷). بیشترین مقدار روند مربوط به خوشه ۸ است که میزان ازون کلی ۰/۴ دابسون در سال کاهش یافته است و از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در هر ۸ خوشه روند افزایشی معنی داری وجود دارد. بیشترین مقدار شیب روند ازون کلی مربوط به خوشه ۴ است که به میزان ۰/۶۲۵ دابسون در هر

سال افزایش یافت. نتایج حاضر با گزارش ناسا پل ای نیومن، که ریاست ارزیابی ازون کلی توسط ۳۰۰ دانشمند را بر عهده دارد مطابقت دارد. به طوری که عنوان شده است که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳، سطح ازون کلی در عرض‌های جغرافیایی میانه نیمکره شمالی در حدود ۴ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر تصویب پروتکل مونترال در سال ۱۹۸۷ است که تولید CFC ها و سایر مواد شیمیایی مخرب لایه لایه ازون را ممنوع کرد. این ممنوعیت در سال ۱۹۸۹ اجرا شد. سطح ازون کلی در اواسط دهه ۱۹۹۰ تثبیت شد و در دهه ۲۰۰۰ شروع به بهبود کرد (بانرجی و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۷- آماره سطح معنی داری (آزمون من-کندال) و شیب روند (Sen) سالانه سری زمانی ازون کلی در دو

دوره زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰

Cluster/Test	۱۹۷۹-۲۰۰۰		۲۰۰۱-۲۰۲۰	
	p-value	Sen's slope DU/year	p-value	Sen's slope DU/year
Cluster 1	0.001	-0.283	0.001	0.532
Cluster 2	0.024	-0.268	0.000	0.595
Cluster 3	< 0.0001	-0.357	0.001	0.586
Cluster 4	< 0.0001	-0.367	0.002	0.601
Cluster 5	< 0.0001	-0.391	0.001	0.625
Cluster 6	< 0.0001	-0.417	0.001	0.608
Cluster 7	< 0.0001	-0.423	0.003	0.620
Cluster 8	0.018	-0.446	0.000	0.578



شکل ۶- روند سالانه میانگین تابش فرابنفش، ازون کلی و ابرناکی در خوشه‌های مورد مطالعه

همچنین با توجه به جدول ۸ ضریب همبستگی بین مقادیر UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ با ابرناکی و ازون کلی نشان می‌دهد که میزان همبستگی داده‌های UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ و ابرناکی، به خصوص در مناطق ۷ و ۸ با حدود ۰/۶۵، بیشتر از همبستگی مربوط به UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ با ازون کلی است. بیشترین ضریب همبستگی ابرناکی مربوط به خوشه ۸ و کمترین مربوط به خوشه ۲ بود که به ترتیب در مناطقی واقع شده‌اند که بیشترین و کمترین ابرناکی را دارد. افزون بر این، معادلات رگرسیون خطی چند متغیره در هر خوشه در مقیاس سالانه در جدول ۸ مشاهده می‌شود. از این معادلات می‌توان برای تخمین مقادیر تابش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ در مقیاس سالانه استفاده نمود. در معادلات رگرسیون ابرناکی بر حسب صدم، ازون کلی بر حسب دابسون و تابش فرابنفش بر حسب کیلوژول بر مترمربع در روز است.

جدول ۸- مقایسه ضرایب همبستگی بین تابش فرابنفش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ با ازون کلی (TCO) و ابرناکی (CF) و معادلات رگرسیون خطی در مقیاس سالانه (۱۹۷۹-۲۰۲۰)

Clusters	Correlation UV/ozone	Correlation UV/cloud	Linear Regression
Cluster 1	-0.069	-0.754	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.25TCO-735CF+2531.57
Cluster 2	-0.177	-0.672	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.067TCO-656.924CF+2402.92
Cluster 3	-0.250	-0.702	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.037TCO-702.979CF+2372.45
Cluster 4	-0.153	-0.688	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.117TCO-708.424CF+2265.746
Cluster 5	-0.033	-0.763	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.417TCO-758.377CF+2117.448
Cluster 6	0.041	-0.738	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.762TCO-796.358CF+1955.643
Cluster 7	0.051	-0.802	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.786TCO-881.785CF+1937.141
Cluster 8	-0.054	-0.806	UV-VIS ₂₀₀₋₄₄₀ =0.532TCO-1093.942CF+2049.134

۵- نتیجه‌گیری

بررسی روند در سری زمانی تابش فرابنفش (انتگرال کلی تابش فرابنفش از طول موج ۲۰۰ تا ۴۴۰ نانومتر مربوط به دوره آماری (۱۹۷۹-۲۰۲۰) نشان داد میانگین تابش فرابنفش در مقیاس فصلی در فصل تابستان و پاییز در نیمه شمالی دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده است و متناسب با آن روند ابرناکی در این فصول در نیمه شمالی کاهش یافته است اما معنی‌دار نبوده است. در فصل پاییز در نیمه جنوبی کشور شامل استان‌های سیستان بلوچستان، هرمزگان، بوشهر، فارس، کرمان، خراسان جنوبی، خلیج فارس و بخشی از خوزستان (خوشه ۱ و ۲) روند کاهشی در میزان تابش فرابنفش دیده شد. علت روند کاهشی مناطق یک و دو روند افزایشی ازون کلی می‌باشد زیرا طبق جدول ۳ در این دو خوشه روند افزایشی ازون کلی شیب بیشتری نسبت به سایر مناطق دارد. این نتیجه‌گیری با نتایج سلاگ و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر افزایش غلظت ازون

کلی در اعتدالین تطابق دارد. همچنین ابرناکی نیز در این مناطق تغییرات افزایشی داشته است اما روند معنی‌دار ندارد.

در مقیاس سالانه نیز در مناطق شمالی کشور تابش فرابنفش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ دارای روند مثبت می‌باشد اما در سایر مناطق روند معنی‌دار سالانه مشاهده نشد. این روند مثبت ناشی از روند منفی میزان ابرناکی در این مناطق می‌باشد. روند کاهشی ابرناکی در بخش‌های شمالی و شمال غربی کشور (خوشه ۵، ۶، ۷، ۸) به میزان ۰/۱ درصد به ازای هر سال در کل دوره است و بیشترین میزان روند در مقیاس سالانه تابش فرابنفش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ مربوط به خوشه ۸ است که به میزان $1/4 \text{ kJ/m}^2$ در سال افزایش یافت. کمترین میزان روند معنی‌دار نیز مربوط به خوشه ۵ و به میزان $0/5 \text{ kJ/m}^2$ در سال افزایش یافت.

نتایج بررسی آمار ۴۲ ساله داده‌های باز تحلیل ERA5 نشان داد مقدار ازون کلی (TCO) از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۰ شاهد روند کاهشی معنی‌داری در هر ۸ خوشه مورد مطالعه بوده است که بیشترین مقدار شیب روند مربوط به خوشه ۸ است (با $0/4$ دابسون کاهش در سال). برخلاف حالت قبل، تمام مناطق در سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۲۰ روند افزایشی معنی‌دار ازون را تجربه نموده‌اند. بیشینه شیب روند افزایشی ازون کلی مربوط به خوشه ۴ است که به میزان $0/625$ دابسون در هر سال افزایش را نشان می‌دهد.

نتایج این پژوهش نشان داد به‌طور کلی تابش فرابنفش با ابرناکی همبستگی بیشتری نسبت به ازون کلی دارد که این نتایج با نتایج مطالعه سمدلی و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر معنی‌دار نبودن همبستگی ازون و تابش فرابنفش مطابقت دارد. فانتولکیس و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتیجه گرفتند تغییرات درازمدت در UV عمدتاً ناشی از تغییرات در غلظت آئروسول‌ها، ابرناکی و آلبیدو سطح است، درحالی‌که تغییرات در مقدار ازون کلی نقش کمتری در تغییرات درازمدت UV دارد.

ذکر این نکته نیز ضروریست که همبستگی ضعیف ازون کلی با تابش فرابنفش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ در پژوهش حاضر ممکن است به دلیل لحاظ شدن بخشی از طول‌موج‌های مرئی (400 تا 440 نانومتر) در داده‌های UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ حاصل از خروجی ERA5 باشد (زیرا تغییرات ازون کلی تأثیری بر شدت تابش در این محدوده طیف مرئی ندارد).

به‌طور کلی در دوره آماری مورد مطالعه به‌جز مناطق خشک و کویری که به‌صورت کلی ابرناکی بسیار کم است، در سایر مناطق ابرناکی روند کاهشی داشت و تابش فرابنفش UV-VIS₂₀₀₋₄₄₀ حتی با وجود روند افزایشی ازون کلی در دو دهه اخیر از روند افزایشی پیروی نموده است. در این پژوهش تأثیر غلظت ذرات آئروسول بر تابش دریافتی در سطح زمین مورد ارزیابی قرار نگرفت، که با توجه به گسترش دو دهه اخیر خشکسالی در کشور و افزایش فراوانی روزهای همراه با گردوغبار، بررسی تأثیرگذاری این پدیده در مطالعات بعدی ضرورت دارد.

کتابنامه

- رستم پور، نیما؛ الماسی، تینوش؛ رستم پور، معصومه؛ بیات، حسنا؛ کریمی، سعیده؛ ۱۳۹۱. بررسی میزان شدت پرتوهای فرابنفش خورشیدی نوع A در شهر همدان. *مجله دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان*. شماره ۴، ۶۹-۷۴. <https://www.sid.ir/paper/17263/fa>.
- سبزی پرور، علی اکبر، سیف زاده مؤمن سرایی، علیرضا؛ ۱۴۰۰. برآورد تابش فرابنفش تجمعی روزانه UVA و سازگاری آن با برخی عوامل مؤثر - مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران. *نشریه اطلاعات جغرافیایی سپهر*، دوره ۳۰، شماره ۱۱۸، ۱۶۹-۱۸۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246148>
- سبزی پرور، علی اکبر، سیف زاده مؤمن سرایی، علیرضا؛ ۱۴۰۰. واکاوی تأثیر ابرناکی بر تابش فرابنفش تجمعی روزانه UVB در مناطق خشک و نیمه خشک ایران. *آب و خاک*، دوره ۳۵، شماره ۲، ۲۸۵-۲۹۷. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.15010.0>
- فرج زاده اصل، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف، اردشیری کلهر، مهدی؛ ۱۳۹۳. تحلیل تغییرات تابش فرابنفش در منطقه اصفهان. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. سال اول، شماره پیاپی ۲، ۹۳-۱۰۵. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2456-fa.html>
- موقری، علیرضا؛ خسروی، محمود؛ ۱۳۹۳. محاسبه، ارزیابی و تحلیل توزیع مکانی شاخص پرتو فرابنفش در گستره ایران. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، دوره ۱۴، شماره ۳۴، ۲۱۳-۱۹۵. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2105-fa.html>
- Aun M, Eerme K, Ansko I, Aun, M., 2019. Daily, seasonal, and annual characteristics of UV radiation and its influencing factors in Tõravere, Estonia, 2004–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, 138: 887-897. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02865-1>.
- Banerjee A, Fyfe JC, Polvani LM, Waugh D, Chang KL., 2020. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. *Nature*, 579: 544-548. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2120-4>.
- Bernhard G, Stierle S., 2020. Trends of UV radiation in Antarctica. *Atmosphere*, 8: 795. <https://doi.org/10.3390/atmos11080795>.
- Chen X, Zhong B, Huang F, Wang X, Sarkar S, Jia S, Deng X, Chen D, Shao M., 2020. The role of natural factors in constraining long-term tropospheric ozone trends over Southern China. *Atmospheric Environment*, 220:117060. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117060>.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer DP, Bechtold P., 2011. The ERA- Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*; 137:553-97. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Douglass A, Fioletov V, Godin-Beekmann S, Müller R, Stolarski RS, Webb A, Yang ES., 2011. Stratospheric ozone and surface ultraviolet radiation. *World Meteorological Organization*. 1-80. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/163132>.
- Du Preez DJ, Ajtici JV, Bencherif H, Bègue N, Cadet JM, Wright CY., 2019. Spring and summer time ozone and solar ultraviolet radiation variations over Cape Point, South Africa. In *Annales Geophysicae*, 37: 129-141. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-129-2019>.

- Fountoulakis I, Diémoz H, Siani AM, Laschewski G, Filippa G, Arola A, Zerefos CS., 2020. Solar UV irradiance in a changing climate: Trends in Europe and the significance of spectral monitoring in Italy. *Environments*, 7: 1. <https://doi.org/10.3390/environments7010001>.
- Fountoulakis I, Zerefos CS, Bais AF, Kapsomenakis J, Koukouli ME, Ohkawara N, Webb AR., 2018. Twenty-five years of spectral UV-B measurements over Canada, Europe, and Japan: Trends and effects from changes in ozone, aerosols, clouds, and surface reflectivity. *Comptes Rendus Geoscience*, 7: 393-402. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.07.011>.
- Glandorf M, Arola A, Bais A, Seckmeyer G., 2005. Possibilities to detect trends in spectral UV irradiance. *Theoretical and applied climatology*, 81: 33-44. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0109-9>.
- Raksat R, Sri-Iesaranusorn P, Pemcharoen J, Laiwarin P, Buntoung S, Janjai S, Chuangsuwanich E., 2021. Accurate surface ultraviolet radiation forecasting for clinical applications with deep neural network. *Scientific reports*, 11: 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84396-2>.
- Sabziparvar AA, Shine KP, Forster PM., 1999. A model- derived global climatology of UV irradiation at the earth's surface. *Photochemistry and photobiology*, 69:193-202. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1999.tb03273.x>.
- Smedley AR, Rimmer JS, Moore D, Toumi R, Webb AR., 2012. Total ozone and surface UV trends in the United Kingdom: 1979–2008. *International journal of climatology*, 32: 338-346. <https://doi.org/10.1002/joc.2275>.
- Szeląg ME, Sofieva VF, Degenstein D, Roth C, Davis S, Froidevaux L., 2020. Seasonal stratospheric ozone trends over 2000–2018 derived from several merged data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20: 7035-7047. <https://doi.org/10.5194/acp-20-7035-2020>.
- Williamson CE, Zepp RG, Lucas RM, Madronich S, Austin AT, Ballaré CL, Bornman JF., 2014. Solar ultraviolet radiation in a changing climate. *Nature Climate Change*, 4: 434-441. <https://doi.org/10.1038/nclimate2225>.
- WMO, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME., 2007, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 50 https://wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2006/ozone_asst_report.html.
- Xia Y, Hu Y, Huang Y, Bian J, Zhao C., 2021. Stratospheric ozone loss-induced cloud effects lead to less surface ultraviolet radiation over the Siberian Arctic in spring. *Environmental Research Letters*, 1611: 084057. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac18e9>.

