



Total Ozone Column Variations over Iran: A Study on Spatial and Temporal Trends

Mohsen Hamidianpour¹ | Mahmood Khosravi² | Morteza Esmaelnejad³

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir
2. Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
3. Department of Geography, University of Birjand, Birjand, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 28 Aug 2024
Received in revised form: 28 Dec 2024
Accepted: 31 Dec 2024
Available online: 21 Mar 2025

Keywords:

Ozone,
Greenhouse gases,
Climate change,
Global warming,
Climatology.

ABSTRACT

Ozone in the atmosphere serves as a greenhouse gas and a shield against ultraviolet radiation, making it crucial for maintaining ecosystem balance and promoting human health. Variations in its levels can adversely impact climate change and air quality. Therefore, monitoring ozone concentrations is vital for creating effective environmental policies and strategies to mitigate these impacts. For this purpose, MERRA-2 data was used from 1980 to 2019. This study aims to understand the variations in ozone levels across different regions and seasons and is comprised of two main parts. First, we analyzed spatiotemporal variations in ozone in Iran's atmosphere. We explored how ozone levels change throughout the year and across different geographical locations. We found that the highest ozone levels occurred during spring (May), whereas the lowest levels were observed in autumn (October). Geographically, the highest ozone concentrations are observed in the northern and northwestern regions of Iran, while the lowest levels are found in the southern areas. These variations undergo monthly fluctuations influenced by various factors. In the cold season, ozone concentration is primarily a function of latitude, whereas, in the warm season, the impact of altitude becomes significantly more pronounced than latitude. The annual ranges of ozone change were 294 and 354.47. Notably, the total amount of ozone in Iran's atmosphere exhibited overall negative annual, seasonal, and monthly trends. This trend was particularly pronounced during the cold months, with statistical significance observed in winter ($\alpha=0.01$). Spatially, the northwestern region of Iran, extending to its central side, exhibited a significant trend, whereas other areas showed a non-significant negative trend. This can contribute to a better understanding of ozone dynamics in Iran and provide valuable insights for policymakers and researchers working on climate change mitigation.

Cite this article: Hamidianpour, M., Khosravi, M., & Esmaelnejad, M. (2025). Total Ozone Column Variations over Iran: A Study on Spatial and Temporal Trends. *Geography and Environmental Sustainability*, 15 (1), 43-61. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10929.2773>



© The Author (s).
DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10929.2773>

Publisher: Razi University



تغییرات زمانی مکانی میزان ازن کل جو ایران

محسن حمیدیان پور^۱ | محمود خسروی^۲ | مرتضی اسمعیل نژاد^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir
۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۳. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ازن،

گازهای گلخانه‌ای،

تغییر اقلیم،

گرمايش جهانی،

اقلیم‌شناسی،

توسعه پایدار.

ازن اتمسفری به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای و محافظ در برابر پرتوهای ماورای بنفش، نقش مهمی در تعادل اکوسیستم و سلامت انسان ایفا می‌کند. نوسانات غلظت آن می‌تواند اثر منفی بر تغییرات اقلیمی و کیفیت هوا داشته باشند؛ بنابراین، پایش مستمر ازن برای مدیریت پایداری محیط‌زیست ضروری است. بدین منظور، از داده‌های MERRA-2 در طول دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۰ استفاده شد. پژوهش پیش‌رو دارای دو بخش است. این مطالعه به تحلیل فضایی-زمانی میزان ازن در جو ایران پرداخته و برای آشکارسازی روند تغییرات زمانی-فضایی از روش ناپارامتریک من-کندال و شیب سن استفاده کرده است. نتایج بخش اول نشان داد که بیشترین ازن در ماه مه و فصل بهار و کمترین آن مربوط به ماه اکتبر است. از نظر جغرافیایی، بیشترین غلظت ازن در نواحی شمال و شمال غرب ایران مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین میزان آن به نواحی جنوبی اختصاص دارد. این تغییرات به‌طور ماهانه تحت تأثیر عوامل مختلف، دستخوش نوساناتی می‌گردد. در فصل سرد سال، غلظت ازن به‌طور عمده تابعی از عرض جغرافیایی است، در حالی که در فصل گرم سال، تأثیر ارتفاع نسبت به عرض جغرافیایی به مراتب بیشتر و بارزتر می‌شود. تغییرات زمانی - فضایی مطالعه نشان داد که دامنه تغییرات سالانه ازن بین ۲۹۴ تا ۳۵۴/۴۷ دابسون است. دیگر یافته‌ها نشان داد که در میزان کلی ازن جو ایران در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه روند منفی مشاهده می‌گردد. روند میزان ازن در دوره (ماه‌های) سرد سال به‌طور کلی مشهودتر و به لحاظ آماری در فصل زمستان معنی‌دار بود. به لحاظ فضایی نواحی شمال غربی کشور تا ضلع مرکزی کشور دارای روند منفی معنی‌دار بوده و دیگر نواحی همان روند منفی مشاهده می‌شود ولی در هیچ سطح آماری معنی‌دار نیستند.

استناد: حمیدیان پور، محسن؛ خسروی، محمود؛ اسمعیل نژاد، مرتضی (۱۴۰۴). تغییرات زمانی مکانی میزان ازن کل جو ایران. *جغرافیا و پایداری*

محیط، ۱۵ (۱)، ۴۳-۶۱. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10929.2773>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10929.2773>



مقدمه

پایداری محیط به وضعیتی اشاره دارد که محیط زیست به طور مداوم و پایدار حفظ شود، به این معنی که منابع طبیعی مانند آب، هوا، خاک و تنوع زیستی حفظ شده و تغییرات زیست محیطی به حداقل رسانده شود. پایداری محیط همچنین به حفظ تعادل بین انسان و محیط زیست اشاره دارد، به طوری که فعالیت‌های انسانی منجر به آلودگی و خرابی محیط زیست نشود و برای نسل‌های آینده منابع کافی زمین باقی بماند. در کل، پایداری محیط به معنای حفظ تعادل و توازن بین انسان و محیط زیست برای دسترسی به منابع طبیعی برای نسل‌های آینده است (Morelli, 2011). در این میان ازن (O_3) یکی از گازهای گلخانه‌ای مهم در جو (Kiehl et al., 1999) با مقدار برابر 0.012% است (Kerr & McElroy, 1989) که در نتیجه ترکیبات شیمیایی واکنش‌های ناخواسته در جو زمین تولید می‌شود. البته این گاز در تروپوسفر به عنوان آلودگی هوا شناخته می‌شود و می‌تواند منجر به ناپایداری محیط زیست شود. علی‌رغم مقدار کم آن در استراتوسفر و تروپوسفر، نقش بسیار مهمی در کنترل ترکیبات شیمیایی، اقلیمی جو و به طور کلی پایداری محیط دارد (Rafiq et al., 2017).

این گاز پس از دی‌اکسیدکربن (CO_2 : $1.82 \text{ } 0.17 \text{ Wm}^{-2}$) و متان (CH_4 : $0.48 \text{ } 0.05 \text{ Wm}^{-2}$) با مقدار واداشت تابشی $0.4 \pm 0.2 \text{ Wm}^{-2}$ دارای رتبه سوم اثرات گلخانه‌ای است (Heue et al, 2016; Hartmann et al, 2013). ازن در استراتوسفر به عنوان یک لایه محافظ در مقابل اشعه ماورای بنفش خورشید عمل می‌کند. هر چند که در لایه تروپوسفر به عنوان یک گاز گلخانه‌ای و آلاینده مهم جوی ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی در نظر گرفته می‌شود (Varotsos et al., 1995; Alexandris et al., 1999; Brunekreef & Holgate, 2002; Lin et al., 2012; Boynard et al., 2016). تغییرات مقدار ازن بر اساس مقیاس‌های کوتاه مدت، فصلی، درون سالانه و بلند مدت به دلیل حرکت مداوم در جو است (Rafiq et al., 2017).

امروزه بشر نیاز مبرم به استفاده از سوخت‌های فسیلی دارد. همین امر منجر به افزایش میزان ازن در تروپوسفر در جو کشورهای در حال توسعه شده است (Cooper, et al., 2014). به عنوان نمونه سان^۱ و همکاران (۲۰۱۶) افزایش ازن تابستانه را در چین مرکزی بررسی و نشان دادند که در تروپوسفر تغییرات آن ناشی از فرآیند پویا مانند حمل و نقل است. در این رابطه لیو و همکاران (۲۰۰۹) بیان می‌کنند که تجمع ازن تروپوسفر در مناطقی همچون آسیا، آمریکای شمالی و آفریقای استوایی، متاثر از مراکز تولیدی و حمل و نقل است (Liu et al., 2009). غفارپسند و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند ضمن تأثیرپذیری آلودگی شهر تهران از فعالیت‌های انسانی به ویژه حمل و نقل، یکی از آلاینده‌های اصلی شهر، ازن می‌باشد که بیشترین غلظت را فصل تابستان داشته و به مانند دیگر آلاینده‌ها ناشی از فعالیت‌های خودرویی (On-road vehicle emissions) است (Ghaffarpassand et al., 2020). در حالی که در استراتوسفر فوقانی فرایندهای فتوشیمیایی منجر به از بین رفتن ازن و به نوعی کاهش ازن می‌گردد (Rafiq et al., 2017). ضمن اینکه طول عمر ازن در جو پایین نسبت به ازن جو بالا متاثر از فعالیت‌های فتوشیمیایی بیشتر است (Felix, 2009).

شایان ذکر است قرن بیست و یکم جهان با تغییر اقلیم روبرو است. بخشی از ازن تروپوسفر از تبادل ازن استراتوسفر در مرز تروپوپاؤز به تروپوسفر تامین می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده مشخص شده که سهم انتقال ازن از استراتوسفر به تروپوسفر به سبب تقویت چرخه Brewer-Dobson^۲ روند افزایشی را نشان می‌دهد (Oberländer et al., 2013). به علاوه انتظار می‌رود افزون بر تغییر انتقال ازن از استراتوسفر به تروپوسفر، غلظت ازن در استراتوسفر نیز تغییر کند (WMO, 2014; Meul et al., 2014). بنابراین نظارت، پایش و شناخت ویژگی‌های زمانی و مکانی حجم کل ازن^۳ (TOC) دارای اهمیت می‌باشد. لذا با توجه به اهمیت بالقوه نظارت بر ازن کل و با افزایش آگاهی برای حفاظت از محیط زیست، در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در سراسر جهان جهت پایش غلظت ازن و سایر ترکیبات مضر جو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است (Chipperfield & Randel, 2003; Frith et al., 2004; Levelt et al., 2006; Granier et al., 2011, Parrish et al., 2013; Young et al., 2013; Cooper et al., 2014; Lee et al., 2014; Zhang et al., 2016, heue et al., 2016; Lin et al.,

1. Sun
2. the Brewer-Dobson Circulation (BDC)
3. Total Ozone Colume

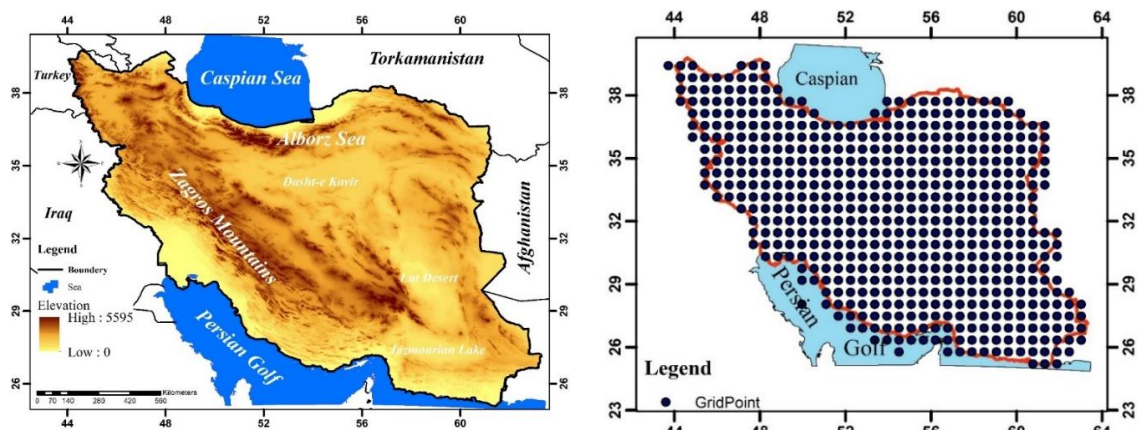
(2017).

پژوهش‌ها در ایران و خاورمیانه تأثیر قابل توجه ازن سطح زمین را بر سلامت پایدار انسان و پوشش گیاهی نشان داده است. به عنوان نمونه غلظت ازن در تهران و اهواز از حد توصیه شده فراتر رفته و بیشترین غلظت در مناطق شمالی، غربی و جنوب غربی تهران مشاهده شده است (Yari et al., 2016; Faridi et al., 2020). برخی از مطالعات نشان داده است که غلظت ازن در شهرهایی مانند تهران تغییر قابل توجهی داشته و این تغییرات به تأثیر عناصر هواشناسی و نقش منابع متحرک و ثابت در انتشار گازهایی مانند ازن مربوط می‌شود (Ahmadi Moghadam & Mahmoud, 2013). تربتیان و همکاران (۲۰۱۹) بر اهمیت شرایط هواشناسی و وجود گازهای پیش‌ساز مانند NOx تأکید کردند (Torbatian et al., 2019). فرج‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی رخداد حفره‌های کوچک ازن در منطقه ایران مرکزی (اصفهان) پرداختند. در این مطالعه، داده‌های روزانه ازن پوشش سپهر از طریق سنجنده‌های زمینی بروئر و ماهواره‌های TOMS و OMI از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین رخداد حفره‌های کوچک ازن در فصل‌های پاییز و زمستان اتفاق افتاده و دامنه ناهنجاری‌های منفی ازن از ۲۴٪ در زمستان تا ۶٪ در تابستان متغیر بوده است. همچنین این پژوهش نشان داد که ارتفاع وردایست (TH) در مواقع شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن به تراز بالاتر جو هدایت شده و هم‌زمان دما و فشار آن نسبت به میانگین درازمدت کاهش محسوسی می‌یابد.

همانطور که بیان شد به سبب تأثیری که این گاز بر جوامع بشری و همچنین گیاهان دارد (Nawrot et al., 2006)، یکی از گازهای مهم جوی محسوب است و به عنوان یکی از محافظان مهم در قبال پرتو ماورای بنفش خورشیدی می‌باشد؛ لذا این مطالعه از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا تغییرات در ازن جوی نتیجه مهمی بر روی انسان، گیاهان و حیوانات خواهد داشت (Goudarzi et al., 2015). به بیانی بر هم زنده پایداری محیط می‌گردد، بنابراین با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان به چند خلاء مطالعاتی اشاره کرد. نخست اینکه بیشتر مطالعات، متمرکز ازن تروپوسفر شده‌اند و دوم اینکه بیشتر مطالعات متمرکز شهرهای بزرگ مانند تهران و ... بوده‌اند. تقریباً مطالعاتی درباره توزیع فضایی و زمانی ازن کل اتمسفر انجام نشده است. در همین راستا یعنی پر کردن خلاء پژوهشی در خصوص ازن کل اتمسفر در سرتاسر ایران، این مطالعه قصد دارد بر اساس داده‌های MERRA-2 به پایش منطقه‌ای میزان ازن در مقیاس‌های زمانی مختلف همچون ماهانه، فصلی و سالانه بپردازد؛ ضمن اینکه تغییرات آن را نیز با استفاده از روش‌های ناپارامتریک من‌کنندال و همچنین شیب سن به صورت منطقه‌ای با هدف حفظ پایداری محیط، بررسی و ارزیابی نماید. باید یادآور شد که کاهش ازن استراتوسفری منجر به افزایش نفوذ پرتو ماورای بنفش (UVA و UVB) به سطح زمین می‌شود که می‌تواند باعث افزایش خطر ابتلا به سرطان پوست، آسیب به چشم‌ها و تأثیر منفی بر اکوسیستم‌ها گردد. همچنین افزایش ماورای بنفش می‌تواند به کاهش تولید مثل و رشد گیاهان آسیب برساند.

منطقه مورد پژوهش

منطقه مورد مطالعه کشور ایران با مساحتی حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع، بین عرض جغرافیایی ۲۴ درجه و ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۶۴ درجه شرقی است. بر اساس پژوهش‌های پیشین و شکل (۱) ایران کشوری مرتفع است. متوسط ارتفاع کشور ۱۳۰۰ با بالاترین ارتفاع ۵۶۷۱ متر (کوه دماوند) و کمترین مقدار در سواحل جنوبی دریای خزر (~۲۴- متر) می‌باشد. تقریباً ۶۰ درصد از خاک ایران را مناطق خشک یا نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالانه کمتر از ۳۰۰ میلیمتر پوشانده است (Mansoori, 1995). رشته‌کوه‌های البرز با محور غرب به شرق در شمال ایران و رشته‌کوه زاگرس با محور شمال غرب به جنوب شرق در غرب ایران قرار دارند و به‌عنوان مانعی در برابر ورود سامانه‌های بارشی عمل می‌کنند؛ بنابراین، دو منطقه بسیار خشک (دشت کویر و بیابان لوت) در فلات مرکزی ایران وجود دارد (Mansoori, 1995; Alizadeh, 2014). بارندگی زیاد و دما در ارتفاعات بالاتر در امتداد رشته‌کوه‌ها کم است. بارش به تدریج از منطقه پربارش شمال غربی به منطقه کم‌بارش جنوب‌شرقی کاهش می‌یابد، در حالی که دما به تدریج از شمال غرب به جنوب شرق افزایش می‌یابد (Sharafati et al., 2019).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و توزیع ارتفاعات ایران (چپ) و شبکه مورد استفاده و فاصله بین نقاط شبکه (راست)

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از داده‌های MERRA-2¹ برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی ازن استفاده شد. داده‌های بازکاوی شده MERRA-2 ناسا، جدیدترین محصول از سازمان مدل‌سازی و داده‌گذاری ناسا² است (Koster, et al., 2015). دوره آماری مورد مطالعه از ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا پایان سال ۲۰۲۰ با قدرت تفکیک فضایی ۰/۵ درجه عرض جغرافیایی و ۰/۶۲۵ طول جغرافیایی است. این داده‌ها محصول دو سیستم GEOS³ نسخه پنجم و سامانه داده‌گذاری (DAS) نسخه ۵.۱۲.۴ مدل گردش عمومی جو است (Knowland et al., 2017; Wargan et al, 2015, 2017) (جدول ۱). مقدار ازن کل حاصل از پایگاه داده‌های MERRA-2 نمایش مناسبی از میزان ازن استراتوسفر پایین دارد و اعتبار این داده‌ها با مقادیر حاصل از سنج‌ها به اثبات رسیده است (Wargan et al., 2017). ضمن اینکه مقادیر این پایگاه با داده‌های حاصل از سنج‌های TOMS نیز بررسی شده است و با بایاس حدود ۲ درصد نمایش خیلی خوبی از ازن دارد (Wargan et al, 2015). همچنین گاپتا و همکاران (۲۰۲۲) صحت داده‌های MERRA-2 را برای ارزیابی کیفیت هوا (ازن) در شبه‌جزیره هند تأیید کرده‌اند (Gupta et al., 2022). آنها با تقسیم منطقه به ۷ بخش، نشان دادند که داده‌های MERRA-2 برای مطالعات ازن و کیفیت هوا در هند مناسب است. اوغوز و همکاران (۲۰۲۲) نیز داده‌های MERRA-2 را با داده‌های اسپکتروفتومتر بروئر در آنکارا (ترکیه) مقایسه نموده و همبستگی بالایی ($R^2=0.9781$) بین این دو مجموعه داده نشان دادند (Oğuz et al., 2022). یکی از مزایای داده‌های پایگاه MERRA-2 در پایش میزان ازن کلی جو، ثبت طولانی داده‌ها می‌باشد. در واقع با توجه به اینکه این داده‌ها حاصل داده‌گذاری از منابع مختلف است به‌گونه‌ای ترکیبی از کلیه داده‌ها بوده و دارای دوره تقریباً ۴۰ ساله (۱۹۸۰- تاکنون) است. شکل ۱ (راست) و جدول ۱ به ترتیب پراکندگی نقاط شبکه و ویژگی‌های داده‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی داده‌های مورد استفاده در پژوهش

متغیر	واحد	منبع	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک فضایی	شروع داده	پایان داده
Total column ozone (M2IMNXASM v5.12.4)	Dobsons	MERRA-2 Model	ماهانه	0.5 x 0.625 °	1980-01-01	2019-12-31

تحلیل روند

به منظور بررسی تغییرات زمانی مقدار ازن کل جو ایران مبتنی بر یاخته‌های موجود در پهنه ایران از دو روش من کندانال و تخمین گر شیب سن استفاده شد. روش من-کندانال به طور گسترده در پژوهش‌های اقلیم‌شناسان به منظور آشکارسازی روند

1. NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version-2 (MERRA-2)
2. NASA's Global Modeling and Assimilation Office
3. the Goddard Earth Observing Systems Model Version 5

تغییرات استفاده شده است (Hanssen-Bauer & Førland, 1998; Chattopadhyay et al., 2011; Chattopadhyay et al., 2012; Kamali et al., 2020). این روش برای نخستین بار توسط من (۱۹۴۵) توسعه و سپس توسط کندال (۱۹۷۰) گسترش یافت (Li et al., 2013). آزمون من-کندال یک تحلیل روند ناپارامتریک برای شناسایی الگوهای افزایشی و کاهش سری زمانی داده‌ها است. در این روش رتبه داده‌های نمونه به جای مقادیر داده‌ها مقایسه می‌شود (Gilbert, 1987). در این آزمون فرض صفر (H_0) عبارت از عدم روند در داده‌ها است و این بدین معنی است که مشاهدات X_i به طور تصادفی در زمان مرتب شده‌اند. در مقابل فرض H_1 نمایانگر روند افزایش یا کاهش داده‌ها می‌باشد. در صورت وجود روند خطی در سری زمانی، شیب خط این سری زمانی توسط روش ناپارامتریک سن (۱۹۶۸) محاسبه می‌شود.

نتایج

تحلیل فضایی ازن در سرتاسر ایران

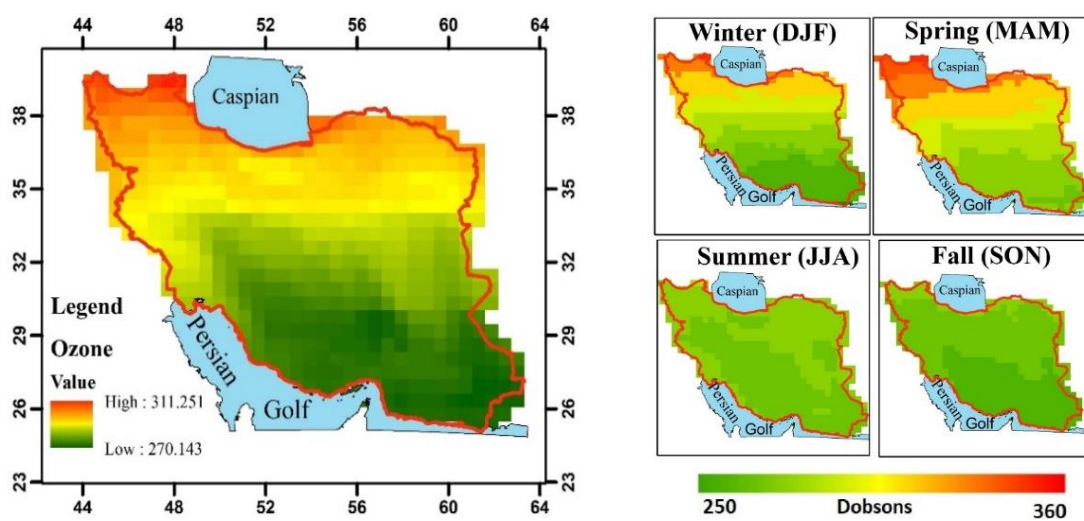
مشخصات کمی ازن در جدول (۲) ارائه شده است این جدول حاصل متوسط‌گیری از تمامی نقاط شبکه‌ای موجود در سرتاسر ایران است. بر این اساس متوسط میزان ازن به واحد دابسون حدود ۲۸۶/۶۲ است که متوسط کمینه آن در ماه اکتبر (۲۷۰/۰۲) و بیشترین آن در ماه مارس (۳۰۸/۳۹) رخ می‌دهد. بیشترین انحراف از معیار این گاز گلخانه‌ای حدود ۲۳/۲۱ دابسون است که متعلق به ماه فوریه و کمترین آن در دوره گرم سال به ویژه در ماه ژولای (۲/۵۹) رخ می‌دهد. توزیع فضایی ازن کلی جو ایران در مقیاس‌های زمانی متفاوت ویژگی‌های بسیار مهمی را آشکار می‌کند که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد.

جدول ۲. مشخصات کمی ازن شامل متوسط کمینه، بیشینه و متوسط و انحراف معیار ازن

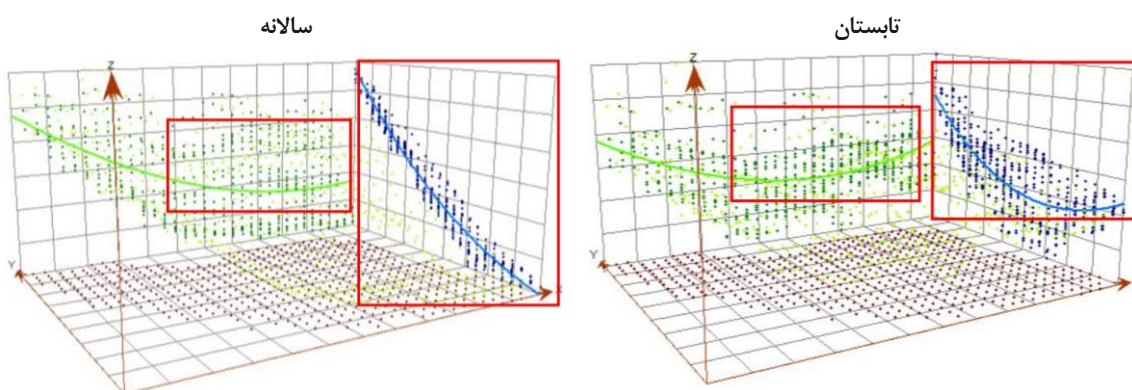
ماه	کمینه	بیشینه	متوسط	انحراف معیار	دامنه تغییرات
ژانویه	۲۵۸	۳۳۴	۲۹۳	۲۱	۷۶
فوریه	۲۶۴/۷۵	۳۴۸/۸۸	۳۰۲/۱۵	۲۳/۲۱	۸۴/۱۳
مارس	۲۷۴/۱۷	۳۵۴/۴۷	۳۰۸/۳۹	۲۱/۶۴	۸۰/۳
آوریل	۲۷۷/۸۶	۳۴۲/۱۴	۳۰۲/۱۸	۱۵/۹۶	۶۳/۱۴
مه	۲۷۷/۸۶	۳۲۹/۰۶	۲۹۵/۰۵	۱۱/۹	۵۱/۲
ژوئن	۲۷۴/۶۸	۳۰۶/۱۴	۲۵۸	۵/۴۷	۳۱/۴۶
ژولای	۲۷۲/۲	۲۸۷/۵۹	۲۷۹/۲	۲/۵۹	۱۴/۳۹
اوت	۲۷۰/۶	۲۸۴/۵۱	۲۷۶/۸۹	۲/۶۴	۱۳/۹۱
سپتامبر	۲۶۶/۳۵	۲۸۴/۶۴	۲۷۳/۸۲	۳/۲۲	۱۸/۲۹
اکتبر	۲۶۰/۴۷	۲۸۳/۱۴	۲۷۰/۰۲	۵/۰۱	۲۲/۶۷
نوامبر	۲۵۵/۷۸	۲۹۴	۲۷۳	۱۰/۴	۳۸/۲۲
دسامبر	۲۵۴/۴۶	۳۱۲/۳۰	۲۸۰/۷۸	۱۵/۷۱	۵۷/۸۴
سالانه	۲۶۷/۴۴	۳۱۳/۴۰۶	۲۸۶/۶۲	۱۱/۵۶	۴۵/۹۶

توزیع فضایی فصلی و سالانه ازن بر اساس داده‌های MERRA-2 در طول دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۹ در شکل (۲) نشان داده شده است. کمترین میزان ازن مربوط به نیمه جنوبی ایران است و به طور دقیق‌تر کمترین میزان در این نواحی، در مرزهای جنوب شرقی ایران نزدیک شهرهای همچون جالق، سوران، سراوان، زابلی، خاش، سرباز و ... و همچنین مناطق پست همچون چاله‌های جازموریان مشاهده می‌گردد. به عنوان نمونه در مناطق شهری مانند بافت و رایین استان کرمان حدود ۲۷۰ دابسون است. بیشترین میزان آن در نواحی شمال غربی ایران مشاهده می‌شود (۳۱۱ دابسون). به طور کلی توزیع فضایی ازن کل جو ایران دارای یک روند افزایشی از جنوب به شمال است. درک این موضوع بر اساس شکل (۳) ساده‌تر است. بر اساس این شکل روند افقی شمالی-جنوبی و روند شمال غربی - جنوب شرقی قابل مشاهده است. خط سبز روند شمال غربی - جنوب شرقی و خط آبی روند شمالی-جنوبی را نمایش می‌دهد. البته میزان ازن متأثر از ناهمواری‌ها و همچنین پستی و بلندی قرار می‌گیرد. عرض جغرافیایی یکی از عوامل موثر در توزیع سالانه این متغیر می‌باشد و روند افقی که در بالا ذکر شد متأثر از عرض جغرافیایی می‌باشد و به ارتباط آن در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است (شرعی‌پور و همکاران،

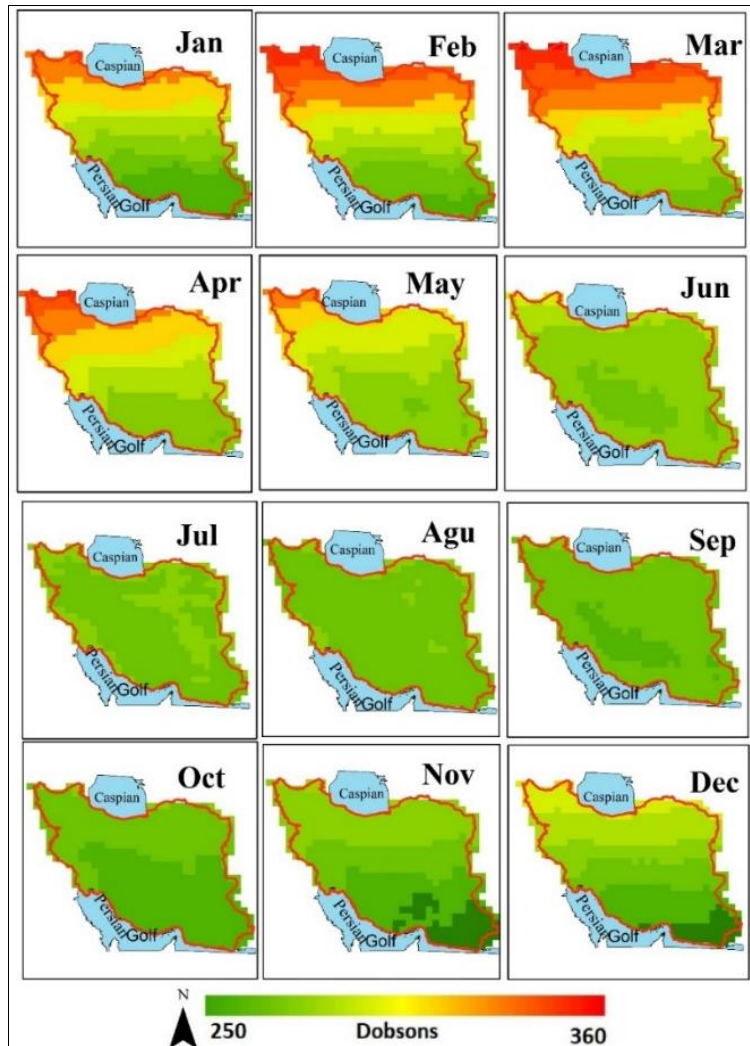
۱۳۹۲؛ Chen et al., 2014; Pal, 2010; Siddiqui et al., 2001). اما با این وجود ارتفاع، عاملی در ناهمگونی توزیع فضایی آن به ویژه در ماه‌های گرم سال یعنی ژوئن، ژولای، سپتامبر، اوت و سپتامبر محسوب می‌شود. افزون بر توزیع فضایی ازن، در عین حال میزان تمرکز آن در مقیاس زمانی مختلف نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد (شکل ۲). به منظور تبیین بهتر این موضوع روند تغییرات افقی ازن در فصل تابستان ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد روند افقی فصل تابستان با روند سالانه تا حدی متفاوت می‌باشد (شکل ۳) به‌طوری‌که مانند روند سالانه همچنان در نواحی شمالی و شمال غرب ایران قابل مشاهده است؛ ولیکن کمترین میزان آن با نواحی جنوب و جنوب شرق ایران منطبق نیست بلکه با نزدیک شدن به ارتفاعات مرکزی زاگرس میزان ازن به کمترین حد خود می‌رسد و دوباره در نواحی جنوبی بر میزان آن افزوده می‌شود. این موضوع درباره روند شمالی-جنوبی نیز صادق است. اشکال مربع ترسیم شده در شکل (۳) این مطلب را گویاتر نشان می‌دهد. در قاعده کلی در دوره گرم سال نمی‌توان نظم روند افقی را مشاهده نمود. در واقع توزیع فضایی ازن در تابستان در تمام کشور تقریباً یکسان می‌گردد. البته همچنان کمترین مقدار با ارتفاعات مقارن است. شکل ۵ روند معکوس میزان ازن با ارتفاعات را نمایش می‌دهد. شکل (۴) توزیع فضایی ماهانه ازن را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد دو روند مذکور در تمامی دوره‌های ماهانه مشاهده می‌شود و همانطور که بیان شد فقط در طی ماه‌های گرم سال این روند تا حدی دگرگون می‌شود. به لحاظ فراوانی زمانی بیشترین میزان ازن در فصل بهار (شکل ۲) و به طور دقیق‌تر در ماه مارس و فوریه (شکل ۴) مشاهده می‌گردد.



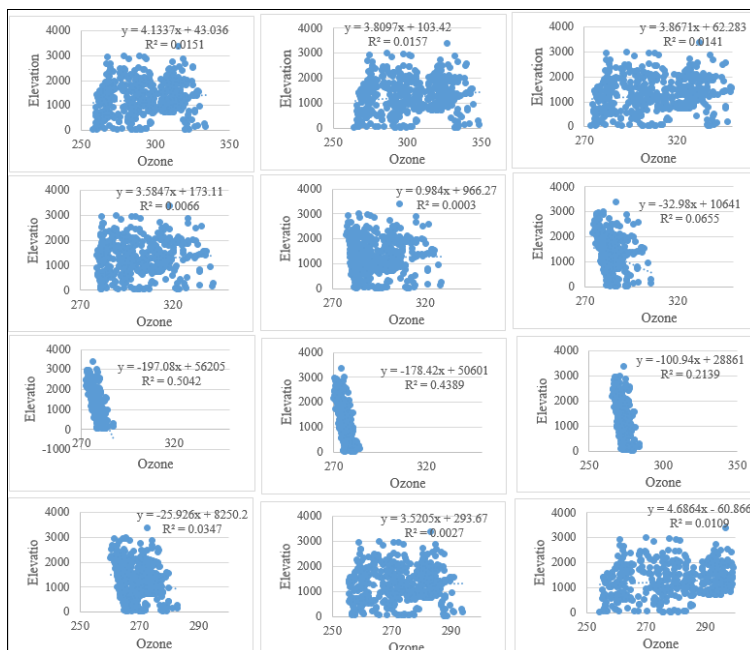
شکل ۲. توزیع فضایی فصلی و سالانه ازن طی ۱۹۸۱-۲۰۱۹



شکل ۳. روند تغییرات سالانه ازن (چپ) و فصل تابستان (راست)، X (طول جغرافیایی) Y (عرض جغرافیایی) Z (میزان ازن) روند از شمال به جنوب بوسیله خط آبی رنگ و روند از غرب به شرق بوسیله خط سبز رنگ نمایش داده شده است.



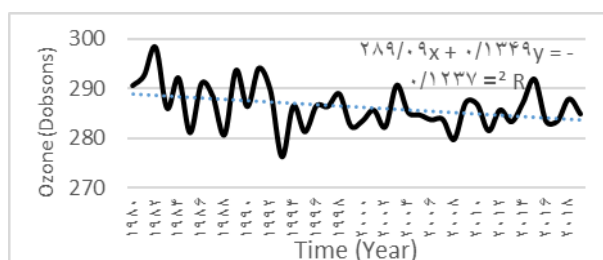
شکل ۴. توزیع فضایی ماهانه ازن طی ۲۰۱۹-۱۹۸۱



شکل ۵. نمودار پراکنش ازن و ارتفاع

تغییرات زمانی ازن

ازن افزون بر این که دارای توزیع فضایی - زمانی متفاوت است درعین حال میزان تمرکز آن در سال‌های مختلف نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد. شکل (۶) متوسط کلیه یاخته‌های تحت پوشش جو ایران است. بر اساس این شکل می‌توان دریافت که میزان متوسط ازن در سرتاسر جو ایران دارای نوسان درون سالانه است به طوری که کمترین و بیشترین میزان ازن به ترتیب در سال ۱۹۹۳ (۲۷۶/۲۳ دابسون) و سال ۱۹۸۲ (۲۹۸/۳۲ دابسون) قابل مشاهده است. همچنین، خط برازش داده شده نیز نمایانگر روند کاهشی ازن در طول زمان است. به منظور درک بیشتر این موضوع در بخش‌های بعدی به بررسی تغییرات ازن کل جو به صورت مکانی پرداخته می‌شود.



شکل ۶. تغییرات سالانه ستون ازن کل جو ایران (متوسط تمامی پیکسل‌ها)

به منظور درک بهتر از روند تغییرات میزان کلی ازن جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تمامی ماه‌های سال مبتنی بر مقادیر موجود در جدول (Test Z) به جز ماه نوامبر روند منفی را تجربه کرده‌اند. البته نیاز به ذکر است که این روندها فقط در دو ماه ژانویه و دسامبر در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است و دیگر ماه‌ها فقط روند منفی را نمایش می‌دهند ولی در هیچ سطحی معنی‌دار نیستند. شایان ذکر است که این دو ماه بیشترین روند شیب تغییرات را نیز دارند. در مقیاس سالانه روندی منفی با معنی‌داری در سطح ۹۰ درصد مشاهده می‌گردد. با توجه به اینکه فصل زمستان در این مطالعه شامل ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه در نظر گرفته شده است. به تبع می‌توان دریافت که روند ازن در این فصل دارای شیبی منفی و معنی‌دار باشد (جدول ۴). فصول دیگر سال همانند رفتار ماهانه روندی منفی را نشان می‌دهند اما این روند در هیچ سطحی معنی‌دار نمی‌باشند.

جدول ۳. نتایج بررسی روند داده‌های ماهانه ازن کلی جو ایران

ماه	من کندال		تخمین‌گر شیب سن									
	Test Z	معنی‌داری	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
ژانویه	-۲/۱۱	*	-۰/۳۵	-۰/۷۷	۰/۱۲	-۰/۶۴	-۰/۰۲	۳۰۱/۵۵	۳۱۰/۷۲	۲۹۰/۶۱	۳۰۸/۲۰	۲۹۳/۷۴
فوریه	-۱/۳۶		-۰/۳۰	-۰/۹۱	۰/۲۸	-۰/۷۷	۰/۱۳	۳۰۷/۰۹	۳۱۹/۰۴	۲۹۸/۸۴	۳۱۷/۰۶	۳۰۰/۰۱
مارس	-۱/۵۷		-۰/۲۵	-۰/۷۷	۰/۱۷	-۰/۶۴	۰/۰۵	۳۱۴/۴۳	۳۲۲/۸۰	۳۰۶/۸۸	۳۲۰/۶۶	۳۰۹/۹۴
آوریل	-۰/۳۸		-۰/۰۷	-۰/۴۱	۰/۳۰	-۰/۳۴	۰/۲۱	۳۰۲/۹۳	۳۰۹/۵۷	۲۹۳/۵۱	۳۰۸/۵۳	۲۹۵/۲۹
مه	-۰/۶۴		-۰/۰۸	-۰/۴۹	۰/۲۹	-۰/۳۷	۰/۱۷	۲۹۵/۱۵	۳۰۲/۸۱	۲۸۷/۵۹	۳۰۰/۸۸	۲۹۱/۳۸
ژوئن	-۰/۷۸		-۰/۰۴	-۰/۲۳	۰/۱۲	-۰/۱۸	۰/۰۷	۲۸۵/۲۱	۲۸۹/۴۸	۲۸۱/۷۴	۲۸۸/۳۰	۲۸۲/۶۶
ژوئیه	-۰/۴۸		-۰/۰۴	-۰/۲۱	۰/۱۴	-۰/۱۶	۰/۰۹	۲۷۹/۶۴	۲۸۲/۹۹	۲۷۵/۴۵	۲۸۱/۸۸	۲۷۶/۷۳
اوت	۰/۹۷		۰/۰۵	-۰/۰۸	۰/۲۲	-۰/۰۵	۰/۱۸	۲۷۶/۱۹	۲۷۸/۴۰	۲۷۲/۸۰	۲۷۷/۸۴	۲۷۳/۷۶
سپتامبر	-۰/۵۹		-۰/۰۲	-۰/۱۸	۰/۱۵	-۰/۱۴	۰/۰۹	۲۷۴/۶۸	۲۷۷/۰۴	۲۷۰/۴۴	۲۷۶/۳۴	۲۷۱/۶۷
اکتبر	-۱/۴۸		-۰/۱۱	-۰/۳۲	۰/۱۰	-۰/۲۸	۰/۰۴	۲۷۱/۹۵	۲۷۶/۸۳	۲۶۷/۶۷	۲۷۵/۷۹	۲۶۸/۹۱
نوامبر	۰/۰۰		۰/۰۰	-۰/۳۲	۰/۳۶	-۰/۲۴	۰/۲۶	۲۷۳/۷۳	۲۷۹/۹۳	۲۶۶/۱۴	۲۷۸/۶۰	۲۶۷/۹۶
دسامبر	-۲/۲۳	*	-۰/۳۵	-۰/۷۸	۰/۰۶	-۰/۷۲	-۰/۰۳	۲۸۷/۰۷	۲۹۵/۲۱	۲۷۹/۹۵	۲۹۴/۳۰	۲۸۱/۷۵
سالانه	-۱/۹۰	+	-۰/۱۴	-۰/۲۹	۰/۰۴	-۰/۲۵	۰/۰۰	۲۸۸/۶۹	۲۹۲/۰۷	۲۸۵/۵۳	۲۹۰/۸۷	۲۸۶/۱۰

(***) معنی‌داری در سطح ۰/۹۹ درصد، ** وجود روند در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد، * وجود روند در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد، + وجود روند در سطح معنی‌داری ۹۰ درصد، بدون علامت وجود روند در سطح معنی‌داری بیشتر از ۹۰ درصد).

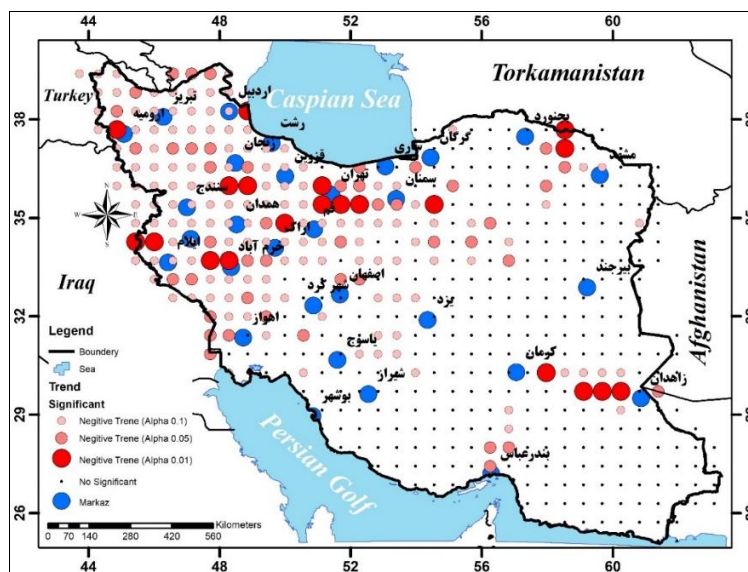
جدول ۴. نتایج بررسی روند داده های فصلی ازن

زمان	من کندال Test Z	تخمین گر شیب سن										
		معنی داری	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
زمستان	-۳/۰۶	**	-۰/۳۳	-۰/۵۸	-۰/۰۶	-۰/۵۱	-۰/۱۳	۲۹۸/۸۲	۳۰۳/۲۶	۲۹۳/۰۹	۳۰۱/۲۳	۲۹۴/۴۱
بهار	-۱/۳۴		-۰/۱۶	-۰/۴۵	۰/۱۶	-۰/۳۸	۰/۰۷	۳۰۵/۹۹	۳۱۲/۳۸	۲۹۷/۷۰	۳۱۰/۵۳	۳۰۰/۷۷
تابستان	-۰/۲۲		-۰/۰۲	-۰/۱۶	۰/۱۴	-۰/۱۲	۰/۱۰	۲۸۰/۷۹	۲۸۳/۶۲	۲۷۷/۳۶	۲۸۲/۶۶	۲۷۸/۰۱
زمستان	-۰/۷۱		-۰/۰۴	-۰/۲۰	۰/۱۵	-۰/۱۵	۰/۱۰	۲۷۳/۰۰	۲۷۶/۴۸	۲۶۹/۰۳	۲۷۵/۷۱	۲۷۰/۲۸

(***) معنی داری در سطح ۰/۹۹ درصد، ** وجود روند در سطح معنی داری ۹۹ درصد، * وجود روند در سطح معنی داری ۹۰ درصد، + وجود روند در سطح معنی داری ۹۰ درصد، بدون علامت وجود روند در سطح معنی داری بیشتر از ۹۰ درصد).

تغییرات فضایی - زمانی ازن در سرتاسر جو ایران

باتوجه به اینکه فصل زمستان دارای روند منفی و معنی دار مشخص گردید؛ بنابراین در ادامه تحلیل تلاش می‌گردد تغییرات فضایی این متغیر فقط در این دوره زمانی (یعنی فصل زمستان شامل ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه) تحلیل گردد. بررسی تغییرات فضایی - زمانی نمایش جالبی از روند میزان ازن نشان می‌دهد (شکل ۷). به‌طور کلی تمامی یاخته‌های مورد استفاده در این شکل حکایت از روند منفی دارد؛ ولی از نگاهی، اگر کشور ایران بر اساس قطر کوچک آن (از منطقه سرخس به خوزستان) به دو مثلث برابر تقسیم شود مثلی که در جانب شمال غربی واقع شده است؛ تماماً روند منفی معنی دار در سطوح مختلف را نمایش می‌دهد و مثلث جانب جنوبی ایران با راس جنوب شرقی در بیشتر یاخته‌ها روند منفی را نمایش می‌دهد؛ اما این روند در هیچ سطحی معنی دار نمی‌باشد. بیشترین یاخته‌های با روند منفی و معنی دار، متقارن با شهرهای بزرگ ایران هستند. به‌طوری‌که بالاترین سطح معنی داری، با میزان ازن در شهرهای بزرگ و صنعتی ایران همچون تهران، قم، اراک، مشهد، اصفهان، سنج، زاهدان، اردبیل، و... مطابقت دارد. به‌عنوان نمونه در شمال شرقی ایران حداقل بین شهرهای مشهد تا بجنورد می‌توان یاخته‌های با میزان روند منفی ازن را مشاهده کرد. علاوه بر وجود شهرهای بزرگ مانند مشهد و بجنورد می‌بایست به تراکم بالای جمعیت در این منطقه نیز اشاره داشت. فاصله این دو شهر حدود ۲۵۰ کیلومتر است؛ اما تقریباً در هر فاصله ۵۰ کیلومتری یک سکونتگاه‌های شهری همچون چناران، قوچان، فاروج، شیروان قرار دارد. علاوه بر اینها می‌توان به شرکت پتروشیمی خراسان، کارخانه قند و غیره اشاره داشت. در قطاع جنوب شرقی چند یاخته روند منفی ازن را نمایش می‌دهد که این یاخته‌ها نیز به شهر مانند زاهدان، کرمان و بندرعباس نزدیک است.

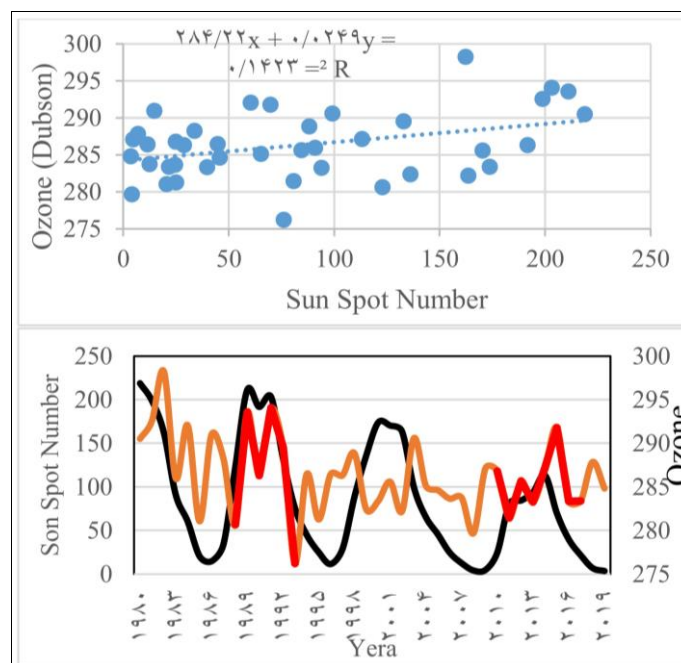


شکل ۷. روند فضایی ازن (دوایر به ترتیب سطح معنی داری در ۹۹ درصد، ۹۵ درصد، و ۹۰ درصد، و عدم معنی داری را نمایش می‌دهند).

بحث

یک از عوامل برهم‌زننده پایداری محیط، آلاینده‌های جوی مانند ازن هستند. ازن به دو صورت بد (تروپوسفر) و خوب (استراتوسفر) در لایه‌های جو شناخته می‌شود. کاهش ازن استراتوسفر منجر به آسیب‌رسانی به اکوسیستم‌های محیط‌زیست می‌شود. این امر منجر به ناپایداری محیط می‌گردد. پژوهش پیش‌رو با پایش فضایی آن و همچنین تحلیل تغییرات زمانی - مکانی آن نمایشی آشکار از آن ارائه داد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات رئیس پور و عساکره (۱۳۹۷) که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای دریافت شده از سایت حیوانی انجام شده است همخوانی دارد.

همانطور که در بخش تحلیل فضایی مشاهده شد بیشترین میزان ازن استراتوسفری در بخش‌های شمال غربی کشور مشاهده شد. متأسفانه بر اساس داده‌ها و مطالعات پیشین مشخص شده که در بین مردان ایرانی، سرطان پوست (بدون در نظر گرفتن ملانوم)، بارزترین سرطان است. استان‌های مرکزی، اصفهان و آذربایجان شرقی، به ترتیب بیشترین بروز پدیده را دارند (مجله ویستا، ۱۴۰۳). بر اساس مطالعات اپیدمیولوژیکی یا همه گیر شناسی که برای بررسی رابطه سرطان پوست و تماس با تابش فرابنفش توسط بنگاه بین‌المللی پژوهش سرطان در سال ۱۹۹۲، سازمان بهداشت جهانی سازمان بهداشت جهانی در سال ۱۹۹۴ و اسکاتو و همکاران (۱۹۹۶) و در سال ۲۰۰۲ توسط گروه مشاوره پرتوهای غیر یونیزاسیون انجام شده است، مهم‌ترین عامل خطر ساز ایجاد بدخیمی‌های پوست را تابش بیش از حد پرتوهای فرابنفش خورشید می‌دانند (به نقل از کاظمی و همکاران، ۱۳۹۴). به لحاظ فراوانی زمانی، بیشترین میزان ازن در فصل بهار و به طور دقیق‌تر در ماه فوریه و مارس مشاهده شد. این نتایج با مطالعات پیشین یکسان است و به‌گونه‌ای نمایش‌دهنده و متأثر از چرخه بروئر-دابسون^۱ است (Sekiguchi & Kida, 1971; Zhang et al., 2022). این نوسانات می‌تواند به دلیل تغییرات فصلی، فعالیت‌های خورشیدی و دیگر عوامل طبیعی باشد (Tang et al, 2018). شکل (۸) نوسانات تعداد لکه‌های خورشیدی را نسبت به میزان ازن نمایش می‌دهد. براین اساس یک رابطه قوی بین فعالیت‌های خورشیدی و سطح ازن اتمسفری وجود دارد. افزایش تعداد لکه‌های خورشیدی و تابش فرابنفش منجر به افزایش تولید ازن در استراتوسفر می‌شود. به جز عوامل طبیعی، عوامل انسانی با تولید گازهای همچون CFCs نیز منجر به کاهش سطح ازن می‌شوند (Van den Oever et al., 2024; Fleming et al., 2024) و در واقع آنچه شایان اهمیت است رفتار کاهشی میزان ازن کل جو در طول زمان مورد مطالعه است.



شکل ۸. واکنش تغییرات تعداد لکه‌های خورشیدی و میزان ازن (بالا) و سری زمانی این دو متغیر (پایین).

یکی از موضوعات مطرح شده، نقش ارتفاعات و کاهش سطح ازن می‌باشد زو و یو-ژوان (۲۰۰۵) نیز به وجود ازن کم در فلات ایران طی فصل تابستان نیز اشاره دارد و مهم‌تر اینکه کمبود ازن در فلات ایران بیشتر از فلات تبت است (Zhou & Yue-juan., 2005). شوالیه و همکاران (۲۰۰۷) به نقش ارتفاعات در تغییرات سطح میزان ازن اشاره دارد. به‌طور کلی در ارتفاعات پایین‌تر، فرایندهای شیمیایی و فیزیکی محلی، تأثیر بیشتری بر سطح ازن دارند؛ در حالی که در ارتفاعات بالاتر، فرایندهای بزرگ‌مقیاس جوی تأثیرگذارتر هستند (Chevalier et al., 2007). یعنی می‌توان به تأثیر ارتفاعات بلند روی بالاروی مرز لایه تروپوپاز و اثر واگرایی یا تشدید فرایند تخریب فتوشیمیایی لایه متجمع ازن و کاهش تراکم ازن روی ارتفاعات اشاره داشت. شرعی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) مهم‌ترین عامل در کاهش ازن مشاهده شده در اثر کوهستان زاگرس در فصل تابستان را نازک شدن ستون جوی در بالای کوهستان‌ها می‌دانند. افزون بر این در این زمان پرفشار بر روی آن استقرار دارد (Zarrin et al., 2011)؛ بنابراین جو در این زمان احتمالاً تغییرات مکانی نسبت به توپوگرافی پیدا می‌کند. در عرض‌های جغرافیایی بالا، انباشتگی هوا ارتفاع قله ازن را کاهش می‌دهد و منجر به تجمع ازن می‌شود که با ستون‌های ازن کل بالاتر در عرض‌های بالا مطابقت دارد (Felix, 2009).

علاوه بر تحلیل فضایی - زمانی ازن استراتوسفری، این پژوهش نشان داد که رابطه قوی میان نوسانات ازن و لکه‌های خورشیدی وجود دارد. در این زمینه مطالعات گسترده‌ای انجام شده است (callis & Nealy, 1978; Chandra, 1991; Saraf, 2003 & Beig, 2003). کالی‌سیسی و ماتیس (۲۰۰۶) پاسخ ازن اتمسفر میانی نسبت به چرخه‌های خورشیدی ۱۱ ساله را بررسی کردند و نشان دادند که متوسط ازن جهانی حدود ۲ درصد از حداکثر خورشیدی به حداقل خورشیدی کاهش می‌یابد (Calisesi & Matthes, 2006). افزون بر آن می‌توان به عوامل دیگری مانند فوران کوه پیناتوبو در سال ۱۹۹۱ و ال‌چیچون ۱۹۸۲ و ... که به طور قابل توجهی بر ترکیب استراتوسفر (به‌ویژه افزایش قابل توجه اتروسل‌های سولفاتی) و سطح ازن تأثیر گذاشت نیز اشاره داشت. این اتروسل‌ها به‌عنوان کاتالیزور در واکنش‌های شیمیایی که منجر به تخریب ازن می‌شوند، عمل می‌کنند. (Dhomse et al., 2020). به‌طوری که شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل‌های UM-UKCA و EMAC نشان داد که اتروسل‌های آتشفشانی باعث گرمایش و اثرات شیمیایی می‌شوند (Dhomse et al., 2020; Kilian et al., 2020).

روند سالانه ازن کل اتمسفر ایران نیز مورد ارزیابی قرار گرفته نشان می‌دهد که میزان ازن جو ایران دارای روند منفی بوده است. این بخش از مطالعه نیز هم‌راستا با نتایج جهانی همچون موسوی و همکاران (۲۰۱۷)، بل و همکاران (۲۰۱۸) و گزارش سازمان جهانی هواشناسی (۲۰۱۸) می‌باشد (Mousavi et al., 2017; Ball et al., 2018; WMO, 2018). تغییرات ازن در لایه استراتوسفر به چرخه بروئر دابسون مرتبط است. ازن بیشتر در منطقه حاره و بالای قطب نیمکره زمستانی تجمع می‌یابد و عوامل تخریب آن، مانند کلر و برم مصنوعی و دی‌اکسید گوگرد آتشفشانی، شرایط تخریب را فراهم می‌کنند (Orsolini et al., 2003). اثرات منفی تضعیف چرخه بروئر-دابسون از قطب به عرض‌های پایین‌تر گسترش می‌یابد و می‌توان این میزان از روند منفی را به آن مرتبط دانست (Hadjinicolaou & Pyle, 2004). موسوی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که رویداد ازن کم (LOEs¹) در نیمه دوم سال، به‌ویژه در اواخر تابستان، پاییز و اوایل زمستان بیشتر رخ می‌دهند (Mousavi et al., 2017). به‌طور کلی تراکم جمعیت در نواحی غربی، شمال غربی و غرب ایران نسبت به مثلث ضلع جنوب‌شرقی ذکر شده عملاً بیشتر است. تراکم جمعیت بالا در مناطق شهری می‌تواند به افزایش آلودگی هوا، کاهش کیفیت زندگی و فشار بر منابع طبیعی منجر شود. این دو عامل با هم می‌توانند پایداری محیط‌زیست را به خطر بیندازند و نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق برای کاهش اثرات منفی آن‌ها دارند (حیدرزاده و بهزادفر، ۱۳۹۸).

نتیجه‌گیری

این مطالعه، اولین مطالعه‌ای است که با استفاده از داده‌های پایگاه مرا-۲ به تحلیل فضایی-زمانی و همچنین پایش تغییرات متغیر ازن کل جو ایران پرداخته است. به طوری که میزان ازن کلی جو دارای روند شمال به جنوب و همچنین شمال غربی به جنوب‌شرقی است. در واقع، ازن تابعی از عرض جغرافیایی است؛ اما در دوره‌های گرم سال، این نظم کلی دگرگون شده و

ارتفاع به عنوان عاملی تأثیرگذار محسوب می‌شود. کمترین میزان ازن در نواحی جنوب ایران مشاهده می‌شود و در مناطق جنوبی، کمترین مقدار ازن در نواحی مانند سرباز (استان سیستان و بلوچستان) و بافت (استان کرمان) دیده می‌شود. میزان ازن به لحاظ زمانی نیز رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد، به طوری که میزان سالانه این متغیر دارای نوسانات سالانه است که نشان‌دهنده تغییرات دوره‌ای در سطح ازن می‌باشد. به طور کلی، ازن جو ایران دارای روند منفی است و این روند در دوره‌های سرد سال از شدت بیشتری برخوردار است و به لحاظ آماری نیز معنی‌دار می‌باشد. اگر ایران بر اساس قطر کوچک به دو نیمه تقسیم گردد، میزان ازن استراتوسفری در قطاع شمال غربی دارای روند منفی و معنی‌دار بوده، این در حالی است که در قطاع جنوب شرقی، میزان ازن همچنان که دارای روند منفی است، اما به جز در چند منطقه، این روند معنی‌دار نمی‌باشد. این تحلیل نشان می‌دهد که توزیع و تغییرات ازن در جو ایران تحت تأثیر عوامل جغرافیایی و زمانی مختلفی قرار دارد که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و مدیریت مناسب برای حفظ پایداری محیط زیست است.

منابع

- احمدی مقدم، مهدی؛ محمودی، پرویز (۱۳۹۲). تحلیل داده‌های آلودگی هوای تهران در دهه اخیر (۱۳۸۸-۱۳۷۹). سلامت و محیط‌زیست، ۶ (۱)، ۳۳-۴۴. URL: <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5135-fa.html>.
- حیدرزاده، احسان؛ بهزادفر، مصطفی (۱۳۹۸). تأثیر تراکم جمعیتی بر شاخص‌های کیفیت زندگی شهری نمونه مطالعه: منطقه ۳ کلانشهر تهران. پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۱۰ (۳۷)، ۱-۱۲. doi: 20.1001.1.22285229.1398.10.37.1.5.
- رئیس‌پور، کوهزاد؛ حسین، عساکره (۱۳۹۸). پایش ماهواره‌ای تغییرات لایه ازن در اتمسفر ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۸ (۲۲)، ۲۱۳-۲۳۱. doi: 10.22111/jneh.2019.28381.1490.
- شرعی‌پور، زهرا؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی (۱۳۹۳). بررسی توزیع مکانی زمانی آلاینده‌های هوا در شهر تهران برای ماه‌های سرد سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۳. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۶ (ویژه‌نامه)، ۱۳۳-۱۴۷. URL: <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/839712>.
- فرج‌زاده، منوچهر؛ قویدل، یوسف؛ علی‌اکبر بیدختی، عباسعلی؛ موسوی، سید شفیع (۱۳۹۵). تحلیل همبستگی رخداد حفره‌های کوچک ازن در منطقه ایران مرکزی (اصفهان). فیزیک زمین و فضا، ۴۲ (۳)، ۶۸۶-۶۷۳. doi: 10.22059/jesphys.2016.58890.
- کاظمی، آفاق؛ اسکندری، امید؛ کریمی، محمد (۱۳۹۴). بروز و توزیع جغرافیایی سرطان پستان در استان کردستان ایران. پوست و زیبایی، ۶ (۱)، ۳۸-۴۵. URL: <http://jdc.tums.ac.ir/article-1-5110-fa.html>.
- مجله ویستا (۱۴۰۳). نقشه سرطان در ایران. برگرفته از: <https://vista.ir/w/a/16/w1ss5/> نقشه-سرطان-در-ایران

References

- Ahmadi Moghadam, M., & Mahmoudi, P. (2013). Analysis of Tehran Air Pollution Data in Recent Decade (2000-2009). *Health and Environment*, 6 (1), 33-44 URL: <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5135-fa.html>. (In Persian)
- Alexandris, D., Varotsos, C., Kondratyev, K. Y., & Chronopoulos, G. (1999). On the altitude dependence of solar effective UV. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 24(5), 515-517. doi: 10.1016/S1464-1917(99)00082-3.
- Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric Research*, 143, 328-341. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.02.001.
- Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., & Rozanov, E. V. (2018). Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(2), 1379-1394. doi: 10.5194/acp-18-1379-2018.
- Boynard, A., Hurtmans, D., Koukoulis, M. E., Goutail, F., Bureau, J., Safieddine, S., Lerot, C., Hadji-Lazaro, J., Wespes, C., Pommereau, J.-P., Pazmino, A., Zyrichidou, I., Balis, D., Barbe, A., Mikhailenko, S. N., Loyola, D., Valks, P., Van Roozendaal, M., Coheur, P.-F., & Clerbaux,

- C. (2016). Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: Validation with independent total column and vertical profile measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(9), 4327-4353. doi: 10.5194/amt-9-4327-2016.
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242. doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
- Calisesi, Y., & Matthes, K. (2006). The middle atmospheric ozone response to the 11-year solar cycle. *Space Science Reviews*, 125(1-4), 273-286. doi: 10.1007/s11214-006-9063-4.
- Callis, L. B., & Nealy, J. E. (1978). Solar UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents. *Geophysical Research Letters*, 5(4), 249-252. doi: 10.1029/GL005i004p00249.
- Chandra, S. (1991). The solar UV related changes in total ozone from a solar rotation to a solar cycle. *Geophysical Research Letters*, 18(5), 837-840. doi: 10.1029/91GL00850.
- Chattopadhyay, G., Chakraborty, P., & Chattopadhyay, S. (2012). Mann–Kendall trend analysis of tropospheric ozone and its modeling using ARIMA. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3-4), 321-328. doi: 10.1007/s00704-012-0617-y.
- Chattopadhyay, S., Jhajharia, D., & Chattopadhyay, G. (2011). Univariate modelling of monthly maximum temperature time series over northeast India: Neural network versus Yule-Walker equation-based approach. *Meteorological Applications*, 18(1), 70-82. doi: 10.1002/met.214.
- Chen, L., Yu, B., Chen, Z., Li, B., & Wu, J. (2014). Investigating the temporal and spatial variability of Total Ozone Column in the Yangtze River Delta using satellite data: 1978–2013. *International Journal of Remote Sensing*, 6(12), 12527–12543. doi: 10.3390/rs61212527.
- Chevalier, A., Gheusi, F., Delmas, R., Ordóñez, C., Sarrat, C., Zbinden, R., Thouret, V., Athier, G., & Cousin, J.-M. (2007). Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: A ground-based study for western Europe over the period 2001–2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4311–4326. doi: 10.5194/acp-7-4311-2007.
- Chipperfield, M. P., & Randel, W. J. (2003). Global ozone: Past and future. In *Scientific assessment of ozone depletion: 2002* (pp. 4.1–4.90). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V., Cupeiro, M., Galbally, I. E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N. R., Lamarque, J.-F., Naik, V., Oltmans, S. J., Schwab, J., Shindell, D. T., Thompson, A. M., Thouret, V., Wang, Y., & Zbinden, R. M. (2014). Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2, 000029. doi: 10.12952/journal.elementa.000029.
- Dhomse, S. S., Mann, G. W., Antuña Marrero, J. C., Shallcross, S. E., Chipperfield, M. P., Carslaw, K. S., Marshall, L., Abraham, N. L., & Johnson, C. E. (2020). Evaluating the simulated radiative forcings, aerosol properties, and stratospheric warmings from the 1963 Mt Agung, 1982 El Chichón, and 1991 Mt Pinatubo volcanic aerosol clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 13627-13654. doi: 10.5194/acp-20-13627-2020.
- en, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- Farajzadeh, M., Rahimi, Y.G., Aliakbari Bidokhti, A.A., Mousavi, S.S. (2016). The synoptic analysis of ozone mini-hole events over central Iran (Esfahan). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 673-686. doi: 10.22059/jesphys.2016.58890. (In Persian)
- Faridi, S., Akbari, H., Faridi, H., et al. (2020). Human, forest and vegetation health metrics of ground-level ozone (SOMO35, AOT40f and AOT40v) in Tehran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 1351–1358. doi: 10.1007/s40201-020-00552-2.
- Felix, E. (2009). Investigation of long-term variations in stratospheric ozone through the combination of different satellite ozone data sets. *Master's thesis, Institute of Environmental Physics (IUP), University of Bremen (FBI), Bremen, Germany.*
- Fleming, E. L., Newman, P. A., Liang, Q., & Oman, L. D. (2024). Stratospheric temperature and ozone impacts of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai water vapor injection. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(1), e2023JD039298. doi: 10.1029/2023JD039298.
- Frith, S., Stolarski, R., & Bhartia, P. K. (2004). Implications of Version 8 TOMS and SBUV Data

- for Long-Term Trend Analysis. In *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (pp. 65-66). Kos, Greece.
- Ghaffarpasand, O., Nasi, S., & Davari Shalamzari, Z. (2020). Short-term effects of anthropogenic/natural activities on the Tehran criteria air pollutants: Source apportionment and spatiotemporal variation. *Building and Environment*, 186, 107298. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107298.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.
- Goudarzi, G., Geravandi, S., Foruozandeh, H., Babaei, A. A., Alavi, N., Niri, M. V., ... & Mohammadi, M. J. (2015). Cardiovascular and respiratory mortality attributed to ground-level ozone in Ahvaz, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-9. doi: 10.1007/s10661-015-4674-8.
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Denier van der Gon, H., Frost, G. J., Heil, A., Kaiser, J. W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J.-F., Liousse, C., Masui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raut, J.-C., Riahi, K., Schultz, M. G., Smith, S. J., Thompson, A., van Aardenne, J., van der Werf, G. R., & van Vuuren, D. P. (2011). Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980-2010 period. *Climatic Change*, 109(1-2), 163-190. doi: 10.1007/s10584-011-0154-1.
- Gupta, P., Verma, S., Payra, S., & Bhatla, R. (2022). Evaluation of MERRA-2 Total Columnar Ozone from Ground-Based and AIRS Satellite Product. In *Proceedings of URSI - RCRS 2022*, IIT (Indore), India, 1 - 4 December, 2022. Retrieved from here.
- Gupta, P., Verma, S., Payra, S., & Bhatla, R. (2022). An evaluation of long-term gridded datasets of total columnar ozone retrieved from MERRA-2 and AIRS over the Indian region. *Environ Sci Pollut Res* 30, 43586-43603. doi: 10.1007/s11356-023-25319-8.
- Hadjinicolaou, P., & Pyle, J. A. (2004). The impact of Arctic ozone depletion on northern middle latitudes: Interannual variability and dynamical control. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 47(1), 25-43. doi: 10.1023/B:JOCH.0000012242.06578.6c.
- Hanssen-Bauer, I., & Førland, E. J. (1998). Long-term trends in precipitation and temperature in the Norwegian Arctic: Can they be explained by changes in atmospheric circulation patterns? *Climatic Research*, 10(2), 143-153. doi: 10.3354/cr010143.
- Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M., & Zhai, P. M. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 172-173). Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415324.008.
- Heidarzadeh, E., & Behzadfar, M. (2019). The Impact of Population Density on Urban Quality of Life Indicators, Case Study: District 3 of Tehran. *The Journal of Urban Research and Planning*. 10(37), 1-12. doi: 20.1001.1.22285229.1398.10.37.1.5. (In Persian)
- Heue, K.-P., Coldewey-Egbers, M., Delcloo, A., Lerot, C., Loyola, D., Valks, P., & van Roozendaal, M. (2016). Trends of tropical tropospheric ozone from 20 years of European satellite measurements and perspectives for the Sentinel-5 Precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 5037-5051. doi: 10.5194/amt-9-5037-2016.
- Kamali, A., Khosravi, M., & Hamidianpour, M. (2020). Spatial-temporal analysis of net primary production (NPP) and its relationship with climatic factors in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 718. doi: 10.1007/s10661-020-08667-7.
- Kazemi, A., Eskandari, O., & Karimi, M. (2015). Incidence rate and geographical distribution of skin cancer in Kurdistan province of Iran. *Journal of Dermatology and Cosmetic*, 6(1), 38-45. Retrieved from <http://jdc.tums.ac.ir/article-1-5110-fa.html>. (In Persian)
- Kerr, J. B., & McElroy, C. T. (1995). Total ozone measurements made with the Brewer ozone

- spectrophotometer during STOIC 1989. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D5), 9225-9230. doi: 10.1029/94JD02147.
- Kiehl, J. T., Schneider, T. L., Portmann, R. W., & Solomon, S. (1999). Climate forcing due to tropospheric and stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24), 31239–31254. doi: 10.1029/1999JD900991.
- Kilian, M., Brinkop, S., & Jöckel, P. (2020). Impact of the eruption of Mt Pinatubo on the chemical composition of the stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(19), 11697-11715. doi: 10.5194/acp-20-11697-2020.
- Knowland, K. E., Ott, L. E., Duncan, B. N., & Wargan, K. (2017). Stratospheric intrusion-influenced ozone air quality exceedances investigated in the NASA MERRA-2 reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(20), 10691-10701. doi: 10.1002/2017GL074532.
- Koster, R. D., Bosilovich, M. G., Akella, S., Lawrence, C., Cullather, R., Draper, C., Gelaro, R., Kovach, R., Liu, Q., Molod, A., Norris, P., Wargan, K., Chao, W., Reichle, R., Takacs, L., Todling, R., Vikhliayev, Y., Bloom, S., Collow, A., Partyka, G., Labow, G., Pawson, S., Reale, O., Schubert, S., & Suarez, M. (2015). Initial evaluation of the climate in MERRA-2. *NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, 43, NASA/TM-2015-104606/VOL.43. doi: 10.1016/S1464-1917(99)00082-3.
- Lee, H.-J., Kim, S.-W., Brioude, J., Cooper, O. R., Frost, G. J., Kim, C.-H., Park, R. J., Trainer, M., & Woo, J.-H. (2014). Transport of NO_x in East Asia identified by satellite and in-situ measurements and Lagrangian particle dispersion model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 2574–2596. doi: 10.1002/2013JD021185.
- Levelt, P. F., Van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Mälkki, A., Visser, H., Vries, J. d., Stammes, P., Lundell, J. O. V., & Saari, H. (2006). The Ozone Monitoring Instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093–1101. doi: 10.1109/TGRS.2006.872333.
- Li, Z., Huffman, T., McConkey, B., & Townley-Smith, L. (2013). Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data. *Remote Sensing of Environment*, 138, 232–244. doi: 10.1016/j.rse.2013.07.020.
- Lin, M., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., Cooper, O. R., Naik, V., Holloway, J., Johnson, B. J., Middlebrook, A. M., Oltmans, S. J., Pollack, I. B., Ryerson, T. B., Warner, J. X., Wiedinmyer, C., Wilson, J., & Wyman, B. (2012). Transport of Asian ozone pollution into surface air over the western United States in spring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D00V07. doi: 10.1029/2011jd016961.
- Lin, M., Horowitz, L. W., Payton, R., Fiore, A. M., & Tonnesen, G. (2017). US surface ozone trends and extremes from 1980 to 2014: Quantifying the roles of rising Asian emissions, domestic controls, wildfires, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 2943–2970. doi: 10.5194/acp-17-2943-2017.
- Liu, J. J., Jones, D. B. A., Worden, J. R., Parrington, M., & Kar, J. (2009). Analysis of the summertime buildup of tropospheric ozone abundances over the Middle East and North Africa as observed by the Tropospheric Emission Spectrometer instrument. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D7), 1-15. doi: 10.1029/2008JD010993.
- Mansoori, J. (1995). Islamic Republic of Iran. In D. A. Scott (Ed.), *A Directory of Wetlands in the Middle East*. Retrieved from <http://www.earthspace.org/rl/es15056/scd01h.html>.
- Meul, S., Langematz, U., Oberländer, S., Garny, H., & Jöckel, P. (2014). Chemical contribution to future tropical ozone change in the lower stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 2959–2971. doi: 10.5194/acp-14-2959-2014.
- Morelli, J. (2011). Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of Environmental Sustainability*, 1(1), Article 2. doi: 10.14448/jes.01.0002.
- Mousavi, S. S., Farajzadeh, M., Rahimi, Y. G., & others. (2017). Climatic variability of the column ozone over the Iranian plateau. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(3), 309–320. doi: 10.1007/s00703-016-0474-9.
- Nawrot, T., Nemmar, A., & Nemery, B. (2006). Update in Environmental and Occupational

- Medicine 2005. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 173(9), 948–952. doi: 10.1164/rccm.2601010.
- Oberländer, S., Langematz, U., & Meul, S. (2013). Unraveling impact factors for future changes in the Brewer-Dobson circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 10296–10312. doi: 10.1002/jgrd.50775.
- Oğuz, K., Ekici, M., & Açar, Y. (2022). Spatial and temporal variation of total column ozone over Turkey with MERRA-2. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(3), 154-164. doi: 10.30897/ijegeo.1039383.
- Orsolini, Y. J., Manney, G. L., Santee, M. L., & Randall, C. E. (2003). Summertime low-ozone episodes at northern high latitudes. *Geophysical Research Letters*, 30(11), 1587. doi: 10.1029/2002GL016706.
- Pal, C. (2010). Variability of total ozone over India and its adjoining regions during 1997–2008. *Atmospheric Environment*, 44(15), 1927–1936. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.028.
- Parrish, D. D., Law, K. S., Staehelin, J., Derwent, R., Cooper, O. R., Tanimoto, H., Volz-Thomas, H., Gilge, S., Scheel, H.-E., Steinbacher, M., & Chan, E. (2013). Lower tropospheric ozone at northern mid-latitudes: Changing seasonal cycle. *Geophysical Research Letters*, 40, 1631–1636. doi: 10.1002/grl.50303.
- Rafiq, L., Tajbar, S., & Manzoor, S. (2017). Long term temporal trends and spatial distribution of total ozone over Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 295-301. doi: 10.1016/j.ejrs.2017.05.002.
- Raispour, K., & Asakereh, H. (2019). Satellite Monitoring Of Ozone Layer Changes In The Atmosphere Of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(22), 213-228. doi: 10.22111/jneh.2019.28381.1490. (In Persian)
- Saraf, N., & Beig, G. (2003). Solar response in the vertical structure of ozone and temperature in the tropical stratosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(11-13), 1235–1243. doi: 10.1016/j.jastp.2003.08.006.
- Scotto, J., Fears, T. R., & Fraumeni, J. F., Jr. (1996). Solar radiation. In D. Schottenfeld & J. F. Fraumeni Jr. (Eds.), *Cancer epidemiology and prevention* (1st ed., pp. 355–372). Oxford University Press.
- Sekiguchi, Y., & Kida, H. (1971). The seasonal variation of total ozone amount in middle latitudes. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 49(2), 95–110. doi: 10.2151/jmsj1965.49.2_95.
- Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2019). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884. doi: 10.1002/joc.6307.
- Sharipour, Z., AkbariBidokhti, A. (2014). Investigation of spatial and temporal distributions of air pollutants over Tehran in cold months of 2011-2013. *Journal of Environmental Science and Technology*, 16(1), 149-166. <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jest/Article/839712>. (In Persian)
- Siddiqui, Z. R., Fawz-ul-Haq, K. R., Hussain, S., & Shaheen, L. (2001). Satellite observed distribution and variation of total ozone over Pakistan. In *The Sixth Asia-Pacific Conference on Multilateral Cooperation in Space Technology and Applications*, Beijing, China, September 18–21.
- Sun, L., Xue, L., Wang, T., Gao, J., Ding, A., Cooper, O. R., Lin, M., Xu, P., Wang, Z., Wang, X., Wen, L., Zhu, Y., Chen, T., Yang, L., Wang, Y., Chen, J., & Wang, W. (2016). Significant increase of summertime ozone at Mount Tai in Central Eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10637–10650. doi: 10.5194/acp-16-10637-2016.
- Tang, C., Wu, B., Wei, Y., Qing, C., Dai, C., Li, J., & Wei, H. (2018). The responses of ozone density to solar activity in the mesopause region and the mutual relationship based on SABER measurements during 2002–2016. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(3), 3039–3049. doi: 10.1002/2017JA025126.
- Torbatian, S., Hoshyaripour, A., Shahbazi, H., & Hosseini, V. (2020). Air pollution trends in Tehran and their anthropogenic drivers. *Atmospheric Pollution Research*, 11(3), 429-442. doi: 10.1016/j.apr.2019.11.015.

- van den Oever, A. E. M., Puricelli, S., Costa, D., Thonemann, N., Lavigne Philippot, M., & Messagie, M. (2024). Revisiting the challenges of ozone depletion in life cycle assessment. *Cleaner Environmental Systems*, 13(June), 100196. doi: 10.1016/j.cesys.2024.100196.
- Varotsos, C. A., Chronopoulos, G. J., Katsiki, S., & Sakellariou, N. K. (1995). Further evidence of the role of air pollution on solar ultraviolet radiation reaching the ground. *International Journal of Remote Sensing*, 16(11), 1883–1886. doi: 10.1080/01431169508954525.
- Wargan, K., Labow, G., Frith, S., Pawson, S., Livesey, N., & Partyka, G. (2017). Evaluation of the Ozone Fields in NASA's MERRA-2 Reanalysis. *Journal of climate*, 30(No 8), 2961–2988. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0699.1.
- Wargan, K., Labow, G., Frith, S., Pawson, S., Livesey, N., & Partyka, G. (2015). The global structure of upper troposphere-lower stratosphere ozone in GEOS-5: A multiyear assimilation of EOS Aura data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 2013–2036. doi: 10.1002/2014JD022493.
- World Meteorological Organisation (WMO). (2010). *Scientific assessment of ozone depletion: Global ozone research and monitoring project-report No. 52*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. NOAA CSL: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010.
- World Meteorological Organisation (WMO). (2018). *Scientific assessment of ozone depletion: Global ozone research and monitoring project-report No. 52*. Geneva, Switzerland. Retrieved from <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/>.
- Yari, A. R., Goudarzi, G., Geravandi, S., Dobaradaran, S., Yousefi, F., Idani, E., ... Mohammadi, M. J. (2016). Study of ground-level ozone and its health risk assessment in residents in Ahvaz City, Iran during 2013. *Toxin Reviews*, 35(3–4), 201–206. doi: 10.1080/15569543.2016.1225769.
- Young, P. J., Archibald, A. T., Bowman, K. W., Lamarque, J.-F., Naik, V., Stevenson, D. S., Tilmes, S., Voulgarakis, A., Wild, O., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., Collins, W. J., Dalsøren, S. B., Doherty, R. M., Eyring, V., Faluvegi, G., Horowitz, L. W., Josse, B., Lee, Y. H., MacKenzie, I. A., Nagashima, T., Plummer, D. A., Righi, M., Rumbold, S. T., Skeie, R. B., Shindell, D. T., Strode, S. A., Sudo, K., Szopa, S., & Zeng, G. (2013). Preindustrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 2063–2090. doi: 10.5194/acp-13-2063-2013.
- Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., Mofidi, A., & Mirzaei, E. (2011). The effect of the Zagros Mountains on the formation and maintenance of the Iran Anticyclone using RegCM4. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112(1-2), 91-100. doi: 10.1007/s00703-011-0134-z.
- Zhang, C., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Andrienko, Y., Shulga, V., Han, W., & Shi, Y. (2022). The annual cycle in mid-latitude stratospheric and mesospheric ozone associated with quasi-stationary wave structure by the MLS data 2011–2020. *Remote Sensing*, 14(23), 2309. doi: 10.3390/rs14102309.
- Zhang, Y., Cooper, O. R., Gaudel, A., Thompson, A. M., Nedelec, P., Ogino, S.-Y., & West, J. J. (2016). Tropospheric ozone change from 1980 to 2010 dominated by equatorward redistribution of emissions. *Nature Geoscience*, 9(12), 875–879. doi: 10.1038/NGEO2827.
- Zhou, R., & Yue-juan, C. (2005). Ozone variations over the Tibetan and Iranian Plateaus and their relationship with the South Asia High. *Journal of University of Science and Technology of China*. Retrieved from Semantic Scholar.

