

مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هشتم، شماره بیست و دوم، زمستان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

تاریخ بازنگری اولیه مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲

صفحات: ۲۲۸ - ۲۱۳

## پایش ماهواره‌ای تغییرات لایه‌ی اُزون در اتمسفر ایران

کوهزاد رئیس پور<sup>۱\*</sup>، حسین عساکره<sup>۲</sup>

### چکیده

با توجه به اهمیت حیاتی لایه‌ی اُزون و سیر صعودی افزایش عوامل تخریب کننده‌ی آن طی دهه‌های اخیر، ضرورت مطالعه‌ی لایه‌ی اُزون به منظور آگاهی از وضعیت آن در اتمسفر ایران، بیش از گذشته معلوم می‌گردد. طی سالهای اخیر تکنیکها و روشهای متعددی جهت پایش این گاز حیاتی در اتمسفر کره زمین به کار گرفته شده‌است. اما در این میان، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به دلیل در دسترس بودن و دارا بودن قابلیت‌هایی از قبیل قدرت تفکیک مکانی، زمانی و طیفی بالا، کاربرد گسترده‌ای پیدا نموده‌است. در این مطالعه نیز از داده‌های اُزون جمع‌آوری شده توسط سنجنده‌ی AIRS مستقر بر روی ماهواره‌ی AQUA که امکان بررسی روند تغییرات اُزون را در اتمسفر تمامی نقاط دنیا از جمله ایران فراهم نموده استفاده شده‌است. داده‌های مربوطه با فرمت NetCDF و با گامهای زمانی یک روزه و مکانی  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  طی دوره‌ی آماری ۱۵ ساله (۲۰۱۷ - ۲۰۰۳) از وبگاه مربوطه استخراج و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و Grads پردازش، بارسازی، تجزیه و تحلیل گردید. نتایج حاصله بیانگر افت سالانه‌ی اُزون در اتمسفر ایران بوده‌است. در میان فصول، بیشترین و کمترین میزان اُزون به ترتیب در فصول بهار و پاییز و به لحاظ ماهانه بیشترین و کمترین میزان اُزون به ترتیب در ماههای مارس و اکتبر اتفاق افتاده‌است. به لحاظ مکانی نیز با حرکت از جنوب به سمت شمال، تقریباً به طور یکنواخت بر میزان اُزون افزوده می‌گردد. به‌طوری که بیشترین مقدار میانگین اُزون کلی ستونی (TOC) در دشت پارس‌آباد (۳۱۸ دابسون) و کمترین مقدار آن در ناحیه‌ی به هم پیوسته‌ای از استانهای هرمزگان، کرمان و فارس و بخشی از جنوب‌شرق ایران (۲۸۳ دابسون) مشاهده‌شد. حداکثر تراکم اُزون (اُزونسفر) نیز در ارتفاع ۲۷ تا ۴۰ کیلومتری اتمسفر آشکار گردید.

واژگان کلیدی: پایش ماهواره‌ای، لایه‌ی اُزون، AIRS، اتمسفر، ایران

Raispour@znu.ac.ir

asakereh@znu.ac.ir

<sup>۱</sup>- استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup>- استاد، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان

## مقدمه

آزون<sup>۱</sup> کلمه‌ی یونانی است که به معنی بو و بالاخص به بوی تند اطلاق می‌شود. آزون (O<sub>3</sub>) مولکولی با سه اتم اکسیژن (O) و مولکول اکسیژن (O<sub>2</sub>) دارای دو اتم اکسیژن می‌باشد. اما اختلاف یک اتم اکسیژن در میان این دو مولکول تفاوت‌های اساسی را در بین آنها به وجود آورده‌است (فیولیتو و همکاران، ۲۰۰۲). در استراتوسفر مولکول‌های تازه‌ی آزون مدام با واکنش‌های شیمیایی و دریافت انرژی لازم از پرتوهای خورشید، به مولکول و اتم اکسیژن تجزیه می‌شوند. این اتم‌های اکسیژن که بسیار فعالند، طی مدت زمان کوتاهی یعنی کمتر از کسر ثانیه، از هم جدا و به مولکول‌های اکسیژن متصل می‌شوند و تشکیل مولکول‌های سه اتمی اکسیژن، یعنی آزون را می‌دهند (گالیانی و همکاران، ۲۰۰۲). غیر از این چرخه‌ی طبیعی، طی واکنش‌هایی با ازت و هیدروژن و کلر تولید شده در سطح و رها شده به اتمسفر، از بین می‌رود. گرچه آزون یکی از گازهای مهم جوی بوده ولی مقدار کمی از این گاز در جو وجود دارد به طوری که اگر تمام مولکول‌های آزون موجود در اتمسفر را فشرده نماییم تنها لایه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر از آزون را تشکیل خواهد داد که معادل ۳۰۰ واحد دابسون است (لالونگو، ۲۰۰۸). فراوانی آزون در بالای سطح زمین در هر محلی با کل ستون آزون<sup>۲</sup> اندازه‌گیری می‌شود. کل ستون آزون<sup>۳</sup> اغلب به صورت عمقی که تنها آزون در دما و فشار شرایط استاندارد<sup>۴</sup> یعنی فشار ۱ اتمسفر و دمای صفر درجه سانتیگراد اشغال می‌کند بیان می‌شود (کاسم، ۲۰۰۹). این عمق بر اساس واحد دابسون<sup>۵</sup> ارائه می‌شود. بنابراین واحد دابسون (سنجش از دور) روش استاندارد برای بیان کردن مقادیر گاز آزون در اتمسفر بوده و هر واحد DU برابر با  $10^{16} \times 2/7$  مولکول آزون در هر سانتیمتر مربع می‌باشد (چیر، ۲۰۰۵). با این وجود توزیع آزون در تمامی اتمسفر یکنواخت نمی‌باشد. در حدود ۹۰ درصد از آزون جو در لایه‌ی استراتوسفر (پوش سپهر) قرار دارد که به آزونسفر معروف است (کودیش و همکاران، ۲۰۰۵). این لایه حدود ۱۰ تا ۵۰ کیلومتر ضخامت داشته و در بالای سطح زمین قرار گرفته‌است (کُنسیدن، ۲۰۰۴). اندازه‌گیری‌هایی که بر روی زمین و یا توسط بالون و یا از طریق فضا (سنجش از دور) صورت گرفته، نشان می‌دهد که بیشترین غلظت آزون در ارتفاعی بین ۱۹ تا ۴۸ کیلومتری اتمسفر قرار دارد (کازادزیس و همکاران، ۲۰۰۹). ۱۰ درصد باقیمانده آزون در لایه‌ی زیر آن یعنی تروپوسفر (وردسپهر) که پایین‌ترین لایه در جو است قرار دارد. این لایه جایی است که تمامی تغییرات و پدیده‌های جوی در آن اتفاق می‌افتد (جاکوبسون، ۲۰۰۲). گرچه غلظت آزون بسیار کم بوده و معمولاً مقدار آن چند مولکول به ازای یک میلیون مولکول هوا می‌باشد، ولی همین مقدار اندک برای تداوم زندگی اهمیتی حیاتی دارد (موریلو و همکاران، ۲۰۰۳). این لایه با جذب اشعه‌ی فرابنفش (UV) که برای محیط زیست بسیار خطرناک بوده و از خورشید به زمین می‌تابد، مانع از رسیدن آن به سطح زمین می‌شود. اشعه‌ی فرابنفش که دارای طول موج کوتاه و انرژی زیاد بوده و برای چشم انسان نامرئی است، در طیف الکترومغناطیسی، بین اشعه‌ی ایکس و نور مرئی قرار دارد (مازروت و همکاران، ۲۰۰۲). وجود این اشعه در نور

1 - Ozone  
 2 - Total Ozone Column  
 3 - TOC  
 4 - STP  
 5 - Dobson unit

خورشید باعث آفتاب سوختگی پوست بدن می‌شود. این اشعه طول موجی بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر و به ۳ دسته با طول موج‌های مختلف شامل UVA (315-400 nm)، UVB (280-315 nm) و UVC (100-280 nm) تقسیم‌بندی می‌شود (آنتون و همکاران، ۲۰۰۹). حدود ۹۵ درصد از این اشعه که به سطح زمین می‌رسد از نوع UVA می‌باشد و تقریباً تمامی UVC و حدود ۹۰ درصد UVB قبل از رسیدن به سطح زمین توسط لایه‌ی اُزون، دی‌اکسیدکربن، اکسیژن و بخار آب در اتمسفر جذب می‌گردد (آنتون و همکاران، ۲۰۰۸). در سال‌های اخیر ایجاد آلودگی‌های صنعتی و تولید گازهای گلخانه‌ای سبب کاهش ضخامت لایه‌ی اُزون گردیده‌اند، در نتیجه میزان بیشتری از UVB و UVC از جو زمین عبور نموده و به سطح زمین می‌رسند (سینفیلد و پاندیس، ۲۰۰۶). از آنجائیکه قسمت اعظم اُزون جو در استراتوسفر قرار دارد، این ناحیه از اُزون، ناحیه اُزون استراتوسفری نامیده می‌شود. در مقابل این لایه‌ی اُزون مفید، اُزون تروپوسفری یک آلودگی به حساب آمده و در ردیف گازهای سمی به عنوان مؤلفه‌ی اصلی مه‌دود فتوشیمیایی شناخته می‌شود (سبزی پرور و همکاران، ۱۳۹۲؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۲). اتومبیل‌ها از منابع عمده تولید مه‌دود فتوشیمیایی هستند که مقادیر عظیمی از هیدروکربن‌های سوخته نشده و اکسیدهای نیتروژن، مونواکسیدکربن و گازهای آلی فرار را به عنوان پیش‌سازهای اُزون در وردسپهر آزاد می‌نمایند (بالیز و همکاران، ۲۰۰۶). چون اُزون نقش صافی برای پرتوهای فرابنفش خورشیدی را دارد، کاهش در تراکم آن سبب رسیدن مقدار بیشتری از پرتوهای فرابنفش به زمین می‌شود (کروتزن، ۱۹۹۰). شاید بدترین اثر اُزون در تندرستی انسان به علت پرتوهای فرابنفش که سبب سرطان پوستی می‌شود، باشد (کادلی، ۱۹۷۰). همچنین امکان دارد که کاهش اُزون در اثر یک رشته رویدادهای پیچیده، دمای کلی زمین را تغییر دهد (زینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ دوهیرتی و همکاران، ۲۰۱۳). تخریب و سوراخ شدن لایه‌ی اُزون باعث عبور غیر قابل کنترل تابش فرابنفش خورشیدی گردیده (تامپسون و همکاران، ۲۰۱۱؛ آنتون و همکاران، ۲۰۰۷) و سبب افزایش دمای زمین (بوردی و همکاران ۲۰۱۵)، ذوب یخ‌های قطبی، افزایش سطح آب دریاها و در نهایت به زیر آب رفتن خشکی‌ها می‌انجامد (مک کنز، ۲۰۱۱). این شرایط همچنین موجب سوختگی پوست، ابتلا به سرطان پوست، بیماری‌های چشمی، همچنین وارد آمدن خسارت عمده به جانوران و گیاهان شده و در نهایت باعث به مخاطره افتادن حیات کل موجودات زنده در سطح سیاره‌ی زمین می‌شود (ادواردز، ۲۰۰۳). طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اُزون‌سنجی و ماهواره‌ای در گستره‌ی ایران انجام شده‌است. آروین (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به بررسی اثر عوامل اقلیمی بر تغییرات اُزون کلی در ایستگاه اصفهان پرداخته است. نامبرده بخشی از نوسانات روزانه‌ی اُزون را به الگوهای گردشی جو در سطوح فوقانی و میانی جو مرتبط دانسته و اظهار داشته‌است که فعالیت پویشی جو در فصل سرد، تغییر و نوسان زیاد اُزون کلی را باعث گردیده و پایداری جو در فصل گرم سال، تثبیت مقدار اُزون کلی را در پی دارد. همچنین آروین (۱۳۹۲) در تحقیقی دیگر، به مطالعه‌ی اثر شاخص‌های اقلیمی بر نوسان مقادیر اُزون کلی در ایستگاه اصفهان با استفاده از آمار ماهانه‌ی اُزون کلی ایستگاه اُزون‌سنجی اصفهان و نیز داده‌های بازکاوی شده‌ی پایگاه اقلیمی NCEP/NCAR پرداخت که نتایج نشان داده‌است ارتباط بین شاخص‌های AO و NAO با مقادیر اُزون در ماه‌های سرد سال منفی و در ماه‌های گرم سال مثبت می‌باشد. آروین (۱۳۹۳) سپس با بررسی نوسانات اُزون کلی در گستره‌ی ایران در ارتباط با پدیده ENSO نشان داد که تغییرات مقدار اُزون کلی توسط مدل و شاخص SOI در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در تمام گستره‌ی ایران

به جز ناحیه‌ی کوچکی در شمالغرب ایران معکوس، قوی و معنادار می‌باشد. براساس نظر وی قویترین ضرایب همبستگی در ناحیه‌ی مرکزی، جنوبی و جنوب‌شرقی کشور و ضعیف‌ترین روابط در شمال و شمال‌غرب کشور می‌باشد. همچنین میزان آزون کلی از جنوب به شمال بیشتر می‌باشد که شیب خط در زمان وقوع النینو بیشتر می‌باشد. در پژوهشی دیگر که توسط نامبرده صورت پذیرفت، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای طیف‌سنجی آزون کلی (TOMS)، نوسانات مجموع آزون در گستره‌ی ایران در ارتباط با دمای آب سطح دریا در اقیانوس آرام (SST) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار آزون در زمانی که شاخص‌های دمای سطح آب دریا در اقیانوس آرام (SST) مثبت/منفی باشد مقدار آزون کلی نیز افزایش/کاهش می‌یابد (آروین، ۱۳۹۴). عزتیان و همکاران (۱۳۹۰) نیز براساس مدل‌های آماری (طیف وسیعی از مدل‌های رگرسیونی خطی چندمتغیره) مبتنی بر مقادیر متغیرهای هواشناختی و آلاینده‌های جوّی به پیش‌بینی تغییرات غلظت آزون و ردسپهری در اصفهان در مقیاس‌های زمانی ساعتی و روزانه پرداخته‌اند. نتایج روشن ساخت که بین تغییرات آزون و متغیرهای هواشناختی و آلاینده‌های جوّی همبستگی‌های معنی‌دار وجود دارد. لیکن هیچ‌یک از مدل‌ها توانایی تبیین سهم بزرگی از واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده آزون و ردسپهری در اصفهان را نداشتند. همچنین آنها با استفاده از داده‌هایی که در ایستگاه هواشناسی همدیدی و آلودگی‌سنجی اصفهان اندازه‌گیری می‌شوند اقدام به برآورد آزون سطحی نموده‌اند. بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نیز نشان داد معادله‌ای که شامل دو فرانسج توان دوم تابش آفتاب و توان دوم غلظت گاز منوکسیدکربن می‌باشد قادر است ۳۵ درصد تغییرات غلظت آزون سطحی در طول روز را توجیه نماید (عزتیان و همکاران، ۱۳۹۱). جهت مطالعه بیشتر در خصوص مکانیسم تولید و تخریب آزون (شیمی آزون) و سازوکارهای حاکم بر این فرایند، می‌توان به مطالعات متعددی که توسط محققین مختلفی از جمله (چاپمن، ۱۹۳۰؛ کروتزن، ۱۹۷۰؛ جانستون، ۱۹۷۱؛ مولینا و رولند، ۱۹۷۴؛ فلورز و همکاران، ۲۰۰۰؛ فینلاسیون و پیترز، ۲۰۰۰؛ باست و همکاران، ۲۰۰۷؛ سوزان و همکاران، ۲۰۱۱ و آرنس، ۱۳۹۱) انجام شده است مراجعه نمود.

### پایش ماهواره‌ای آزون

برای آشکارسازی تغییرات لایه‌ی آزون با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیاز است که با چگونگی سنجش گاز آزون با بکارگیری تکنیک‌های سنجش از دور آشنا شویم. تجهیزات ماهواره‌ای و یا تجهیزات مستقر بر روی زمین به فاصله‌ی بسیار دور از آزون استراتوسفری قرار دارند، در حالیکه بالن‌هایی که در ارتفاع بالا پرواز می‌کنند و همچنین هواپیماها معمولاً در داخل خود استراتوسفر قرار می‌گیرند. در هر سکوی ماهواره‌ای از یک یا چند مورد از این تکنیکها استفاده می‌شود. در سنجش از دور مقدار آزون به طور غیرمستقیم و از طریق تغییرات در میزان انرژی تابشی جو که ناشی از حضور آزون است، به دست می‌آید (آتیکسون و همکاران، ۲۰۰۶). بدین معنی که تجهیزات سنجش از دور، تغییرات میزان انرژی تابشی موجود در جو در ناحیه‌ی حرارتی (IR)، ناحیه‌ی مرئی (VIS)، فرابنفش (UV) و ماکروویو (MW) که ناشی از حضور مولکول‌های آزون است را تشخیص می‌دهد (فیستر و همکاران، ۲۰۱۵). سنجنده‌های سنجش از دور بدون توجه به سکویی که بر روی آن قرار گرفته‌اند، آزون را به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کنند. بلکه به جای آن چگونگی تغییرات میزان انرژی تابشی خورشیدی عبوری در باندهای مختلف از جو را اندازه‌گیری و با مقدار واقعی

آن در جو استاندارد مقایسه می‌کند (آگاروال و همکاران، ۲۰۱۳). نکته‌ای که قابل توجه است این است که داده‌های اندازه‌گیری شده توسط این سنجنده‌ها با استفاده از یک الگوریتم مخصوص تبدیل به داده‌های مربوط به اُزون می‌شوند (ریول و همکاران، ۲۰۱۵). به این معنا که داده‌های این سنجنده‌ها برهمکنش اُزون با اشعه عبوری را نشان داده و مستقیماً خود مشخصه اُزون را اندازه‌گیری نمی‌کنند. این الگوریتم‌ها اندازه‌گیری‌های تابشی را تبدیل به مشخصه‌های جوی می‌کنند. برای بررسی و برآورد تغییرات مکانی و زمانی اُزون از تکنیک‌ها و تجهیزات زمینی و ماهواره‌ای متنوعی استفاده می‌گردد (کازورلا و همکاران، ۲۰۱۰؛ دی لات و همکاران، ۲۰۰۵). هر یک از تجهیزات یاد شده مزایا و کاستی‌های متفاوتی دارند، اما برای تجهیزات زمینی بزرگترین کاستی، منطقه‌ای بودن و عدم پوشش جهانی داده‌های آنها می‌باشد (کاندو و همکاران، ۲۰۰۶). داده‌های ماهواره‌ای با پوشش جهانی و در دسترس بودن خود، باعث گردیده‌اند تا در سال‌های اخیر از کاربردهای فراوانی در مطالعه بیوسفر، لیتوسفر و اتمسفر برخوردار گردند. بررسی و مطالعه‌ی اُزون با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در حقیقت از سال ۱۹۷۶ میلادی آغاز گردیده و از آن زمان تاکنون ماهواره‌های متعددی در چرخه‌ی تولید داده‌های ماهواره‌ای اُزون در مدار قرار گرفته‌اند (مباشری، ۱۳۸۶). بنابراین با توجه به استفاده‌ی روزافزون از داده‌های تجهیزات ماهواره‌ای در پایش تغییرات آب و هوا و بسیاری از کاربردهای دیگر، داشتن درک صحیح از چگونگی تولید این داده‌ها و فنون به کار رفته در استخراج اطلاعات مفید از آنها بسیار حائز اهمیت است. طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی در خصوص پایش لایه‌ی اُزون در سطح جهان از داده‌های جمع‌آوری شده توسط سنجنده‌های مختلف که به دفعات جو زمین را پوشش داده و داده‌های اُزون کلی جمع‌آوری شده توسط آنها، امکان بررسی روند تغییرات اُزون در جو تمامی نقاط دنیا از جمله ایران را میسر ساخته است انجام شده‌است (مباشری، ۱۳۸۴). از جمله‌ی این سنجنده‌ها می‌توان به طیف‌سنج کامل نقشه‌برداری اُزون (TOMS) یکی از کارآمدترین ابزارها برای سنجش اُزون اشاره کرد (زیمک و همکاران، ۲۰۰۵). این سنجنده از سال ۱۹۷۹ بر روی ماهواره‌ی Nimbus7 (N7) نصب گردید و عملیات سنجش را تا سال ۱۹۹۴ میلادی ادامه داد. پس از آن در سال ۱۹۹۶ میلادی بر روی ماهواره‌ی Earth Probe (EP) نصب گردید. همچنین داده‌های سنجنده OMI (نصب بر روی ماهواره AURA و از سال ۲۰۰۴ تاکنون)، سنجنده MODIS (نصب بر روی ماهواره‌های TERRA و AQUA و از سال ۲۰۰۲ تاکنون) و همچنین سنجنده AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) که در سال ۲۰۰۲ بر روی ماهواره AQUA نصب گردیده و از آن زمان تاکنون به طور مستمر و به صورت روزانه داده‌های جمع‌آوری شده در خصوص اُزون را در اختیار محققین قرار می‌دهد.

### داده‌ها و روش شناسی

سنجنده‌ی AIRS، یکی از ابزارهایی می‌باشد که با هدف کمک به محققین تغییرات اقلیم و بهبود پیش‌بینی هوا ساخته شده‌است. سنجنده‌ی AIRS یکی از شش سنجنده‌ی ماهواره‌ی AQUA است که در سال ۲۰۰۲ در مدار زمین قرار گرفت. این سنجنده دارای بازه‌ی طیفی بسیار گسترده‌ای بوده و قدرت تفکیک آن دهها برابر بیشتر از ابزارهای مشابه قبل از خود می‌باشد. سنجنده‌ی AIRS می‌تواند با دقت زیادی نمایه‌های قائم دما و رطوبت جو را اندازه‌گیری نموده و

همچنین گازهای گلخانه‌ای همانند آزون، منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و متان را پایش نماید (هاگان و همکاران، ۲۰۰۴) داده‌های این سنجنده کاربرد فراوانی نیز در مطالعه‌ی دمای سطح زمین و سطح دریا، پوشش ابر، نوع ابر و دمای بالای ابر، تابش طول موج بلند، پایش آزون و طول موج زمینی اشعه‌ی فرابنفش و ... دارند. در این تحقیق نیز از داده‌های این سنجنده (IRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval (AIRS-only) degree 1° degree) که مشخصات آن در جدول شماره ۱ آمده است و از وبگاه Earth data با استفاده از لینک [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM\\_006](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM_006) قابل دریافت می‌باشد استفاده شده‌است. داده‌های استخراج شده با فرمت NetCDF پس از کنترل کیفی و پیش‌پردازش، توسط دو نرم افزار کاربردی ArcGIS و Grads مورد پردازش قرار گرفته‌است. NetCDF یا فرمت nc فرمتی از داده‌ها برای نگهداری داده‌های چندبُعدی می‌باشد که با استفاده از امکاناتی که نرم‌افزار ArcGIS در اختیار کاربر قرار می‌دهد با استفاده از ماژول Make NetCDF Raster Layer و همچنین قابلیت‌های گسترده‌ی نرم افزار Grads برای ساخت لایه‌های رستری، وکتوری و جداول اطلاعاتی کاربرد دارند. از طرفی می‌توان نحوه‌ی نمایش این داده‌ها را با انتخاب نوع متغیر یا یکی از ابعاد چهارگانه تغییر داد. داده‌های استخراجی آزون نیز دارای چهار بُعد است. ابعاد این داده‌ها شامل، طول جغرافیایی یا Lon، عرض جغرافیایی یا lat، تراز یا سطح جوی یا lev که شامل هر یک از ۱۴ سطح فوقانی جو (۱۰۰۰ تا ۰/۱ هکتوپاسکال) و بُعد زمان یا time است. هدف از انجام این تحقیق نیز تحلیل مبتنی بر پایش ماهواره‌ای تغییرات لایه‌ی آزون در اتمسفر ایران با استفاده از داده‌های آزون سنجنده‌ی AIRS طی دوره‌ی آماری پانزده ساله (۲۰۱۷ - ۲۰۰۳) می‌باشد که سعی شده است جهت درک هرچه بهتر رفتار زمانی - مکانی لایه‌ی آزون در اتمسفر ایران، نتایج به صورت تصاویر، گراف، نمودار و پروفیل قائم ارائه شود.

جدول ۱: مشخصات فنی و رزولوشن داده‌های سنجنده‌ی AIRS - منبع [disc.gsfc.nasa.gov](https://disc.gsfc.nasa.gov)

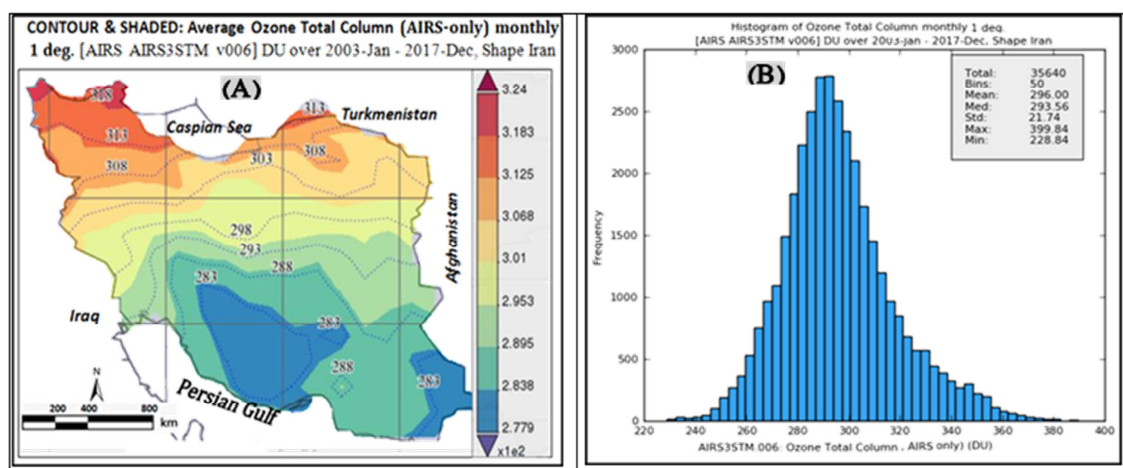
Short name	AIRS3STM
Version	006
Format	- HDF-EOSNetCDF
DOI	10.5067/Aqua/AIRS/DATA321
Spatial Coverage	-180.0,-90.0,180.0,90.0
Temporal Coverage	2002-09-01 to Present
Data Resolution Spatial	1° x 1°
Data Resolution Temporal	Daily and Monthly

## نتایج و بحث

### توزیع مکانی (جغرافیایی) آزون

شکل شماره ۲ پارامترهای آمار توصیفی متغیر آزون را در طول دوره‌ی آماری ۲۰۱۷ - ۲۰۰۳ برای کشور ایران نشان می‌دهد. براساس این شکل، میانگین توزیع آزون کلی ستونی در اتمسفر ایران از جنوب به شمال افزایش می‌یابد. به طوری که کمترین ضخامت آزون کلی ستون جو در عرضهای جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان)

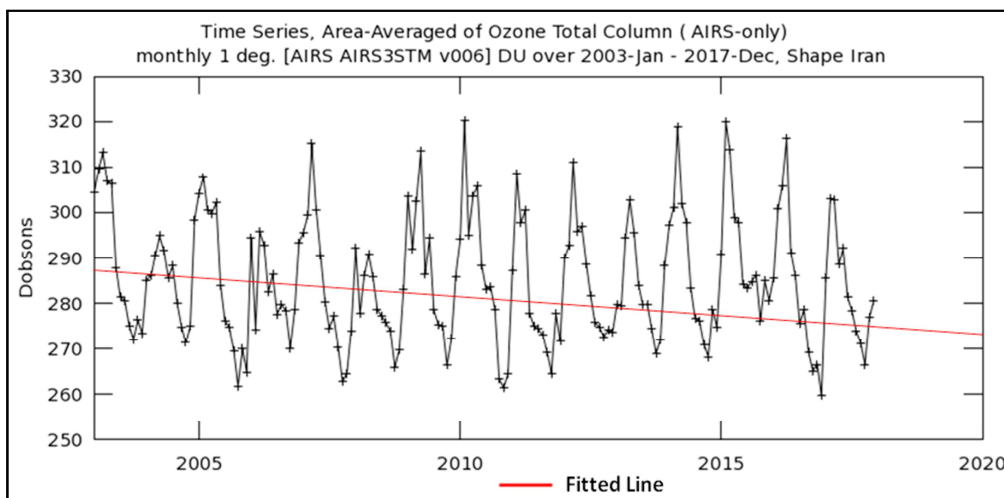
و بیشترین توزیع آن در شمال غرب ایران (در ناحیه پارس‌آباد و بيله‌سوار در مرز آذربایجان) مشاهده می‌شود. براساس این شکل کمترین میانگین اُزون کلی ستونی به میزان کمتر از ۲۸۳ دابسون در دو ناحیه از ایران که یکی به صورت ناحیه‌ی پیوسته‌ای نیمه‌ی غربی استان هرمزگان، شرق استان فارس و جنوب استان کرمان را در برمی‌گیرد و دیگری در جنوب شرق ایران (سیستان و بلوچستان) حاکم می‌باشد. همچنین بیشینه‌ی اُزون کلی ستونی در اتمسفر ایران به میزان بیش از ۳۱۸ دابسون در ناحیه‌ی پارس‌آباد و بيله‌سوار مشهود می‌باشد. (شکل ۲: A). همچنین در این دوره‌ی آماری میانگین اُزون کلی ستونی در اتمسفر ایران ۲۹۶ دابسون، بیشینه‌ی اُزون کلی ستونی ۳۹۹/۸ دابسون و کمینه‌ی آن ۲۲۸/۸ دابسون و انحراف معیار ۲۱/۷ بوده‌است (شکل ۲: B).



شکل ۲: توزیع اُزون کلی ستونی بر فراز ایران (A) – توصیف آماری توزیع اُزون کلی ستونی بر فراز ایران (۲۰۰۳ – ۲۰۱۷)

### بررسی روند تغییرات اُزون

شکل ۳ نمودار تغییرات سری زمانی اُزون را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ م با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای AIRS نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، میزان اُزون دارای روند کاهشی در طول دوره‌ی آماری بوده‌است و میانگین اُزون در ستون قائم اتمسفر ایران از ۲۸۸ دابسون در سال ۲۰۰۳ به ۲۸۲ دابسون در سال ۲۰۱۷ رسیده‌است. بدین مفهوم که از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ م ۶ دابسون از میزان اُزون کلی ستونی در اتمسفر ایران کاسته شده‌است. میانگین سالانه‌ی اُزون دارای افت‌وخیزهایی می‌باشد که توجه آن را در گردش جو و فعالیت‌های صنعتی می‌توان یافت.



شکل ۳: تغییرات سالانه‌ی آزون کلی ستونی و روند آن بر حسب میانگین ماهانه بر فراز کشور ایران (۲۰۰۳ - ۲۰۱۷)

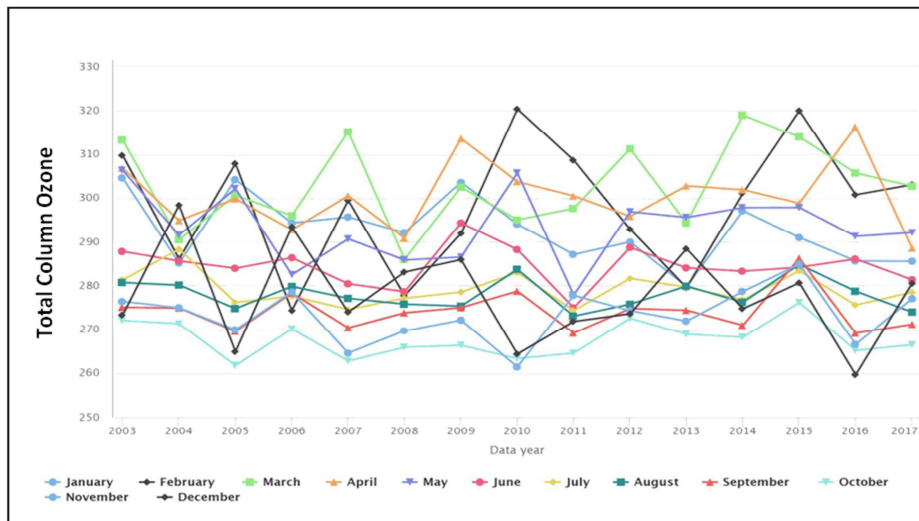
### بررسی تغییرات ماهانه و فصلی آزون

براساس نتایج به دست آمده از آنالیز آماری داده‌های ماهانه‌ی آزون همان‌طوری که گرافهای ماهانه‌ی آزون کلی ستونی اتمسفر ایران در اشکال شماره‌ی ۴ و ۵ نشان می‌دهد، بیشترین میزان آزون به ترتیب شامل ماههای مارس، آوریل و می و کمترین میزان آن در ماههای سپتامبر، اکتبر و نوامبر مشاهده شده‌است. براساس این اشکال میزان آزون در دیگر ماههای سال از قبیل ژوئن، ژولای، اوت، دسامبر، ژانویه و فوریه در حدفاصل ماههای بیشینه (مارس، آوریل و می) و ماههای کمینه (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) بوده‌است. در این میان می‌توان به مقادیر بیشینه‌ی آزون در آوریل ۲۰۰۶ (۳۱۶ دابسون)، مارس ۲۰۰۷ (۳۱۶ دابسون) و مارس ۲۰۱۴ حدود ۳۱۹ دابسون اشاره کرد. از سویی دیگر کمینه‌ی آزون در اکتبر ۲۰۰۵ به میزان ۲۶۲ دابسون و در اکتبر ۲۰۱۰ به ۲۶۱ دابسون افت پیدا کرده‌است.

همچنین آنالیز حاصل از میزان آزون کلی ستون جو در فصول چهارگانه ایران بیانگر بیشترین میزان آزون کلی جو در فصل بهار (ماههای مارس، آوریل و می) و کمترین میزان آن مربوط به فصل پاییز (ماههای سپتامبر، اکتبر و نوامبر) بوده‌است (شکل ۶). البته نکته قابل تأمل در این خصوص، افت قابل ملاحظه میزان آزون در فصول پاییز و تابستان در اتمسفر ایران می‌باشد که همزمانی این فصول با بیشینه‌ی تابش ورودی خطرناک فرا بنفش، شرایط حاکم را هشدار دهنده می‌نماید. این نتایج با بیشینه و کمینه‌ی آزون فصلی در پهنه‌ی جهانی کاملاً منطبق می‌باشد. اشکال شماره‌ی ۷ و ۸ میزان آزون را برای فصول بهار (MAM)، تابستان (JJA)، پاییز (SON) و زمستان (DJF) نشان می‌دهد. براساس این اشکال میزان آزون کلی ستون جو به ترتیب از بیشترین به کمترین میزان فصلی شامل فصل بهار (MAM)، زمستان (DJF)، تابستان (JJA) و پاییز (SON) می‌باشد. در مناطقی همچون شمالغرب (آذربایجان غربی)، دامنه‌ی جنوبی رشته‌کوههای البرز (تهران) و جنوب ایران (استانهای هرمزگان، کرمان و فارس) آنومالی‌هایی (تمرکز بیشینه‌ای) در توزیع آزون دیده می‌شود که توجیه آن را در الگوهای گردشی جو و فعالیت‌های صنعتی می‌توان یافت.

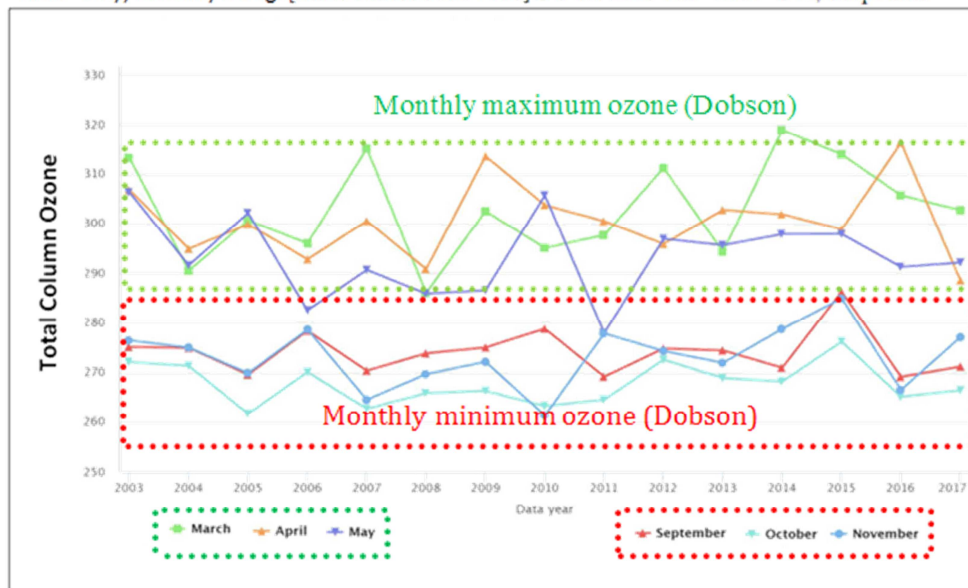
البته در فصول تابستان و پاییز توزیع اُزون از شرایط یکنواخت‌تری برخوردار بوده و میزان آن از دیگر فصول کمتر می‌باشد. بنابراین میزان اشعه‌ی ماورای بنفش در این دو فصل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

**Interannual time series Average Ozone Total Colum**  
AIRS- only) Monthly 1 Deg. [AIRS AIRS3STM v006] DU for 2003-Jan - 2017- Dec, Shape Iran

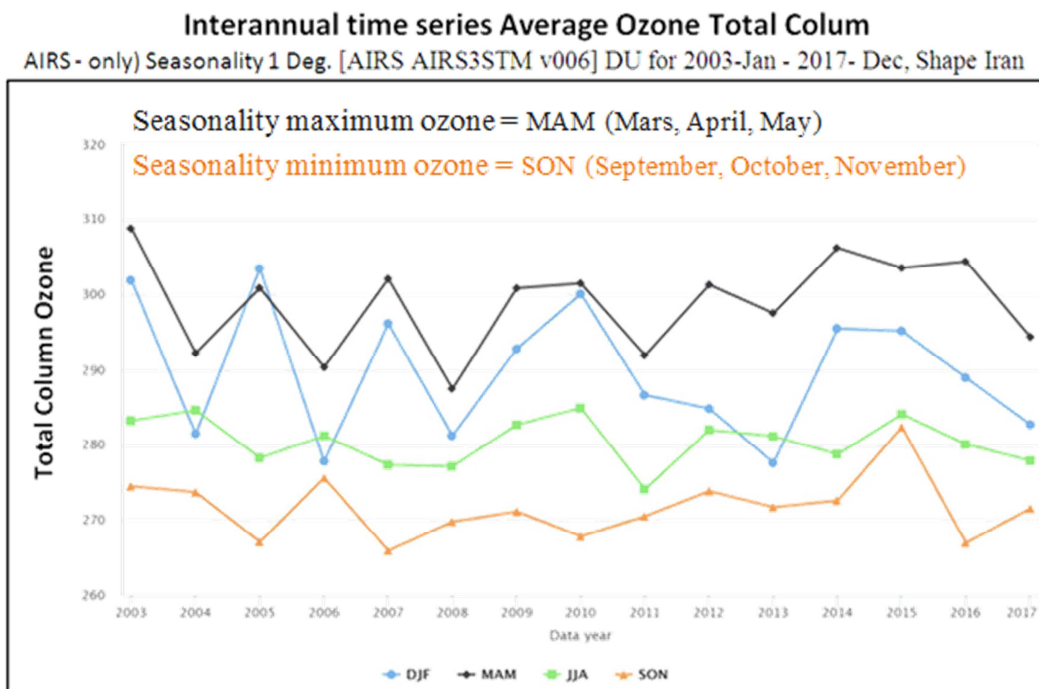


شکل ۴: میانگین ماهانه اُزون کلی ستونی اتمسفر بر فراز ایران (۲۰۰۳ - ۲۰۱۷)

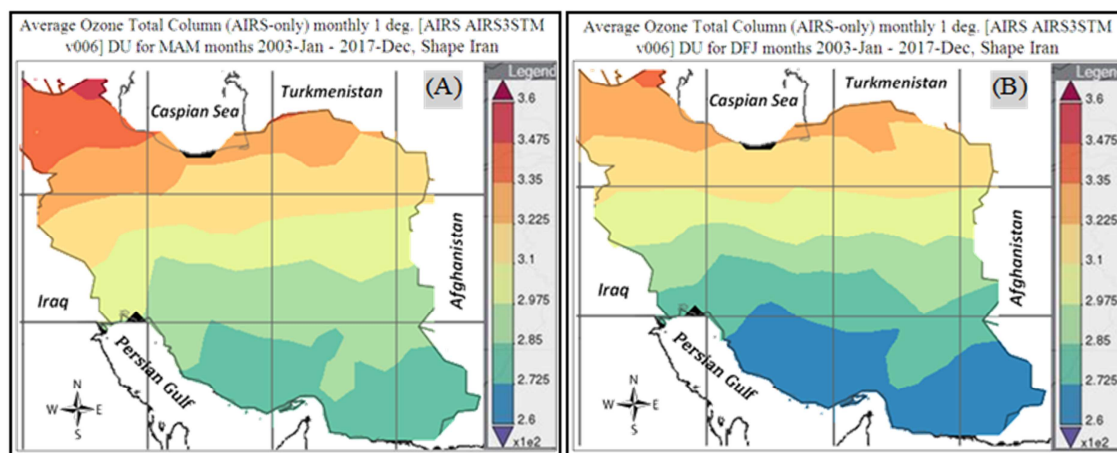
**Interannual time series Average Ozone Total Colum**  
AIRS- only) Monthly 1 Deg. [AIRS AIRS3STM v006] DU for 2003-Jan - 2017- Dec, Shape Iran



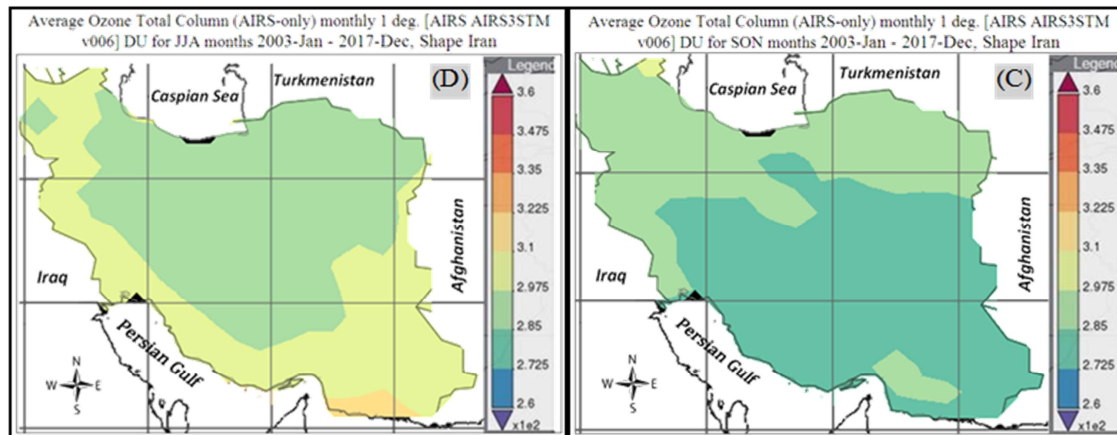
شکل ۵: سری زمانی توزیع اُزون کلی ستونی در ماههای بیشینه و کمینه بر فراز ایران (۲۰۰۳ - ۲۰۱۷)



شکل ۶: سری زمانی تغییرات فصلی اُزون کلی ستونی بر فراز ایران (۲۰۰۳ - ۲۰۱۷)



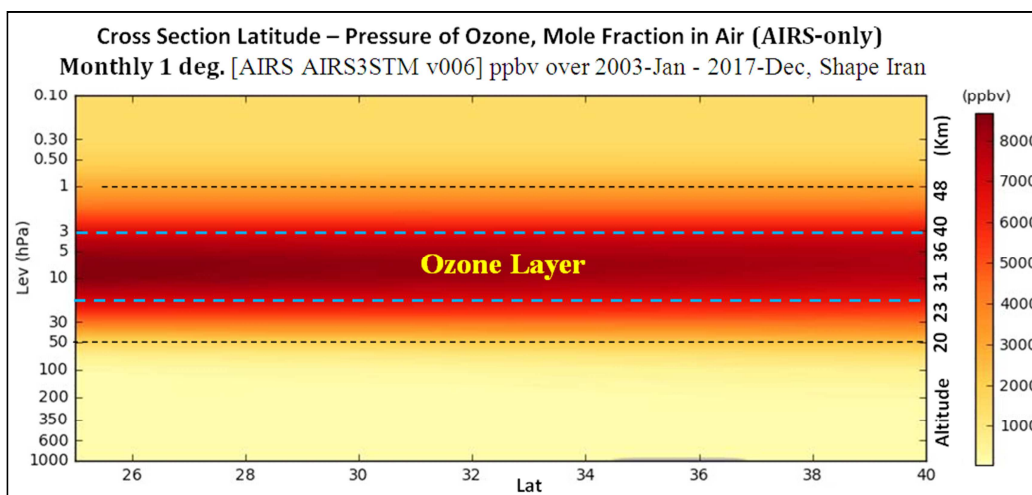
شکل ۷: توزیع اُزون کلی ستونی در فصل زمستان بر فراز ایران (B) - توزیع اُزون کلی ستونی در فصل بهار بر فراز ایران (A)



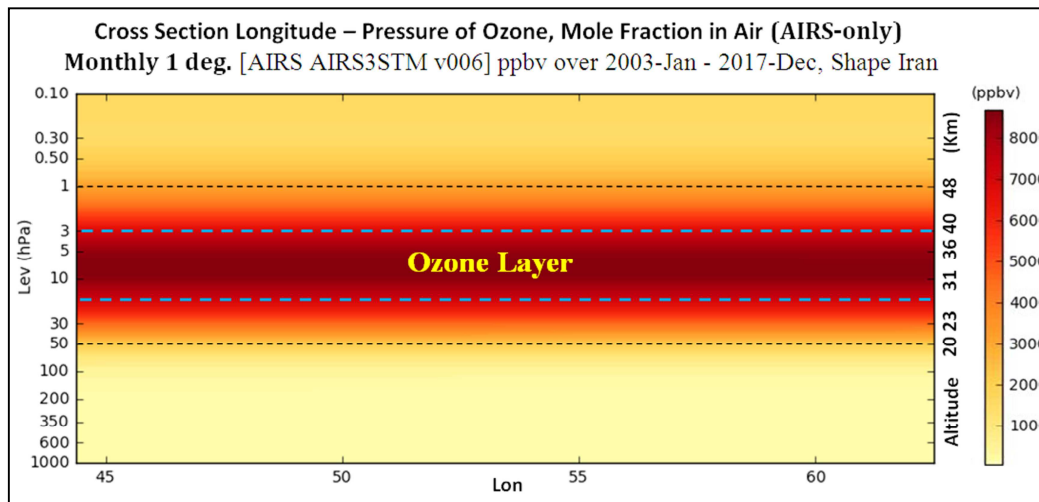
شکل ۸: توزیع اُزون کلی ستونی در فصل پاییز بر فراز ایران (C) - توزیع اُزون کلی ستونی در فصل تابستان بر فراز ایران (D)

### ارزیابی توزیع قائم اُزون

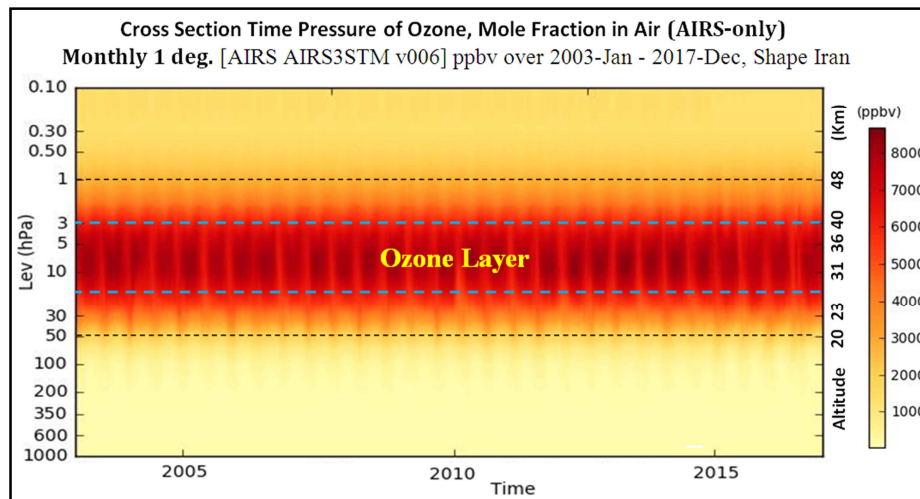
اندازه‌گیری اُزون قائم جو که در واقع توزیع عمودی اُزون موجود در جو را مشخص می‌کند با استفاده از پروفیل‌های قائم در راستای طول و عرض جغرافیایی مشخص می‌گردد. نتایج حاصل از پیمایش‌های قائم (پروفیل طولی و عرضی) جوی که تغییرات قائم اُزون را در راستای طول و عرض جغرافیایی طی دوره‌ی آماری پانزده ساله (۲۰۱۷ - ۲۰۱۳) نشان می‌دهد به خوبی توزیع قائم اُزون کلی ستون جو را در اتمسفر ایران نشان می‌دهند. شکل شماره ۹ که بیانگر توزیع قائم اُزون در امتداد عرض جغرافیایی و در راستای ترازهای ۱۴ گانه فشار بر حسب هکتوپاسکال (تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال تا ۰/۱ هکتوپاسکال) می‌باشد. براساس این شکل، لایه‌ی اُزون در اتمسفر ایران از تراز ۵۰ هکتوپاسکال در ارتفاع ۲۰ کیلومتری اتمسفر شروع شده و تا تراز ۱ هکتوپاسکالی در ارتفاع ۴۸ کیلومتری (محدوده بین خطوط مشکی منقطع) امتداد می‌یابد. در این پروفیل حداکثر تراکم گاز اُزون (لایه‌ی اصلی اُزون) از ارتفاع ۲۷ کیلومتری تا ارتفاع ۴۰ کیلومتری جو (محدوده‌ی بین خطوط آبی منقطع بین تراز ۲۰ تا ۳ هکتوپاسکال) مستقر شده‌است. این محدوده تماماً در لایه‌ی استراتوسفر (پوش سپهر) قرار داشته که در جلوگیری از اثرات مرگبار تابش‌های شدید فرابنفش بسیار مؤثر است. توزیع عمودی اُزون موجود در اتمسفر ایران در راستای طول جغرافیایی نیز بیانگر تراکم اُزون از تراز ۵۰ تا ۱ هکتوپاسکال (ارتفاع ۲۰ تا ۴۸ کیلومتری جو در محدوده‌ی بین خطوط مشکی منقطع) می‌باشد که شرایط مشابهی را با توزیع اُزون اتمسفر ایران در امتداد عرض جغرافیایی نشان می‌دهد. در این میان نیز بیشینه‌ی چگالی اُزون به ضخامت حدود ۱۳ کیلومتر (لایه‌ی اصلی اُزون) از ارتفاع ۴۰ - ۲۷ کیلومتری اتمسفر مستقر می‌باشد که با خطوط آبی منقطع از تراز ۲۰ تا ۳ هکتوپاسکال گسترش یافته‌است (شکل ۱۰). پیمایش قائم لایه‌ی اُزون طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه نیز به خوبی از گسترش لایه‌ی اُزون از ارتفاع ۲۰ تا ۴۸ کیلومتری به ضخامت حدود ۲۸ کیلومتر در محدوده بین خطوط مشکی منقطع حکایت دارد ولی به طور خاص بیشترین چگالی لایه‌ی اُزون (اُزونسفر) در فاصله‌ی ۲۷ تا ۴۰ کیلومتری اتمسفر به ضخامت ۱۳ کیلومتر مشهود می‌باشد (شکل ۱۱ و ۱۲: B).



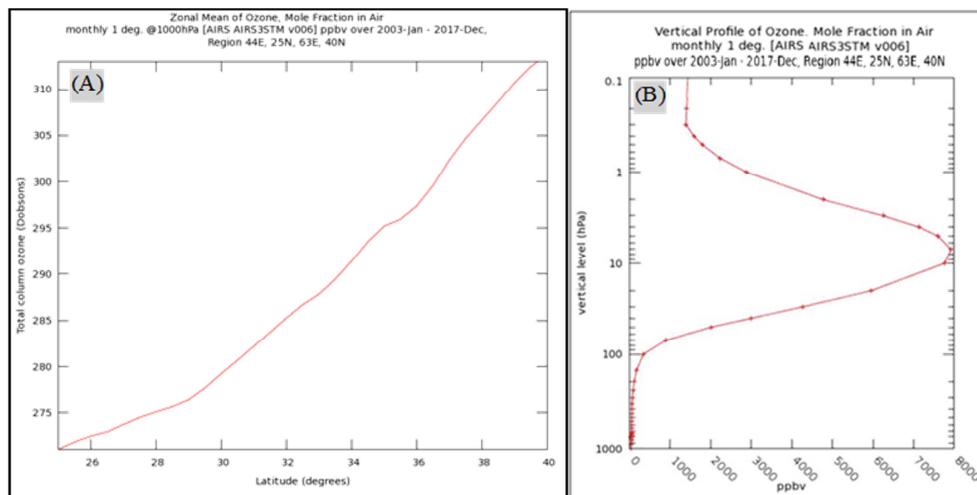
شکل ۹: نمایه‌ی قائم توزیع اُزون کلی ستونی در امتداد عرض جغرافیایی بر حسب تراز ارتفاع ژئوپتانسیل بر فراز ایران (۲۰۱۷ – ۲۰۰۳)



شکل ۱۰: نمایه‌ی قائم توزیع اُزون کلی ستونی در امتداد طول جغرافیایی بر حسب تراز ارتفاع ژئوپتانسیل بر فراز ایران (۲۰۱۷ – ۲۰۰۳)



شکل ۱۱: نمایه‌ی قائم توزیع اُزون کلی ستونی بر حسب تراز ارتفاع ژئوپتانسیل بر فراز ایران (۲۰۰۳ – ۲۰۱۷)



شکل ۱۲: پروفیل قائم توزیع اُزون کلی ستونی در امتداد تراز عمودی ارتفاع ژئوپتانسیل بر فراز ایران (B) – میانگین مداری توزیع اُزون کلی ستونی بر فراز ایران (A) طی دوره آماری (۲۰۰۳ – ۲۰۱۷)

### نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی فوق که بر مبنای اندازه‌گیریهای سنجنده‌ی AIRS مستقر بر ماهواره‌ی AQUA که در مطالعات جوی کاربرد فراوانی داشته و از جمله سنجنده‌های پُرتیپی (Hyper spectral) قابل استفاده در مطالعات اتمسفری بوده و برای آشکارسازی تغییرات اُزون اتمسفری نیز طراحی گردیده انجام پذیرفته است. نتایج حاصله به خوبی درک روشنی از وضعیت اُزون کلی ستونی (TOC) در اتمسفر ایران را نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده از داده‌های

روزانه‌ی آزون جمع‌آوری شده طی دوره‌ی آماری ۱۵ ساله (۲۰۱۷ - ۲۰۰۳) در گستره‌ی جغرافیایی کشور ایران، آزون کلی از حدود ۲۸۳ دابسون (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) در جنوب تا ۳۱۸ دابسون در شمالی‌ترین نقطه‌ی ایران (در ناحیه‌ی پارس‌آباد و بیله‌سوار در مرز آذربایجان) تغییر می‌نماید. نتایج حاصل از تحقیق آروین (۱۳۹۳) که بیانگر افزایش میزان آزون کلی از جنوب به شمال می‌باشد به خوبی با بخشی از نتایج این تحقیق منطبق می‌باشد. همچنین مباحثی (۱۳۹۱) نیز به افزایش میزان آزون کلی در اتمسفر ایران از جنوب به شمال اشاره نموده و کمترین میزان آزون کلی فصلی در اتمسفر ایران را به فصول پاییز و تابستان مربوط دانسته‌است که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. در این دوره‌ی آماری میانگین آزون کلی ستونی در اتمسفر ایران ۲۹۶ دابسون (۴ دابسون کمتر از میانگین آزون جهانی)، بیشینه‌ی آزون کلی ستونی ۳۹۹/۸ دابسون و کمینه‌ی آن ۲۲۸/۸ دابسون و انحراف معیار ۲۱/۷ بوده‌است. میانگین ماهانه‌ی آزون کلی در اتمسفر ایران از تفاوت‌های چشمگیری برخوردار می‌باشد به طوری که در میان ماههای دوازده گانه، بیشترین میزان آزون به ترتیب در ماههای مارس، آوریل و می (MAM) و کمترین میزان آن به ترتیب در ماههای اکتبر، نوامبر و دسامبر (ONS) مشاهده شده‌است. به لحاظ فصلی نیز بیشترین میزان آزون فصلی در فصل بهار (شامل ماههای مارس، آوریل و می) و کمترین میزان فصلی در ماه پاییز (ماههای سپتامبر، اکتبر و نوامبر) اتفاق افتاده‌است. از سویی دیگر پایین بودن میزان آزون و همچنین گرایش آن در فصل تابستان که همزمان با ورود بیشترین تابش ورودی اشعه‌ی فرابنفش (UV) نیز می‌باشد کاملاً هشدار دهنده است. نمایش سه بعدی (نمایه قائم) تغییرات آزون کلی در اتمسفر ایران در راستای طول و عرض جغرافیایی نشان دهنده‌ی حداکثر تراکم آزون در لایه‌ی استراتوسفر می‌باشد به طوری که لایه آزون در اتمسفر ایران از ارتفاع ۲۰ تا ۴۸ کیلومتری به ضخامت حدود ۲۸ کیلومتر گسترش یافته‌است ولی به طور خاص بیشترین چگالی لایه‌ی آزون (آزونسفر) در فاصله‌ی ۲۷ تا ۴۰ کیلومتری اتمسفر به ضخامت ۱۳ کیلومتر مشهود می‌باشد. ارتفاع مذکور در پوشش‌سپهر قرار داشته و تأثیر چندانی از خصوصیات فیزیکی سطح زمین و لایه‌ی مرزی سیاره‌ای نمی‌پذیرد. هرچند بدون شک نتایج مطالعه فوق با حداقلی از میزان خطا همراه می‌باشد ولی به طور نسبی می‌توان آنها را پذیرفته و مسئله‌ی تغییرات لایه‌ی آزون در اتمسفر ایران که به لحاظ زمانی و مکانی بخشهای وسیعی از آن در وضعیت هشدار دهنده می‌باشد جدی گرفته شود.

## منابع

- آرنس دونالد (۱۳۹۱)، هواشناسی نوین - مقدمه‌ای بر هوا، اقلیم و محیط، ترجمه‌ی محمدرضا بابایی، نشر آبیژن، جلد یکم، تهران، ۷۳۶ ص.
- آروین، عباسعلی (۱۳۹۱)، ارتباط الگوهای گردشی جو با تغییرات آزون کلی در اصفهان، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۰، شماره پیاپی ۲۹، صص ۱۴-۱.
- آروین، عباسعلی (۱۳۹۲)، ارتباط الگوهای پیوند از دور با میزان آزون کلی در اصفهان، فصلنامه پژوهشهای جغرافیای طبیعی، سال ۴۵، شماره ۱، صص ۵۲-۳۹.
- آروین، عباسعلی (۱۳۹۳)، ارتباط پدیده النینو - نوسان جنوبی با تغییرات آزون کلی در ایران، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۳۷، صص ۱۶۵-۱۸۰.

- آروین، عباسعلی (۱۳۹۴)، ارتباط بین دمای سطح آب در اقیانوس آرام و تغییرات مجموع آزون در گستره ایران، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۱۹، شماره ۵۲، صص ۴۲-۲۵.
- عزتیان، ویکتوریا و اسعدی اسکویی ابراهیم (۱۳۹۰)، بررسی نوسانات آزون سطحی در شهر اصفهان، مجله علمی و فنی نیوار، دوره ۳۵، صص ۶۷-۷۴.
- عزتیان، ویکتوریا و اسعدی اسکویی ابراهیم (۱۳۹۱)، کاربرد روش‌های آماری در تحلیل نوسان‌های آزون و ردسپهری، مجله ژئوفیزیک، دوره ۶، شماره ۱، صص ۶۰-۴۲.
- کریمی صادق؛ نگارش حسین؛ طاوسی تقی و علیجانی بهلول (۱۳۹۲)، تحلیل سیستماتیک چرخه‌ی آزون تروپوسفری در سیستم سیرنیتیک آب و هوا (مورد: کلانشهر تهران)، فصلنامه‌ی علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، سال یازدهم، شماره‌ی ۳۷، صص ۲۱۵-۱۸۹.
- لازاریدیس میهالیس (۱۳۹۲)، اصول اولیه هواشناسی و آلودگی هوا، ترجمه‌ی علی اکبر سبزی پرور و جلیل هلالی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، پاییز ۱۳۹۲.
- مباشری محمدرضا (۱۳۸۴)، امکان‌سنجی پایش (مانیتورینگ) تغییرات لایه‌ی آزون در جو ایران با استفاده از اندازه‌گیری‌های مکانی و تصاویر MODIS، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- مباشری محمدرضا (۱۳۸۶)، مطالعه تغییرات لایه‌ی آزون در جو ایران با استفاده از داده‌های سنجنده TOMS، مجله‌ی محیط شناسی، شماره ۴۴، زمستان ۸۶، صص ۵۴-۴۳.
- Aggarwal, A., Kumari, R., Mehla, N., Deepali, Singh., R.P., Bhatnagar, S., Sharma, K., Sharma, K., Vashishtha, A., Rathi, B., (2013), Depletion of the ozone layer and its consequences: A review. *Am. J. Plant. Sci.* 4: 1990-1997.
- Antón, M., Cancillo, A., Serrano, J.M., Vaquero, J.A., (2007), García, Ozone mini-hole over South-Western Spain during January 2004: Influence over ultraviolet radiation, *Geophys. Res. Lett.* 10: 320 -331.
- Anton, M., Serrano, A., Cancillo, M.L., Garcia, J.A., (2008), Total ozone and solar erythemal irradiance in Southwestern Spain: day-to-day variability and extreme episodes. *Geophysical Research Letters.* 21: 35-50.
- Anton, M., Serrano, A., Cancillo, M.L., Garcia, J.A., (2009), An empirical model to estimate ultraviolet erythemal transmissivity. *Annales Geophysical.* 27:120-136.
- Atkinson-Palombo, C.M., Miller, J.A., Balling, Jr., (2006), Quantifying the Ozone "Weekend Effect" at Various Locations in Phoenix, Arizona. *Atmos. Environ.* 40: 7644-7658.
- Balis, D., Brinksma, E., Kroon, M., Amiridis, V., Zerefos, C., (2006), Validation of OMI total ozone using ground-based Brewer observations. *Atmospheric Science Conference, European Space Agency, ESA SP-628, ESRIN, Frascati, Italy.*
- Basset, H.A., Korany, M.H., (2007), the global and UVB radiation over Egypt. *Atmosphere.* 20:41-52.
- Bordi, I., Berrilli, F., Pietropaolo, E., (2015), Long-term response of stratospheric ozone and temperature to solar variability. *Ann. Geophys.* 33: 267-277.
- Cadle, R.D., Allen, E.R., (1970), *Atmospheric Chemistry, Science.* 167: 243-249.
- Cazorla, M., Brune W. H., (2010), Measurement of Ozone Production Sensor. *Atmos. Meas. Tech.* 3: 345-555.
- Chair, J.B., (2005), Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. *Optical Engineering.* 44:260 - 272.
- Chapman, S., (1930), A theory of upper atmosphere ozone, *Mem. Roy. Meteorol.* 3:103-110.
- Considine, D. B., (2004), Simulating ozone in the near-tropopause region with a new combined model of the stratosphere and troposphere, paper presented at Quadrennial Ozone Symposium, Int. Ozone Comm., Kos, Greece, June.25: 19 -27.
- Crutzen, P.J., (1990), the influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 96:320-325.
- De Laat, A. T. J., Aben, I., Roelofs, G. J., (2005), A model perspective on total tropospheric O3 column variability and implications for satellite observations, *J. Geophys. Res.* 110: 1220 -1232.
- Doherty, R.M., Wild, O., Shindell, D.T., Zeng, G., MacKenzie, I.A., Collins, W.J., Fiore, A.M., Stevenson, D.S., Dentener, F.J., Schultz, M.G., (2013), Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118: 3744-3763.
- Edwards, D. P., (2003), Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: A satellite perspective, *J. Geophys. Res.* 108: 4237-4245.

- Feister, U., Cabrol, N., Häder, D. P., (2015), UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. *Atmosphere*. 5: 1211–1228.
- Fioletov, V.E., Cherr, J.B., Wardle, D.I., Krotkov, N., Herman, J.R., (2002), Comparison of Brewer ultraviolet irradiance measurements with total ozone mapping spectrometer satellite retrievals. *Optical Engineering*. 41: 305-317.
- Flores, J. C., Montecinos, S., (2000), Chapman's model for ozone concentration: earth's slowing rotation effect in the atmospheric past, *SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS)*.70: 250-262.
- Galliani, A., Siani, A.M., Casale, G.R., (2002), An investigation on a low ozone episode at the end of November 2000 and its effect on ultraviolet radiation. *Optical Engineering*. 41:308-320.
- Ialongo, I., Casale, G. R., Siani, A.M., (2008), Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 8: 328-336.
- Jacobson, M.Z., (2002), *Atmospheric Pollution: History, science, and regulation* Cambridge University Press.
- Johnston, H. S., (1971), Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust, *Science*. 173:517-522.
- Kassem, K.O., (2009), *Variability of Surface and Total Column Ozone in Qena and Cairo (Egypt)*. PhD Thesis, South Valley University, Egypt. Pp:76 -90.
- Kazadzis, S., Bais, A., Arola, A., Krotkov, N., Kouremeti, N., Meleti, C., (2009), Ozone monitoring instrument spectral UV irradiance products: comparison with ground-based measurements at an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9: 58-70.
- Kondo, A., Inoue, Y., (2006), Ground Level Ozone Concentrations and Its Association with NO<sub>x</sub> and Meteorological Parameters in Kathmandu Valley, Nepal. *Atmos. Environ*. 40: 8081–8087.
- Kudish, A.I., Lyubansky, V., Evseev, E.G., Ianetz, A., (2005), Intercomparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea). 30: 162-175.
- Lelieveld, J., Roelofs, G. J., Ganzeveld, L., Feichter, J., Rodhe, H., (1997), Terrestrial sources and distribution of atmospheric sulphur, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond*. 352: 149-158.
- Masserot, D., Lenoble, J., Brogniez, C., Houet, M., Krotkov, N., McPeters, R., (2002), Retrieval of ozone column from global irradiance measurements and comparison with TOMS data, A year of data in the Alps. *Geophysical Research Letters* 29, art. 1309:520 -528.
- McKenzie, R. L., Aucamp, P.J., Bais, A. F., Madronic, S., (2011), effects of ozone depletion and its interactions with climate change Cover, *Journal of Photochemical & Photobiological Sciences*. 20:36-49.
- Molina, Mario J., Rowland, F. S., (1974), stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*. 249:810-812.
- Murillo, W., Canada, J., Pedros, G., (2003), Correlation between global ultraviolet (290-385 nm) and global irradiation in Valencia and Cordoba (Spain). *Renewable Energy*. 28:485-502.
- Revell, L.E., Tummon, F., Stenke, A., Sukhodoloy, T., Coulon, A., Rozanov, E., Garny, H., Grewe, V., Peter, T., (2015), Drivers of the tropospheric ozone budget throughout the 21st century under the medium-high climate scenario RCP 6.0. *Atmos. Chem. Phys*. 15: 5887–5902.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., (2006), *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York: John Wiley & Sons.17:70-84.
- Susan, S.J., James .B., Burkholder., (1994), Ozone depletion and global warming potentials of CF<sub>3</sub>I: *JGR: Atmospheres Research Journal*. 42:35-50.
- Thompson, D.W.J., Solomon.S., Kushner, P.J., (2011), Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change, *Nature Geosciences*. 4: 741–749.
- Zhang, H., Wu, S., Huang, I., Wang, I., (2014), Effects of stratospheric ozone recovery on photochemistry and ozone air quality in the troposphere. *Atmos. Chem. Phys*. 14: 4079–4086.
- Ziemke, J. R., Chandra, S., Bhartia, P. K., (2005), A 25-year data record of atmospheric ozone in the Pacific from Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) cloud slicing: Implications for ozone trends in the stratosphere and troposphere, *Journal Geophysics Research*. 10:1029-1038.

**Research Article**

## **Satellite Monitoring of Ozone Layer Changes in the Atmosphere of Iran**

**Koohzad Raispour<sup>\*1</sup>, Hossein Asakereh<sup>2</sup>**

Received: 09-01-2019

Revised: 16-03-2019

Accepted: 02-06-2019

### **Abstract**

Considering the vital importance of the ozone layer and the rising course of its destruction in recent decades, the necessity of studying the ozone layer in order to know its state in the atmosphere of Iran has become more recent. In recent years, several techniques and techniques have been used to monitor this vital gas in the atmosphere of the planet. Meanwhile, the use of satellite data has become widespread because of the availability and availability of features such as spatial, temporal and spatial resolution. The study also uses ozone data collected by the AIRS based on the AQUA satellite, which provides an opportunity to study the process of Ozone changes in the atmosphere of all parts of the world, including Iran. The relevant data were extracted from the [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM\\_006](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM_006) website with the NetCDF format, with one-day and one-day temporal resolution and a 1° x 1° spatial resolution during the 15-year statistical period (2003 - 2017) ArcGIS and Grads software was analyzed, visualized, analyzed. The results indicate that annual ozone has dropped in the atmosphere of Iran. Among the seasons, the highest and lowest ozone levels occurred in the spring and autumn seasons, and the highest and lowest monthly ozone levels were observed in March and October, respectively. In terms of location, moving from the south to the north, it is approximately uniformly increased by the amount of ozone, so that the maximum total ozone (TOC) exists in Pars Abad plain (318 Dobson) and its lowest value in an interconnected area Provinces of Hormozgan, Kerman and Fars, and part of Southeastern Iran (283 Dobson). The maximum ozone concentration (ozonosphere) is also evident at an altitude of 27-40 km.

**Keywords:** Satellite monitoring, the Ozone layer, AIRS, Atmosphere, Iran.

---

<sup>1\*</sup>- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Email: Raispour@znu.ac.ir

<sup>2</sup>- Professor of Geography Department, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

## References

### References (in Persian)

- Ahrens, D. (Author)., (2013), *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, Translation by Mohammad Reza Babaei, ISBN-13: 978-0840054999. [In Persian]
- Karimi, S., Negaresh, M., Tavosi, T., Alijani, B., (2013), Systematic Analysis of Tropospheric Ozone Cycle In Cybernetic Climate System (Case Study: Tehran Metropolitan), *Journal of Geography (Iranian-Persian Journal)*, 11, 2(37), 189-215, 2013. [In Persian]
- Mihalis, L., (2011), *First Principles of Meteorology and Air Pollution*, Translated by Ali Akbar Sabzi Parvar, (ISBN: 978-94-007-0162-5). [In Persian]
- Mobasheri, M., (2006), Optional monitoring of ozone layer changes in the atmosphere of Iran using spatial measurements and MODIS images, Research Report, Khajeh Nasir Al-Din Toosi University of Technology. [In Persian]
- Mobasheri, M., (2008), Study of changes in the ozone layer in Iranian atmosphere using TOMS sensor data, *Journal of Environmental Studies*, Number 44, winter 2008, p. 54-43. [In Persian]

### References (in English)

- Aggarwal, A., Kumari, R., Mehla, N., Deepali, Singh., R.P., Bhatnagar, S., Sharma, K., Sharma, K., Vashishtha, A., Rath, B., (2013), Depletion of the ozone layer and its consequences: A review. *Am. J. Plant. Sci.* 4: 1990–1997.
- Antón, M., Cancillo, A., Serrano, J.M., Vaquero, J.A., (2007), García, Ozone mini-hole over South-Western Spain during January 2004: Influence over ultraviolet radiation, *Geophys. Res. Lett.* 10: 320 -331.
- Anton, M., Serrano, A., Cancillo, M.L., Garcia, J.A., (2008), Total ozone and solar erythemal irradiance in Southwestern Spain: day-to-day variability and extreme episodes. *Geophysical Research Letters.* 21: 35-50.
- Anton, M., Serrano, A., Cancillo, M.L., Garcia, J.A., (2009), An empirical model to estimate ultraviolet erythemal transmissivity. *Annales Geophysical.* 27:120-136.
- Atkinson-Palombo, C.M., Miller, J.A., Balling, Jr., (2006), Quantifying the Ozone “Weekend Effect” at Various Locations in Phoenix, Arizona. *Atmos. Environ.* 40: 7644–7658.
- Balis, D., Brinksma, E., Kroon, M., Amiridis, V., Zerefos, C., (2006), Validation of OMI total ozone using ground-based Brewer observations. Atmospheric Science Conference, European Space Agency, ESA SP-628, ESRIN, Frascati, Italy.
- Basset, H.A., Korany, M.H., (2007), the global and UVB radiation over Egypt. *Atmosphere.* 20:41-52.
- Bordi, I., Berrilli, F., Pietropaolo, E., (2015), Long-term response of stratospheric ozone and temperature to solar variability. *Ann. Geophys.* 33: 267–277.
- Cadle, R.D., Allen, E.R., (1970), Atmospheric Chemistry, *Science.* 167: 243-249.
- Cazorla, M., Brune W. H., (2010), Measurement of Ozone Production Sensor. *Atmos. Meas. Tech.* 3: 345-555.
- Chair, J.B., (2005), Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. *Optical Engineering.* 44:260 – 272.
- Chapman, S., (1930), A theory of upper atmosphere ozone, *Mem. Roy. Meteorol.* 3:103-110.
- Considine, D. B., (2004), Simulating ozone in the near-tropopause region with a new combined model of the stratosphere and troposphere, paper presented at Quadrennial Ozone Symposium, Int. Ozone Comm., Kos, Greece, June.25: 19 -27.
- Crutzen, P.J., (1990), the influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 96:320-325.
- De Laat, A. T. J., Aben, I., Roelofs, G. J., (2005), A model perspective on total tropospheric O<sub>3</sub> column variability and implications for satellite observations, *J. Geophys. Res.* 110: 1220 -1232.
- Doherty, R.M., Wild, O., Shindell, D.T., Zeng, G., MacKenzie, I.A., Collins, W.J., Fiore, A.M., Stevenson, D.S., Dentener, F.J., Schultz, M.G., (2013), Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118: 3744–3763.
- Edwards, D. P., (2003), Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: A satellite perspective, *J. Geophys. Res.* 108: 4237-4245.
- Feister, U., Cabrol, N., Häder, D. P., (2015), UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. *Atmosphere.* 5: 1211–1228.
- Fioletov, V.E., Cherr, J.B., Wardle, D.I., Krotkov, N., Herman, J.R., (2002), Comparison of Brewer ultraviolet irradiance measurements with total ozone mapping spectrometer satellite retrievals. *Optical Engineering.* 41: 305-317.
- Flores, J. C., Montecinos, S., (2000), Chapman’s model for ozone concentration: earth’s slowing rotation effect in the atmospheric past, *SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS).* 70: 250-262.
- Galliani, A., Siani, A.M., Casale, G.R., (2002), An investigation on a low ozone episode at the end of November 2000 and its effect on ultraviolet radiation. *Optical Engineering.* 41:308-320.
- Ialongo, I., Casale, G. R., Siani, A.M., (2008), Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 8: 328-336.
- Jacobson, M.Z., (2002), *Atmospheric Pollution: History, science, and regulation* Cambridge University Press.

- Johnston, H. S., (1971), Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust, *Science*. 173:517-522.
- Kassem, K.O., (2009), Variability of Surface and Total Column Ozone in Qena and Cairo (Egypt). PhD Thesis, South Valley University, Egypt. Pp:76 -90.
- Kazadzis, S., Bais, A., Arola, A., Krotkov, N., Kouremeti, N., Meleti, C., (2009), Ozone monitoring instrument spectral UV irradiance products: comparison with ground-based measurements at an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9: 58-70.
- Kondo, A., Inoue, Y., (2006), Ground Level Ozone Concentrations and Its Association with NO<sub>x</sub> and Meteorological Parameters in Kathmandu Valley, Nepal. *Atmos. Environ.* 40: 8081–8087.
- Kudish, A.I., Lyubansky, V., Evseev, E.G., Ianetz, A., (2005), Intercomparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea). 30: 162-175.
- Lelieveld, J., Roelofs, G. J., Ganzeveld, L., Feichter, J., Rodhe, H., (1997), Terrestrial sources and distribution of atmospheric sulphur, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 352: 149-158.
- Masserot, D., Lenoble, J., Brogniez, C., Houet, M., Krotkov, N., McPeters, R., (2002), Retrieval of ozone column from global irradiance measurements and comparison with TOMS data, A year of data in the Alps. *Geophysical Research Letters* 29, art. 1309:520 -528.
- McKenzie, R. L., Aucamp, P.J., Bais, A. F., Madronic, S., (2011), effects of ozone depletion and its interactions with climate change Cover, *journal of Photochemical & Photobiological Sciences*. 20:36-49.
- Molina, Mario J., Rowland, F. S., (1974), stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*. 249:810-812.
- Murillo, W., Canada, J., Pedros, G., (2003), Correlation between global ultraviolet (290-385 nm) and global irradiation in Valencia and Cordoba (Spain). *Renewable Energy*. 28:485-502.
- Revell, L.E., Tummon, F., Stenke, A., Sukhodoloy, T., Coulon, A., Rozanov, E., Garny, H., Grewe, V., Peter, T., (2015), Drivers of the tropospheric ozone budget throughout the 21st century under the medium-high climate scenario RCP 6.0. *Atmos. Chem. Phys.* 15: 5887–5902.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., (2006), *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York: John Wiley & Sons.17:70-84.
- Susan, S.J., James .B., Burkholder., (1994), Ozone depletion and global warming potentials of CF3I: *JGR: Atmospheres Research Journal*. 42:35-50.
- Thompson, D.W.J., Solomon.S., Kushner, P.J., (2011), Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change, *Nature Geosciences*. 4: 741–749.
- Zhang, H., Wu, S., Huang, I., Wang, I., (2014), Effects of stratospheric ozone recovery on photochemistry and ozone air quality in the troposphere. *Atmos. Chem. Phys.* 14: 4079–4086.
- Ziemke, J. R., Chandra, S., Bhartia, P. K., (2005), A 25-year data record of atmospheric ozone in the Pacific from Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) cloud slicing: Implications for ozone trends in the stratosphere and troposphere, *Journal Geophysics Research*. 10:1029-1038.