

Examination and Analysis of Annual, Seasonal, and Monthly Variations in Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Across the Middle East Region Utilizing SCIAMACHY, GOSAT, and OCO-2 Satellite Data

Seyed Mohsen Mousavi,¹ Naghmeh Mobarghaee Dinan,^{1*} Saeed Ansarifard²

¹ Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² School of Physics, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran, Iran

Introduction: Climate change and global warming, caused by the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, have garnered significant attention across various national and international sectors. The emission of greenhouse gases has long been recognized as one of the most pressing environmental issues, sparking widespread concern. Since the Industrial Revolution and the subsequent changes in human lifestyles, the demand for energy and the consumption of fossil fuels have escalated, leading to increased greenhouse gas emissions. Consequently, during this industrialization period, atmospheric carbon dioxide concentration has risen from 280 ppm to 419 ppm. While the input and output of atmospheric carbon dioxide have traditionally remained in balance with nature, human activities and carbon dioxide emissions have disrupted this equilibrium in recent decades, giving rise to climate change and global warming.

Materials and Methods: There are various methods for measuring the concentration of atmospheric carbon dioxide. Remote sensing technology, in particular, has emerged as a solution, overcoming the limitations of ground-based measurement methods by offering continuous monitoring and global coverage of greenhouse gases. Despite the absence of ground stations for monitoring greenhouse gases in the Middle East region, comprising 15 countries spanning 7,207,570 square kilometers, this study investigates the monthly, seasonal, and annual atmospheric concentrations of carbon dioxide using data from satellites such as SCIAMACHY, GOSAT, and OCO. The study period spans from 2003 to 2020.

Results and Discussion: The findings of this research indicate a significant increase in atmospheric carbon dioxide concentration over the 18 years examined by all three satellites. From 2003 to 2011, as observed by SCIAMACHY, the average atmospheric concentration of this greenhouse gas rose from 375.22 ppm to 391.32 ppm, representing an annual average increase of 2.01 ppm. Subsequently, between 2010 and 2020, GOSAT data revealed an increase in CO₂ concentration from 388.81 ppm to 411.55 ppm, with an average annual rise of 2.27 ppm. Moreover, from 2015 to 2020, the atmospheric concentration of carbon dioxide observed by the OCO-2 satellite rose from 399.73 ppm to 412.27 ppm, with an average growth rate of approximately 2.55 ppm. In addition to examining annual changes, this study also investigated seasonal and monthly variations in atmospheric carbon dioxide concentration. The lowest concentrations of this greenhouse gas occurred during the summer months, particularly in August and September, while the highest concentrations were observed during the spring months, specifically in April and May. Furthermore, the analysis of differences in atmospheric carbon dioxide between seasons revealed the most significant changes from spring to summer, with an average decrease of 6 ppm. Conversely, the highest increases in atmospheric carbon dioxide between seasons were observed from summer to autumn, with a recorded average increase of approximately 4 ppm.

Conclusion: This research indicates a notable increase in atmospheric carbon dioxide concentration in the Middle East region from 2003 to 2020, accompanied by seasonal and monthly fluctuations consistent with global trends of this greenhouse gas. This long-term rise in greenhouse gas levels can lead to various detrimental effects in the region, including temperature escalation, alterations in rainfall patterns, heightened drought severity, and damage to natural

* Corresponding Author Email Address: n_mobarghaee@sbu.ac.ir

ecosystems. Consequently, the socio-economic stability of the region could be jeopardized, impacting agriculture, water resources, human health, and biodiversity. To effectively manage and mitigate greenhouse gas emissions, immediate action is imperative at both national and international levels. Such measures may involve promoting renewable energy sources, enhancing energy efficiency, curbing industrial pollution, advancing emission reduction technologies, and fostering regional and international collaboration in greenhouse gas reduction efforts. Moreover, public awareness campaigns and policy interventions are essential to mobilize stakeholders and facilitate the transition to a low-carbon economy in the Middle East, ensuring sustainable development and climate resilience for future generations.

Keywords: Remote sensing, Climate change, Greenhouse gases, Atmospheric Carbon Dioxide, Global warming

المجلة
للبحوث
البيئية

بررسی و تحلیل تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه غلظت اتمسفری دی‌اکسیدکربن در منطقه خاورمیانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌های OCO-2 و GOSAT، SCIAMACHY

سید محسن موسوی^۱، نغمه مبر قعی دینان^۱، سعید انصاری فرد^۲

^۱ گروه برنامه ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران

سابقه و هدف: تغییر اقلیم و گرمایش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، توجه زیادی را در بخش‌های مختلف ملی و بین‌المللی به این موضوع جلب کرده است. همواره انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از مسائل مهم محیط زیستی محسوب شده و نگرانی‌های زیادی را به وجود آورده است. از زمان انقلاب صنعتی و تغییرات در زندگی انسان، نیاز به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردیده است. به طوری که در طول این و از دوران صنعتی شدن تا به حال مقدار غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری از ppm ۲۸۰ به ۴۱۹ ppm افزایش داشته است. مقادیر ورودی و خروجی دی‌اکسیدکربن اتمسفری به‌طور طبیعی در تعادل با طبیعت بوده است، اما در چند دهه اخیر به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی و انتشار دی‌اکسیدکربن، این تعادل برهم خورده و باعث ایجاد پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شده است.

مواد و روش‌ها: روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری وجود دارد، علم سنجش از دور با پایش مداوم و پوشش جهانی گازهای گلخانه‌ای، بر محدودیت سایر روش‌های اندازه‌گیری زمینی غلبه کرده است. در منطقه خاورمیانه هیچ گونه ایستگاه زمینی برای پایش گازهای گلخانه‌ای وجود ندارد لذا در این مطالعه بررسی غلظت اتمسفری ماهانه، فصلی و سالانه گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن با استفاده از داده‌های ماهواره‌های OCO-2 و GOSAT، SCIAMACHY در منطقه خاورمیانه شامل ۱۵ کشور با مساحت ۷۲۰۷۵۷۰ کیلومترمربع است از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ صورت گرفت.

نتایج و بحث: نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری در این دوره ۱۸ ساله، برای هر سه ماهواره افزایش قابل توجهی داشته است. در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۱، که تنها مختص داده‌های SCIAMACHY بوده است میانگین غلظت اتمسفری این گاز

گلخانه‌ای از ۳۷۵.۲۲ ppm در سال ۲۰۰۳ به ۳۹۱.۳۲ ppm در سال ۲۰۱۱ افزایش یافت که افزایش میانگین سالانه آن ۲.۰۱ ppm را شامل بوده است. در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۰، غلظت دی‌اکسیدکربن ماهواره GOSAT از ۳۸۸.۸۱ ppm در سال ۲۰۱۰ به ۴۱۱.۵۵ ppm در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است و میانگین افزایش سالانه غلظت اتمسفری دی‌اکسیدکربن ۲.۲۷ ppm بوده است. در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۰، مقدار غلظت اتمسفری این گاز گلخانه‌ای ماهواره‌ی OCO-2 از ۳۹۹.۷۳ در سال ۲۰۱۵ به ۴۱۲.۲۷ ppm در سال ۲۰۲۰ افزایش یافت و میانگین نرخ رشد آن حدود ۲.۵۵ ppm بود است. علاوه بر تغییرات سالانه، تغییرات فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری نیز در این مطالعه بررسی شد. کمترین میزان غلظت این گاز گلخانه‌ای در طول سال در فصل تابستان و در ماه‌های اوت و سپتامبر و بیشترین مقدار غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در فصل بهار و در ماه‌های آوریل و می مشاهده گردید. همچنین نتایج محاسبه اختلاف دی‌اکسیدکربن اتمسفری بین فصول مختلف نشان داد که بیشترین تغییرات بین فصول مختلف، از بهار به تابستان بود است که غلظت این گاز گلخانه‌ای به‌طور متوسط ۶ ppm کاهش یافته است. از طرفی تغییرات این گاز گلخانه‌ای بین فصول مختلف نشان داد که بیشترین افزایش دی‌اکسیدکربن اتمسفری نیز از تابستان به پاییز مشاهده شد که مقدار آن حدود ۴ ppm ثبت گردیده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که غلظت اتمسفری گاز دی‌اکسیدکربن در منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته است. این افزایش همراه با تغییرات فصلی و ماهانه خاصی بوده که با تغییرات جهانی این گاز گلخانه‌ای مطابقت دارد. افزایش طولانی‌مدت گاز گلخانه‌ای می‌تواند تأثیرات جدی بر منطقه داشته باشد، از جمله این تأثیرات می‌توان به افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی، خشکسالی‌های شدیدتر و آسیب به اکوسیستم‌های طبیعی اشاره نمود. برای مدیریت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، اقدامات فوری و موثری در سطوح ملی و بین‌المللی ضروری است، این اقدامات می‌تواند شامل: ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش کارایی انرژی، کاهش آلودگی صنعتی، توسعه فناوری‌های کاهش انتشار و همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی در کاهش گازهای گلخانه‌ای باشد.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، تغییر اقلیم، گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن اتمسفری، گرمایش جهانی

مقدمه

تغییر اقلیم و به‌ویژه گرمایش جهانی به دلیل افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، سبب جلب توجه به این موضوع شده (Ghayoumi *et al.*, 2023; Borhani *et al.*, 2023) و نگرانی‌های گسترده‌ای را در جوامع بین‌المللی به وجود آورده است (Fu *et al.*, 2019; Darvishi *et al.*, 2024). به‌طوری‌که انتشار گازهای گلخانه‌ای به یکی از کانون‌های موردتوجه کارشناسان محیط‌زیست تبدیل شده است (Koskela *et al.*, 2011; Yousefi *et al.*, 2021). با آغاز انقلاب صنعتی و تغییر و تحول در زندگی انسان، نیاز بشر به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردیده است (Jenn *et al.*, 2019). به طوری‌که میانگین غلظت اتمسفری گاز دی‌اکسید کربن از سال ۱۷۵۰ تا سال ۲۰۲۱ از مقدار ۲۸۰ ppm

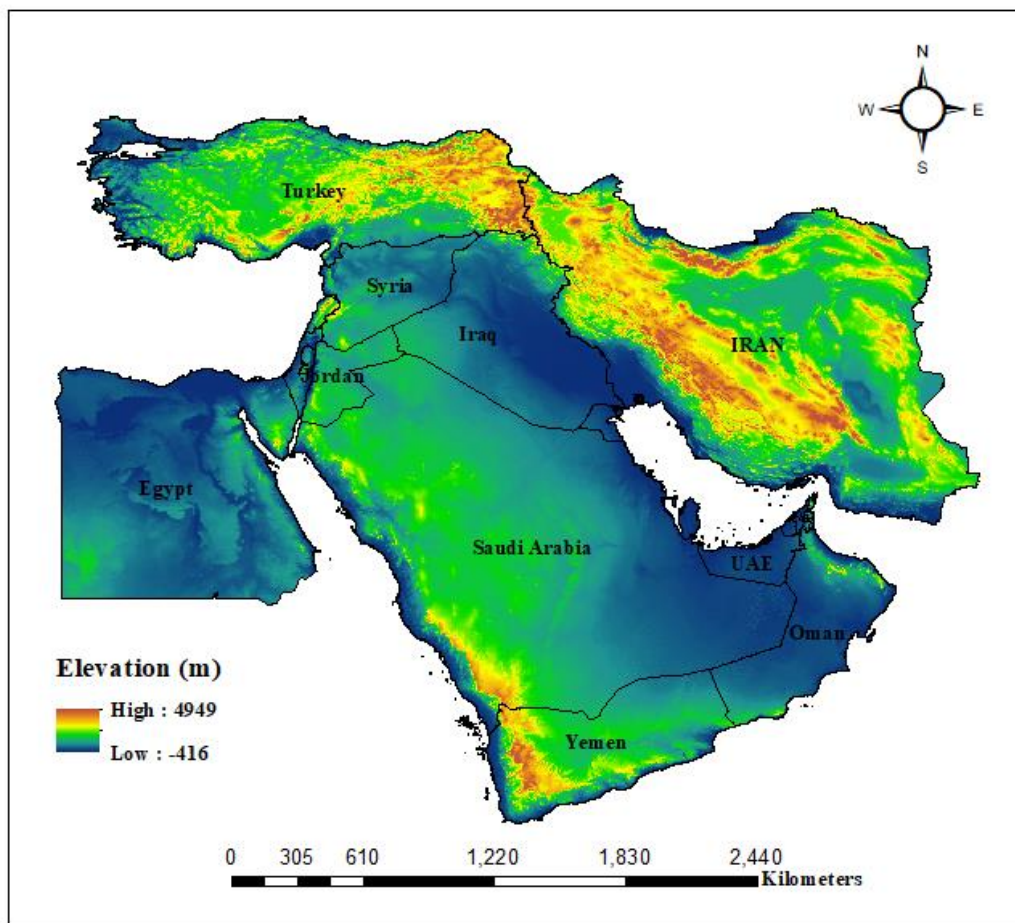
به ۴۱۹ ppm رسیده است (Dlugokencky and Tans, 2024). اگر زمین به عنوان یک سیستم در نظر گرفته شود دارای منابع ورودی و خروجی کربن می‌باشد. منابع ورودی سبب اضافه کردن دی‌اکسیدکربن به اتمسفر و منابع خروجی موجب خارج شدن کربن از اتمسفر می‌شوند. منابع ورودی کربن شامل تنفس گیاهان، تنفس خاک، مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی و از منابع خروجی کربن می‌توان به جذب کربن توسط اقیانوس‌ها، انتشار در اتمسفر و جذب آن به وسیله فتوسنتز گیاهان اشاره کرد (Mac Dowell *et al.*, 2017). منابع ورودی و خروجی کربن به طور طبیعی در حال دارای تعادل باهم می‌باشند. اما طی چند دهه اخیر به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن این تعادل برهم خورده و باعث به وجود آمدن پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شده است (IPCC^۱, 2019). روش‌های مختلفی به منظور اندازه‌گیری گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن وجود دارند، این روش‌ها شامل: ایستگاه‌های زمینی، برج‌های بلند، بالن، اندازه‌گیری توسط کشتی و هواپیما و ... می‌باشند (O'dell *et al.*, 2018). اگرچه این روش‌ها اندازه‌گیری‌های دقیقی را انجام می‌دهند اما از لحاظ مکانی محدود بوده به طوری که هیچ گونه ایستگاه زمینی در منطقه خاورمیانه و کشور ایران وجود ندارد (Mousavi and Falahatkar, 2020). علم سنجش از دور با پایش‌های مداوم گازهای گلخانه‌ای و پوشش جهانی آن بر این مشکل غلبه کرده و اندازه‌گیری‌ها را برای سراسر دنیا انجام می‌دهند (Pan *et al.*, 2021). ماهواره‌های مختلفی به اندازه‌گیری غلظت اتمسفری گاز دی‌اکسیدکربن می‌پردازند که می‌توان به ماهواره SCIAMACHY^۲ سازمان فضایی اروپا، ماهواره GOSAT^۳ و ماهواره OCO-2^۴ ناسا و ... اشاره نمود (Butz *et al.*, 2011; Bergamaschi *et al.*, 2009; Wunch *et al.*, 2017). با توجه به اینکه ایستگاه‌های زمینی پایش‌گر دی‌اکسیدکربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه وجود ندارد لذا استفاده از ماهواره‌های پایش‌گر گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری به منظور بررسی روندهای سالانه، تغییرات ماهانه و فصلی و در اختیار قرار دادن این اطلاعات به سیاستمداران و مدیران محیط زیستی از ضرورت‌های تحقیق حاضر می‌باشد. غلظت اتمسفری گازهای گلخانه‌ای از جنبه‌های مختلفی در ایران و خاورمیانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Falohatkar *et al.*, 2017; Mousavi *et al.*, 2017a, 2017b, 2018, 2020; Falohatkar *et al.*, 2019; Golkar and Shirvani, 2020; Mousavi and Falohatkar, 2020; Golkar and Mousavi, 2022; Mousavi *et al.*, 2022, 2023; Safaician *et al.*, 2023). اما هیچ کدام از این مطالعات به صورت جامع و دقیق به بررسی تغییرات سالانه، ماهانه و فصلی غلظت اتمسفری گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن در منطقه خاورمیانه نپرداخته است.

لذا هدف این مطالعه بررسی جامع و دقیق میزان دی‌اکسیدکربن اتمسفری در طول سال‌های مختلف از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ و بررسی تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه آن و همچنین تعیین علت‌های این تغییرات در طول این دوره زمانی می‌باشد. در این مطالعه ابتدا داده‌های ماهواره‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری سه ماهواره‌ی پیشگر گازهای گلخانه‌ای SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2 از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ دانلود گردید سپس به بررسی روند تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه آن در طول این بازه زمانی و بررسی و تحلیل آن پرداخته گردید.

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل ۱۵ کشور خاورمیانه به نام‌های بحرین، مصر، ایران، عراق، اردن، کویت، لبنان، عمان، فلسطین، قطر، عربستان سعودی، سوریه، ترکیه، امارات متحده عربی و یمن است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (خاورمیانه)
Fig. 1- Location of the study area (Middle East)

منطقه خاورمیانه با مساحت ۷۲۰۷۵۷۰ کیلومتر مربع در غرب آسیا و قسمت‌هایی از شمال آفریقا (شامل عرض‌های ۱۲ درجه شمالی تا ۴۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۲۴ درجه شرقی تا ۶۴ درجه شرقی) قرار گرفته است. تخمین زده می‌شود که جمعیت فعلی منطقه خاورمیانه حدود ۴۸۳ میلیون نفر است و این جمعیت با نرخ رشد بیش از ۲.۱۵ درصد در سال افزایش می‌یابد (WDI, 2024). منطقه‌ی خاورمیانه به دلیل موقعیت جغرافیایی استراتژیک و داشتن منابع طبیعی غنی، از جمله ذخایر فراوان گاز طبیعی و نفت خام، توجه جهانی را به خود جلب کرده و نقشی اساسی در حفظ ثبات جهانی ایفا می‌کند (Magazzino and Cerulli, 2019; Borhani et al., 2024). این منطقه به عنوان یکی از مشارکت‌کنندگان اصلی در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای است که بیش از ۷ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را تشکیل می‌دهد (WRI, 2023). با توجه به شرایط اقلیمی منحصر به فرد در منطقه مورد مطالعه، نگرانی‌ها در مورد حساسیت این منطقه نسبت به خطرات تغییرات آب و هوایی به شدت در حال افزایش است. این نگرانی‌ها شامل مسائلی مانند سیل، خشکسالی و طوفان می‌شود (Magazzino, 2017).

ب) داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای پایشگر گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری شامل SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2 استفاده گردید.

داده‌های دی‌اکسیدکربن اتمسفری ماهواره ENVISAT

سنجنده‌ی SCIAMACHY بر روی ماهواره‌ی ENVISAT آژانس فضایی اروپا بوده که در ماه مارس ۲۰۰۲ به فضا پرتاب و در آوریل ۲۰۱۲ ارتباط آن با مرکز قطع گردید (Noel و همکاران، ۲۰۰۲). SCIAMACHY خورشید آهنگ بوده و زمان اندازه‌گیری آن ۱۰:۰۰ صبح می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی آن ۶۰ × ۳۰ کیلومتر بوده و اندازه‌گیری‌های خود را در ۳۵ روز به اتمام می‌رساند (Buchwitz و همکاران، ۲۰۰۷). این ماهواره اندازه‌گیری‌های خود را در ناحیه‌ی SWIR انجام داده و دقت اندازه‌گیری آن به طور متوسط ۱/۵٪ می‌باشد (Schneising و همکاران، ۲۰۰۸). داده‌های این ماهواره دارای دو سطح صفر و یک می‌باشند، سطح صفر داده‌های خامی می‌باشد که قابل به‌کارگیری نبوده و هیچ‌گونه اعتبارسنجی و کالیبره‌ای روی آن صورت نگرفته است. داده‌های سطح یک، داده‌های هستند که برای عموم قابل دسترس می‌باشند و به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های زمینی و هوایی اعتبارسنجی و کالیبره گردیده‌اند

(Doelling و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به هدف مطالعه از داده‌های سطح ۱ دی‌اکسیدکربن این ماهواره از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ استفاده گردید.

داده دی‌اکسیدکربن اتمسفری ماهواره GOSAT

ماهواره‌ی مشاهده‌کننده‌ی گازهای گلخانه‌ای GOSAT در ۲۳ ژانویه‌ی ۲۰۰۹ در ژاپن به فضا پرتاب شد (Kuze و همکاران، ۲۰۰۹؛ Parker و همکاران، ۲۰۱۱). GOSAT پروژه‌ی مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط‌زیست (MOE) و انجمن ملی مطالعات محیط‌زیست (NIES)^۸ می‌باشد (Miao و همکاران، ۲۰۱۳). هدف اولیه‌ی پروژه‌ی GOSAT تخمین دقیق منابع انتشار و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس زیرقاره‌ای برای کمک به مدیران محیط‌زیست در ارزیابی تعادل چرخه‌ی کربن زیست-بوم‌های زمینی می‌باشد (Kuze و همکاران، ۲۰۰۹). GOSAT اولین ماهواره‌ی دنیا است که برای اندازه‌گیری‌های غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و متان از باند SWIR و با پوشش جهانی هر سه روز یک‌بار طراحی شده است (Guo و همکاران، ۲۰۱۳). این ماهواره در ارتفاع ۶۶۶ کیلومتری سطح زمین قرار گرفته است. هر بار گردش را تقریباً در ۱۰۰ دقیقه کامل کرده و زمان محلی گردش آن ۱۲:۴۸ دقیقه می‌باشد (Yoshida و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین این ماهواره خورشید آهنگ و با زاویه‌ی انحراف ۹۸ درجه بوده (Morino و همکاران ۲۰۱۰) دارای قدرت تفکیک طیفی ۰/۲ cm⁻¹ و تفکیک مکانی ۱۰/۵ کیلومتر می‌باشد (Wang و همکاران، ۲۰۱۴). این ماهواره برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای به دو سنجنده TANSO-FTS^۹ و TANSO-CAI^{۱۰} مجهز است.

داده‌های ماهواره‌ی GOSAT دارای سطوح مختلفی می‌باشند. بعد از اعتبارسنجی‌های انجام شده توسط پایگاه‌های زمینی و یا به‌وسیله‌ی هواپیما داده‌های سطح ۲ تولید می‌شوند (Miao و همکاران، ۲۰۱۳). دقت مشاهدات ارزیابی فراوانی ستون‌های بازیابی شده برای GOSAT در بیشتر موارد کمتر از یک درصد می‌باشد (Yoshida و همکاران، ۲۰۱۱). در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق از داده‌های سطح ۲ ماهواره‌ی GOSAT از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ استفاده گردید.

داده دی‌اکسیدکربن اتمسفری ماهواره OCO-2

ماهواره OCO-2 در دوم جولای سال ۲۰۱۴ توسط سازمان هوا و فضای ناسا به فضا ارسال گردید (Frankenberg et al., 2014). ماهواره خورشید آهنگ OCO-2، هر بار گردش خود را در ۹۸/۸ دقیقه به اتمام رسانده و ۱۳:۳۶ زمان محلی اندازه‌گیری آن می‌باشد (NASA, 2018). عبور در اوایل بعد از ظهر باعث می‌گردد که دریافت سیگنال‌های بازتابی موجود به حداکثر میزان ممکن، و همچنین سنجش میزان اریبی CO₂ روزانه مرتبط با فتوسنتز به کمترین حد خود برسد (Parkinson et al., 2006). ارتفاع پرواز این ماهواره ۷۰۵ کیلومتر بوده و هدف اصلی آن اندازه‌گیری غلظت گاز CO₂ در مقیاس قاره‌ای و منطقه‌ای با بزرگنمایی تقریباً ۳ کیلومتر مربع می‌باشد. ماهواره OCO-2 حامل یک سنجنده که شامل ۳ طیف سنج شبکه‌ای با بزرگنمایی بالا در برداشت همزمان ۳ محدوده طیفی ۰/۷۶ (باند A بوی O₂)، ۱/۶ (باند ضعیف CO₂) و ۲ (باند قوی CO₂) میکرومتر در ناحیه مادون قرمز نزدیک می‌باشد (Frankenberg et al., 2014). هر طیف سنج در هر ثانیه ۲۴ طیف را ثبت می‌کند (Osterman et al., 2016). روزانه در حدود یک میلیون داده برداشت می‌شود و تنها حدود ۱۰٪ از این داده‌ها به لحاظ محدودیت پوشش ابری، کارایی مناسب را جهت محاسبه مقادیر گاز دی‌اکسیدکربن خواهند داشت (Osterman et al., 2016). برداشت همزمان مقادیر O₂ و CO₂ با بزرگنمایی مکانی بالا در این ماهواره منجر به کاهش خطای تصادفی و همچنین به حداقل رساندن تأثیر ابرناکی، آئروسول و سایر منابع مختل کننده ثبت مقادیر گاز دی‌اکسیدکربن می‌گردد (Parkinson et al., 2006). ماهواره OCO-2 دارای ۳ دید ناظر، لکه روشنایی و دید هدف است. این سنجنده اندازه‌گیری‌های خود را در نواحی SWIR انجام می‌دهد و دقت اندازه‌گیری آن ۰/۳٪ می‌باشد (Crisp و همکاران، ۲۰۰۴؛ Miller و همکاران، ۲۰۰۵؛ Pillai و همکاران، ۲۰۱۰؛ Cortesi و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق از داده‌های سطح ۲ ماهواره OCO-2 گاز دی‌اکسیدکربن از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ استفاده گردید.

(ج) روش کار

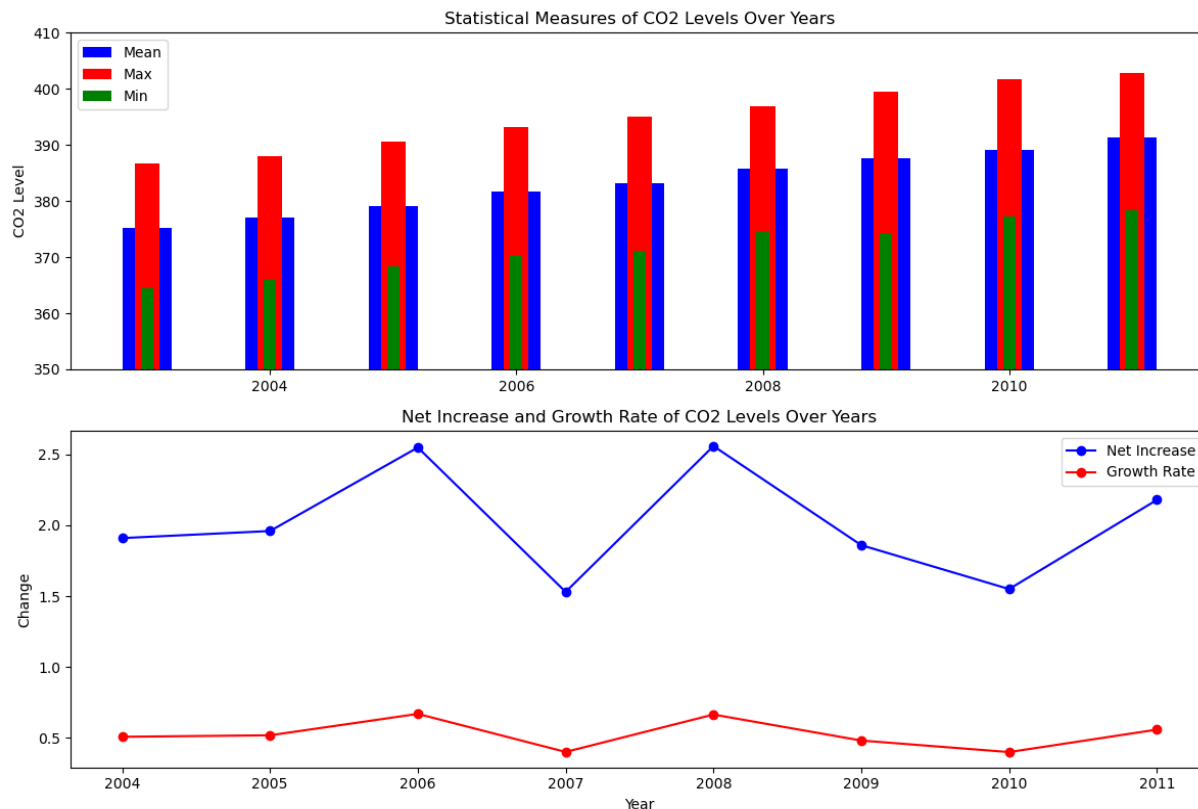
در این مطالعه با استفاده از داده‌های سطح ۲ سه ماهواره‌ی پیشگر گازهای گلخانه‌ای GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2 گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ دانلود و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، ابتدا

بعد از دانلود تمامی داده‌ها برای منطقه مورد مطالعه یعنی خاورمیانه استخراج گردید و داده‌های خارج از منطقه مورد مطالعه حذف گردید. سپس از آنجایی که تمامی داده‌ها به دلیل وجود صحنه‌های ابرناکی و تأثیر آئروسول قابل اعتماد نبوده ما به حذف این داده‌ها پرداخته و تنها داده‌هایی که برای ما قابل اعتماد بودند و با پایگاه‌های زمینی اعتبار سنجی شده بودند در این مطالعه استفاده گردید. سپس از آنجایی که داده‌های این ماهواره‌ها به صورت روزانه بودند با استفاده از میانگین گیری، این داده‌ها تبدیل به داده‌های ماهانه گردیدند و در ادامه میانگین فصلی و میانگین سالانه نیز با این داده‌ها محاسبه گردید.

نتایج و بحث

الف) تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری

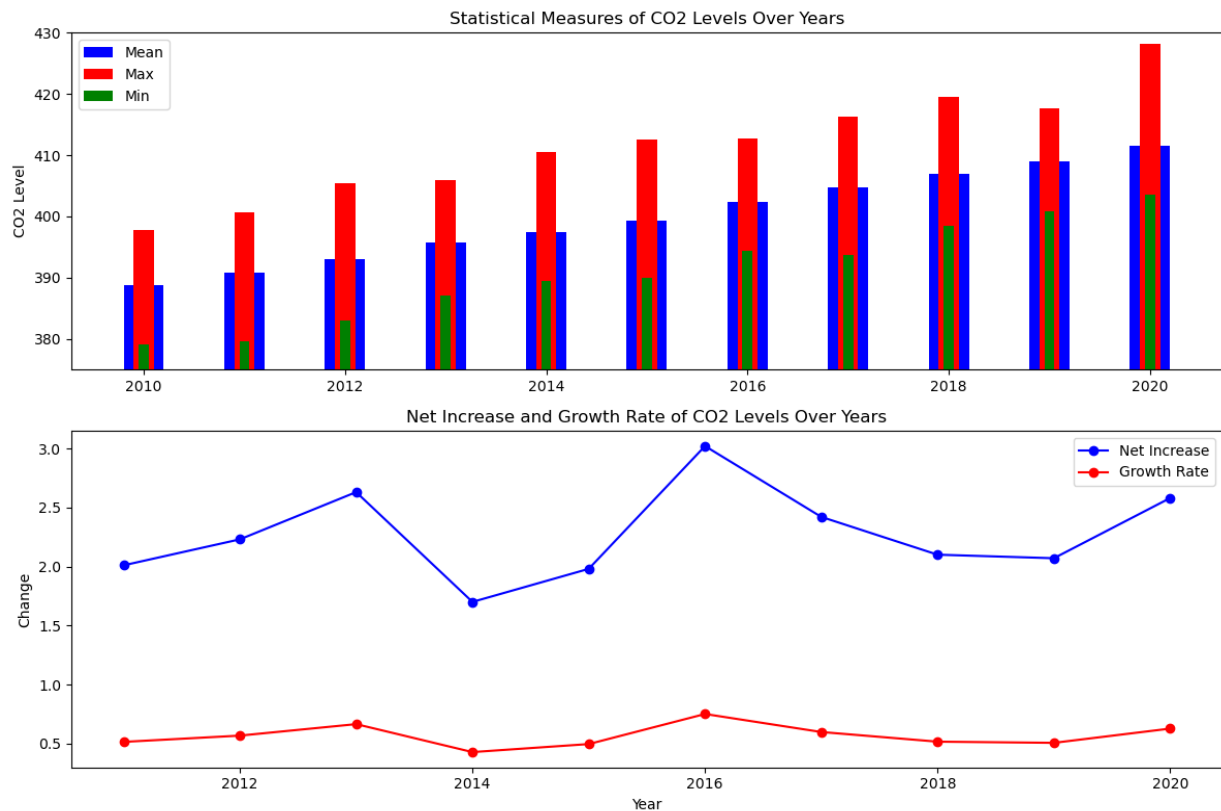
در این بخش با استفاده از داده‌های سه ماهواره SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2، تغییرات سالانه غلظت گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری در خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهند که در این مدت و برای هر سه ماهواره، غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری افزایش یافته است. به عبارت دیگر این گاز در این مدت افزایش یافته است و این افزایش در کل دوره مورد مطالعه و برای هر سال مشاهده می‌شود. افزایش سطح دی‌اکسیدکربن اتمسفری عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه استفاده از سوخت‌های فسیلی و تغییرات در کاربری اراضی می‌باشد (Huang *et al.*, 2020; Watson *et al.*, 2020).



شکل ۲- میزان تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن، افزایش خالص و نرخ رشد آن از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با استفاده از داده های ماهواره ای SCIAMACHY

Fig. 2- The annual changes in carbon dioxide, net increase, and growth rate from 2003 to 2012 using SCIAMACHY satellite data

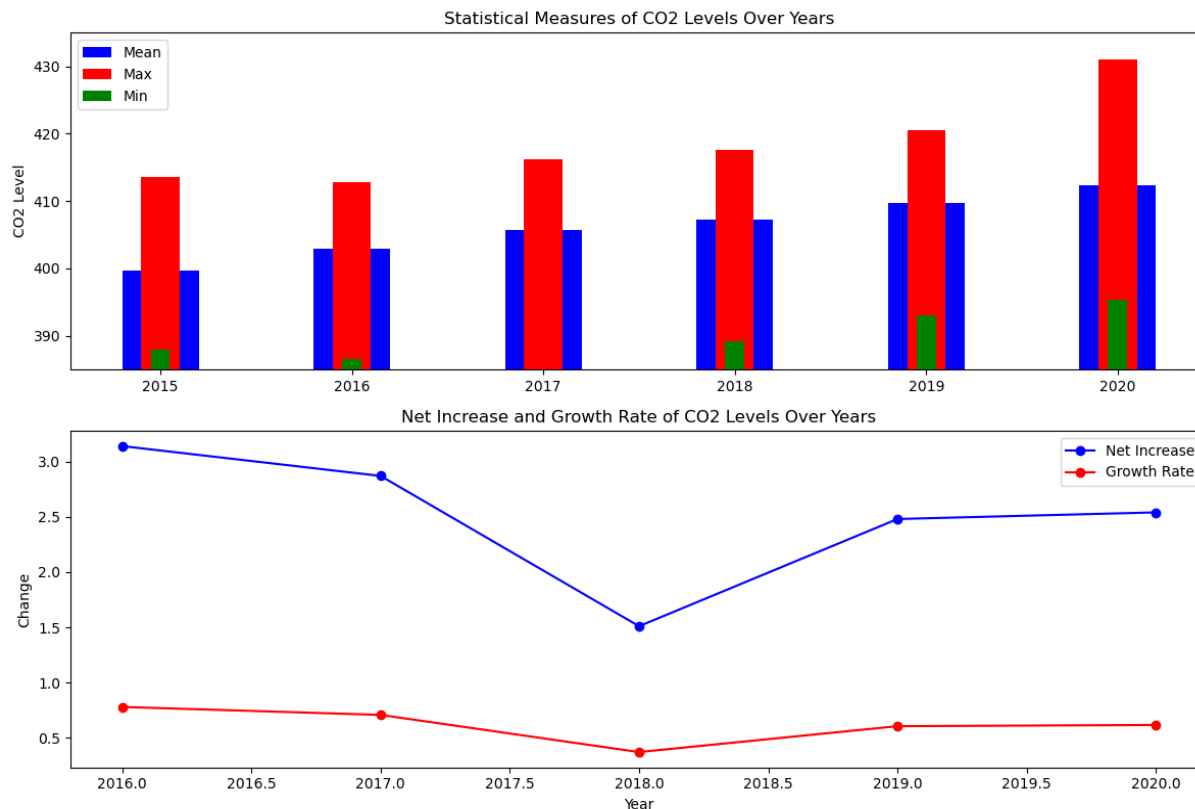
شکل ۲ که به داده‌های SCIAMACHY اختصاص دارد نشان می‌دهد که تغییرات گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری در طی این ۸ سال و با استفاده از ماهواره‌های SCIAMACHY به گونه‌ای است که میانگین غلظت این گاز گلخانه‌ای از ۳۷۵.۲۲ در سال ۲۰۰۳ به ۳۹۱.۳۲ در سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است. که در این بازه زمانی مقدار آن ۱۶.۱ ppm افزایش یافته و افزایش آن به طور میانگین سالانه ۲.۰۱ ppm بوده است. در این دوره در سال ۲۰۰۶ بیشترین رشد با مقدار ۲.۵۵ ppm و افزایش ۰.۶۶ درصد رخ داده است که در سال ۲۰۱۰ کمترین رشد با میزان ۱.۵۵ ppm و افزایش ۰.۳۹ درصد مشاهده شده است.



شکل ۳- میزان تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن، افزایش خالص و نرخ رشد آن از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره ای GOSAT

Fig. 3- The annual changes in carbon dioxide, net increase, and growth rate from 2010 to 2020 using GOSAT satellite data

شکل ۳ که تغییرات سالانه ماهواره GOSAT را از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد، بیان می‌کند که غلظت دی‌اکسیدکربن ماهواره GOSAT از ۳۸۸.۸۱ ppm در سال ۲۰۱۰ به ۴۱۱.۵۵ ppm در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. این افزایش‌ها به گونه‌ای است که بیشترین و کمترین افزایش‌ها مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۴ که به ترتیب ۳.۰۲ و ۱.۷ ppm بوده و ۰.۷۵ و ۰.۴۲ درصد افزایش داشته است. طی این ۱۱ سال میزان دی‌اکسیدکربن اتمسفر ۲۲.۷۴ ppm افزایش یافته است که میانگین سالانه افزایش آن ۲.۲۷ ppm می‌باشد.



شکل ۴- میزان تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن، افزایش خالص و نرخ رشد آن از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره ای OCO-2

Fig. 4- The annual changes in carbon dioxide, net increase, and growth rate from 2015 to 2020 using OCO-2 satellite data

آخرین شکل این بخش رشد سالانه گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری مربوط به ماهواره OCO-2 است که تغییرات این گاز گلخانه‌ای را از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که نتایج آن در طول این ۶ سال در شکل ۴ نمایش داده شده است.

مقدار این گاز در طول این دوره از ۳۹۹.۷۳ به ۴۱۲.۲۷ ppm افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش ۱۲.۵۴ ppm از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ است و میانگین نرخ رشد دی‌اکسید کربن اتمسفری آن در طول این ۶ سال ۲.۵۵ ppm است. افزایش این گازهای گلخانه‌ای طی این مدت در ایران مطابق با تغییرات جهانی و رشد جهانی دی-اکسیدکربن اتمسفری است (Dlugokencky and Tans, 2024).

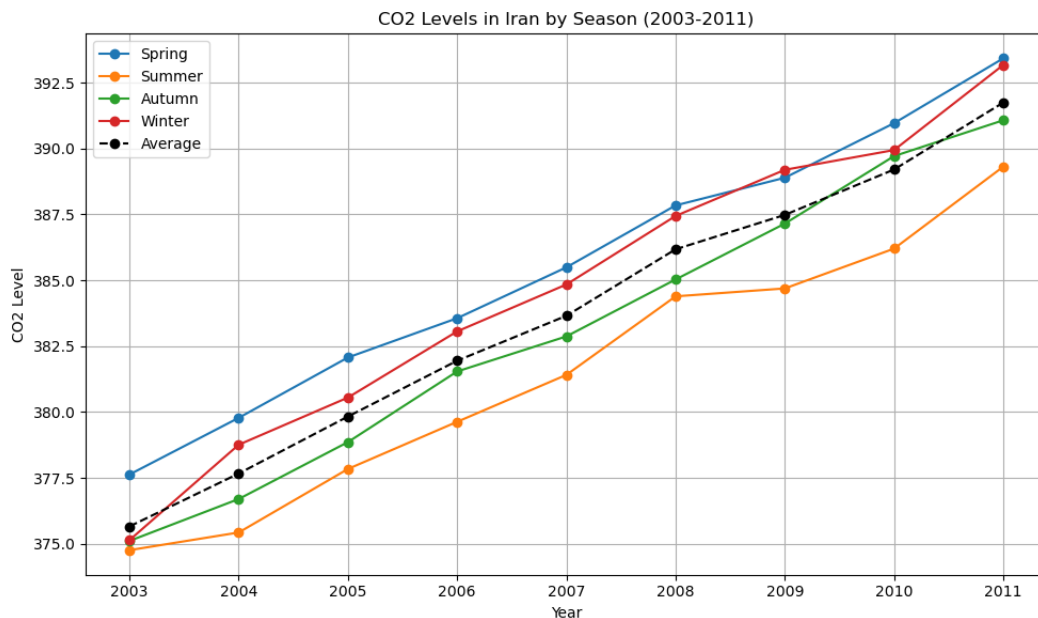
در این خصوص Cao و همکاران در سال ۲۰۱۷ که تغییرات زمانی دی‌اکسیدکربن اتمسفری در مرکز آسیا (ازبکستان، تاجیکستان، قزاقستان و ترکمنستان) را از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند بیان نمودند که غلظت اتمسفری این گاز گلخانه‌ای در این مناطق افزایش یافته که میزان افزایش به طور میانگین هر سال ۲.۲۹ ppm گزارش شده است. Cao و همکاران در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت تغییرات زمانی دی‌اکسیدکربن اتمسفری کل دنیا را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند که در تمامی مناطق دنیا دی‌اکسیدکربن اتمسفری افزایش یافته و این افزایش به طوری بوده است که به طور میانگین در هر سال غلظت اتمسفری این گاز حدود ۱.۹۷ ppm افزایش یافته است. در مطالعه‌ی دیگر Yin و همکاران در سال ۲۰۱۸ که تغییرات زمانی دی‌اکسیدکربن اتمسفری استرالیا را از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ مورد تحلیل قرار دادند. آنان در تحقیق خود شاهد روند افزایشی و رو به رشد این گازهای گلخانه‌ای در استرالیا بوده‌اند و اشاره نمودند که غلظت این گاز در طول ۹۱ ماه مورد مطالعه ۱۸.۲ ppm افزایش داشته که نشان دهنده‌ی افزایش ۲.۴ ppm سالانه این گاز در منطقه مورد مطالعه آنان می‌باشد. Yin و همکارانشان در مطالعه‌ی دیگر در سال ۲۰۱۸ که تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری کشور اندونزی را مورد بررسی قرار دادند چنین گزارش دادند که غلظت اتمسفری این گاز گلخانه‌ای از ۳۸۵.۲ ppm در سال ۲۰۰۹ به ۴۰۱.۵ ppm در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است. Dhaka و همکاران در سال ۲۰۱۸، در کشور هندوستان بررسی تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ مورد مطالعه قرار دادند و در طول این دوره مطالعه شاهد افزایش ۲.۰۱ ppm به طور میانگین بوده‌اند. Buchwitz و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری کل دنیا را از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ مورد مطالعه و بررسی قرار دادند این محققین رشد دی‌اکسیدکربن از مقدار ۳۷۵ ppm در سال ۲۰۰۳ به ۴۰۳ ppm در سال ۲۰۱۷ را گزارش دادند. نتایج ذکر شده‌ی مطالعه حاضر و نتایج محققین بالا تأیید کننده‌ی افزایش غلظت گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید-کربن اتمسفری در تمامی نقاط جهان در سال‌های گذشته می‌باشد. به طوری که در تمامی نقاط دنیا حتی در مناطقی که هیچ‌گونه انتشار دی‌اکسیدکربنی به اتمسفر وجود ندارد نیز شاهد افزایش غلظت اتمسفری این گاز می‌باشیم.

ب) تغییرات فصلی غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری

در این بخش، تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن ماهواره‌های مختلف GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2 از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل های ۵ تا ۷).

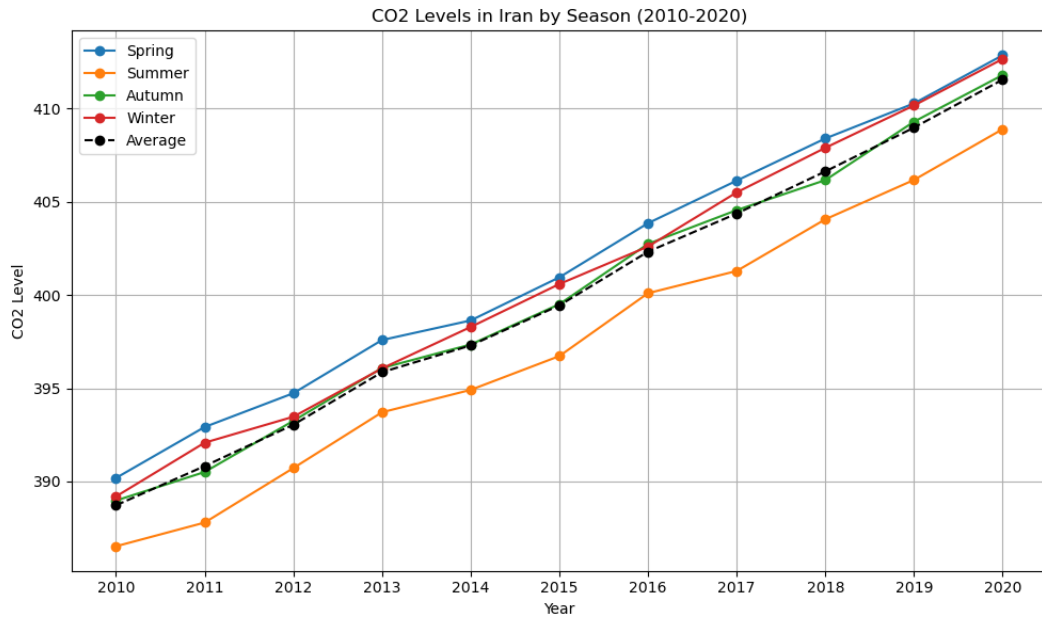
نتایج نشان داد که داده‌های هر سه ماهواره در این مدت دارای نوسانات فصلی بوده است به طوری که علاوه بر تایید نتایج یکدیگر، نشان می‌دهند که در بین فصول مختلف، کمترین میزان دی‌اکسیدکربن اتمسفری در فصل تابستان و بیشترین میزان آن در فصل بهار مشاهده می‌شود. بدین ترتیب میزان دی‌اکسیدکربن اتمسفری از بیشترین مقدار در فصول مختلف تا کمترین مقدار آن به ترتیب در فصول بهار، زمستان، پاییز و تابستان مشاهده می‌شود که در سال‌های مختلف این چرخه تکرار می‌گردد.

علاوه بر این، همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات بین فصول مختلف از بهار تا تابستان است که غلظت این گاز گلخانه‌ای به طور متوسط ۶ ppm کاهش یافته است که نشان دهنده چرخه فصلی قوی در این دوره است. این در حالی است که بیشترین افزایش تغییرات بین فصول مختلف گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری از تابستان به پاییز است که به حدود ۴ ppm افزایش یافته است.



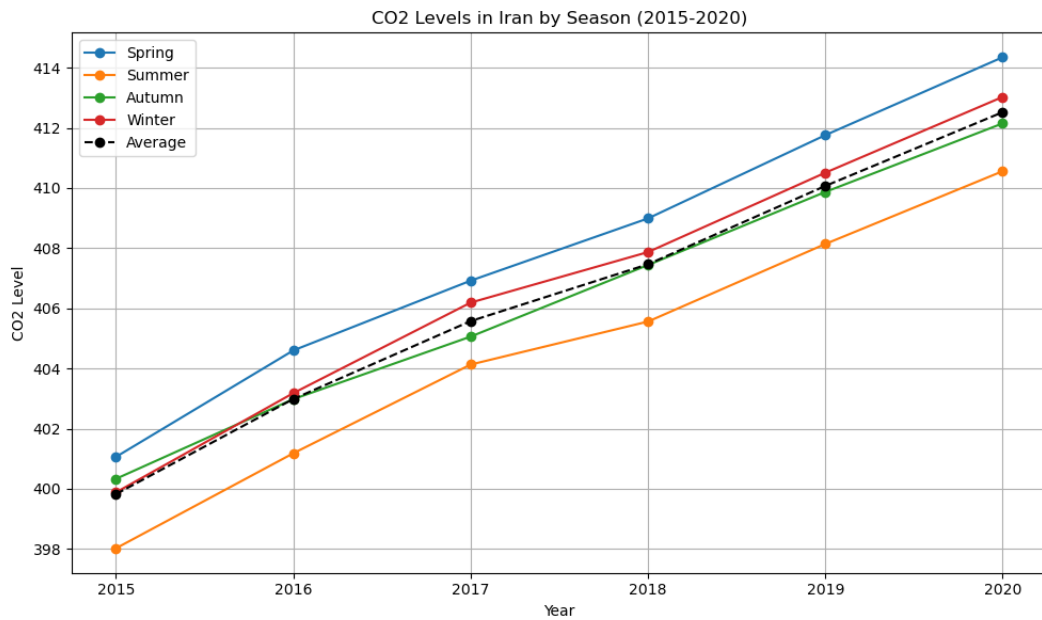
شکل ۵- تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SCIAMACHY

Fig. 5- Seasonal atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2003 to 2012 using SCIAMACHY satellite data



شکل ۶- تغییرات فصلی دی اکسید کربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

Fig. 6- Seasonal atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2010 to 2020 using GOSAT satellite data



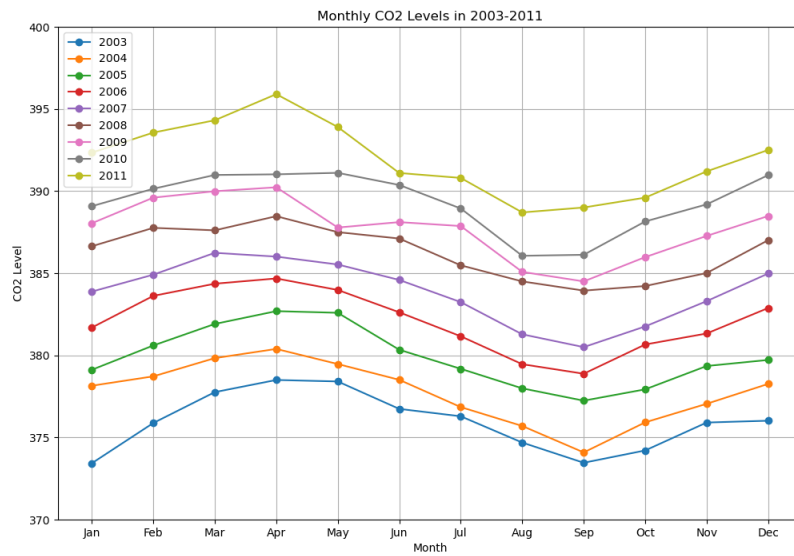
شکل ۷- تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای OCO-2

Fig. 7- Seasonal atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2015 to 2020 using OCO-2 satellite data

در خصوص تغییرات ماهانه و فصلی دی‌اکسیدکربن، مطابق با نتایج بیان شده در فصل قبل دی‌اکسیدکربن اتمسفری از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ دارای تغییرات و چرخه‌های ماهانه و فصلی قابل ملاحظه‌ای بوده به طوری که کمترین میزان‌ها در فصل تابستان و در دو ماه اوت و سپتامبر و بیشترین میزان‌ها در اواخر زمستان و در ماه مارس و در اوایل بهار و در ماه‌های آوریل و مه ملاحظه گردید است. که نتایج مطالعه حاضر منطبق با مطالعات دیگر می‌باشد (Falahatkar و همکاران، ۲۰۱۷؛ Chhabra و Gohel، ۲۰۱۹؛ Mai و همکاران، ۲۰۲۰؛ Watham و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که دو پدیده تنفس و فتوسنتز مهمترین عوامل تبادل گاز دی‌اکسیدکربن بین اتمسفر و بیوسفر در مقیاس وسیع می‌باشند، بنابراین شدت و کاهش هر یک از آنها می‌تواند در تغییر غلظت اتمسفری این گاز نقش قابل توجه‌ایی داشته باشد. در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار با افزایش تدریجی درجه حرارت، تنفس ارگانسیم‌های خاک افزایش یافته در حالی که هنوز رشد پوشش گیاهی به حداکثر مقدار خود نرسیده است. بنابراین میزان تنفس بر فتوسنتز چیره شده و سبب بالا بودن غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در این دوره زمانی می‌باشد (Canadell et al., 2020; Smith and Dukes, 2013). از فصل بهار به تابستان افزایش فتوسنتز سبب کاهش تدریجی دی‌اکسیدکربن اتمسفری شده و در فصل تابستان به کمترین مقدار خود در طول سال می‌رسد. غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری به سبب کاهش پوشش گیاهی و افزایش سوزاندن سوخت‌های فسیلی به منظور اهداف گرمایشی از تابستان به پاییز یک افزایش شدیدی داشته و به دنبال آن به تدریج این میزان افزایش یافته و در اواخر زمستان و اوایل بهار به حداکثر مقدار خود رسیده و این چرخه هر ساله تکرار می‌گردد.

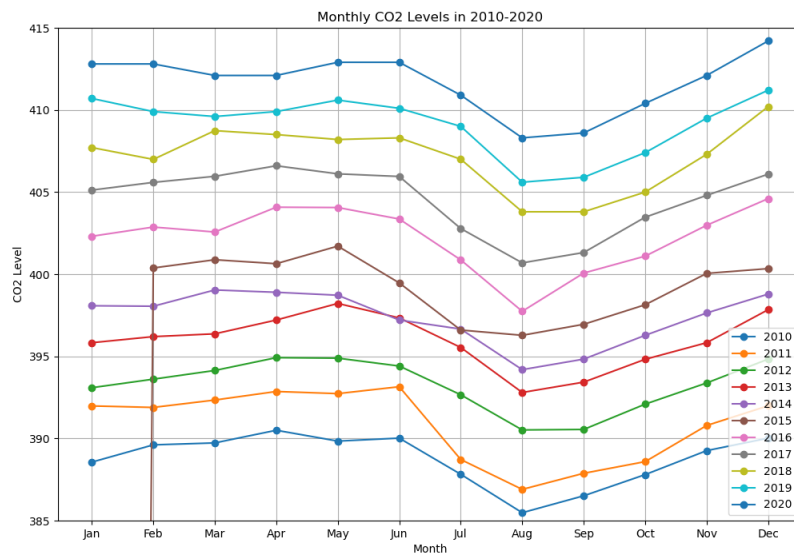
ج) تغییرات ماهانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری

در این بخش، به بررسی تغییرات ماهانه‌ی دی‌اکسیدکربن اتمسفری ماهواره‌های GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2 در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ پرداخته شده و نتایج آن در اشکال ۸ تا ۱۰ آورده شده است.



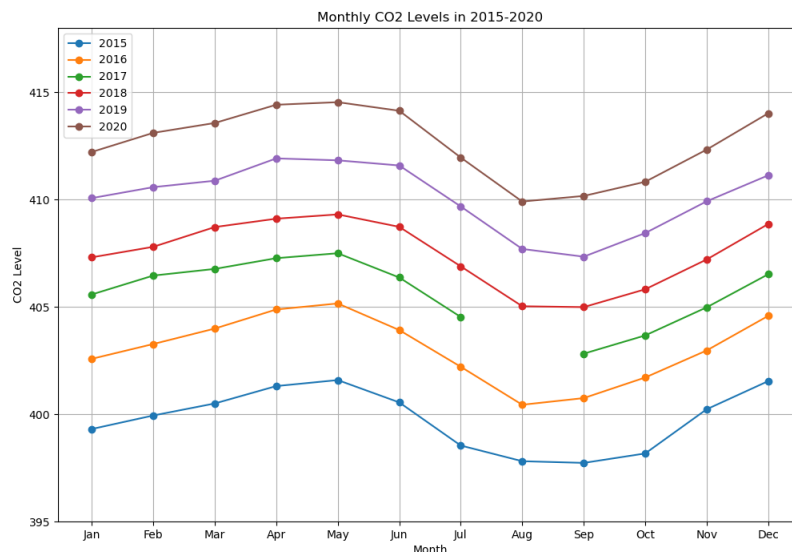
شکل ۸- تغییرات ماهانه دی‌اکسید کربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

SCIAMACHY
Fig. 8- Monthly atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2003 to 2012 using SCIAMACHY satellite data



شکل ۹- تغییرات ماهانه دی‌اکسید کربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

GOSAT
Fig. 9- Monthly atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2010 to 2020 using GOSAT satellite data



شکل ۱۰- تغییرات ماهانه دی‌اکسید کربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

OCO-2
Fig. 10- Monthly atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2015 to 2020 using OCO-2 satellite data

این اشکال به طور جامع نشان‌دهنده تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه می‌باشند و این دوره هر سال تکرار می‌شود و هر سال به میزان دی‌اکسید کربن اتمسفری افزوده می‌شود. بررسی میانگین تغییرات ماهانه‌ی این سه ماهواره در طول این بازه‌ی زمانی ۲۰۴ ماهه نشان می‌دهد که بیشترین غلظت اتمسفری دی‌اکسید کربن در ماه‌های آوریل و می و کمترین میزان غلظت این گاز گلخانه‌ای در ماه‌های اوت و سپتامبر مشاهده گردیده است.

منحنی keeling نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مستندات که تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری را از سال (۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱) در جزیره Mauna Loa هاوایی مورد بررسی قرار داده است. نتایج این اندازه‌گیری حاکی از این مسئله می‌باشد که علاوه بر رشد غلظت دی‌اکسید کربن در طول این دوره این گاز گلخانه‌ای دارای نوسانات ماهانه و فصلی بوده به‌طوری‌که بر اساس این نتایج بیشترین مقدار دی‌اکسید کربن اتمسفری در ماه می و کمترین آن در

ماه سپتامبر و اکتبر مشاهده گردیده است که تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری ایران نیز مشابه تغییرات جهانی این گاز گلخانه‌ای می‌باشد (NOAA, 2023).

Cao و همکاران (۲۰۱۷)، با بررسی تغییرات فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در مرکز آسیا بیان نمودند که نوسانات فصلی این گاز گلخانه‌ای به صورتی می‌باشد که بیشترین غلظت آن در ماه مارس و آوریل و کمترین میزان آن در فصل تابستان و در ماه‌های ژولای و اوت مشاهده گردیده است. Cao و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای دیگر که نوسانات فصلی و ماهانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری برای کل دنیا را مورد بررسی قرار دادند بیان نمودند که در سراسر دنیا چرخه و نوسانات فصلی دی‌اکسیدکربن اتمسفری وجود دارد. این محققین بیشترین غلظت این گاز گلخانه‌ای را در ماه آوریل و کمترین مقدار آن را در فصل تابستان اعلام نمودند. Dhaka و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی تغییرات ماهانه و فصلی دی‌اکسیدکربن هندوستان پرداختند. در کشور هندوستان حداکثر غلظت اتمسفری گاز دی‌اکسیدکربن در ماه‌های آوریل و می مشاهده گردید و از آن به بعد غلظت این گاز شروع به کاهش کرده و در ماه‌های اکتبر و نوامبر به کمترین مقدار خود در این کشور در طول سال رسیده است. در مطالعه‌ای دیگر Buchwitz و همکاران در سال ۲۰۱۸ تغییرات ماهانه و فصلی دی‌اکسیدکربن کل دنیا را در سه عرض میانه، بالا و پایین کره زمین مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. این مطالعه نوسانات فصلی و ماهانه را در هر سه عرض جغرافیایی گزارش دادند ولی در میان این سه عرض نیم کره شمالی دارای بیشترین تغییرات و نوسانات فصلی بودند که به سبب تغییرات پوشش گیاهی و تغییرات دمایی در این مناطق می‌باشد. براساس نتایج ارائه شده، تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن اغلب متأثر از تغییرات پوشش گیاهی در فصول مختلف و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در فصول سرد سال می‌باشند. همچنین افزایش دما سبب انتشار دی‌اکسیدکربن اتمسفری به وسیله‌ی تنفس خاک می‌شود (Soegaard و همکاران، ۲۰۰۰). این انتشار در مقابل جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفری توسط گیاهان در فصل تابستان ناچیز بوده است. تغییرات در فتوسنتز، تنفس و سوزاندن سوخت‌های فسیلی از مهمترین علل تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن می‌باشد (Dargaville و همکاران، ۲۰۰۲؛ Roobaert و همکاران، ۲۰۱۹؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Halder و همکاران، ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرات طولانی‌مدت سالانه، فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های سه ماهواره‌ی SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در طول این بازه زمانی ۱۸ ساله، غلظت این گاز گلخانه‌ای در کل منطقه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. به‌طور دقیق‌تر، براساس داده‌های ماهواره SCIAMACHY، غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری از ۳۷۵.۲۲ ppm در سال ۲۰۰۳ به ۳۹۱.۳۲ ppm در سال ۲۰۱۱ افزایش یافت است، که نشان دهنده افزایش ۱۶.۱ ppm در طول این ۸ سال می‌باشد به‌طوری‌که میانگین افزایش غلظت سالانه آن ۲.۰۱ ppm بوده است. همچنین، ماهواره GOSAT نیز افزایش مشابهی را از ۳۸۸.۸۱ ppm در سال ۲۰۱۰ به ۴۱۱.۵۵ ppm در سال ۲۰۲۰ نشان داد، که مجموعاً ۲۲.۷۴ ppm افزایش را در این ۱۱ سال نشان می‌دهد که میانگین افزایش سالانه آن ۲.۲۷ ppm بود. همچنین، داده‌های ماهواره OCO-2 نیز افزایش ۱۲.۵۴ ppm را از ۳۹۹.۷۳ در سال ۲۰۱۵ به ۴۱۲.۲۷ در سال ۲۰۲۰ نشان داد است که میانگین افزایش سالانه آن ۲.۵۵ بوده است. علاوه بر این روند افزایشی کلی، تغییرات فصلی و ماهانه قابل توجهی نیز در داده‌های دی‌اکسید کربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه مشاهده شد. کمترین غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری در فصل تابستان و ماه‌های اوت و سپتامبر و بیشترین مقدار آن در فصل بهار و ماه‌های آوریل و می مشاهده گردید که این چرخه در طول این دوره ۲۱۶ ماهه هر سال تکرار می‌گردد. این نوسانات فصلی و ماهانه به دلیل تغییرات در فرآیندهای فتوسنتز گیاهان، تنفس خاک و مصرف سوخت‌های فسیلی در فصول مختلف به وجود آمده است. افزایش روند غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه مشابه با روند جهانی است و دور از انتظار نیست. افزایش طولانی‌مدت این گاز گلخانه‌ای می‌تواند تأثیرات جدی و چشمگیری بر اقلیم، آب و هوا و محیط زیست منطقه داشته باشد. اثرات احتمالی آن شامل افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی، خشکسالی‌های شدیدتر، و صدمه به اکوسیستم‌های طبیعی می‌باشد. از این رو، ضروری است که برنامه‌ریزی‌ها و اقدامات فوری و موثر در سطوح ملی و بین‌المللی برای

مدیریت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از جمله دی‌اکسیدکربن، در منطقه خاورمیانه صورت پذیرد. این اقدامات باید شامل ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش کارایی انرژی، کاهش آلودگی صنعتی، توسعه فناوری‌های کاهش انتشار و جذب کربن، و همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی در کاهش گازهای گلخانه‌ای باشد.

سیاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۱۴۳۲۶" انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography
3. Greenhouse Gases Observing Satellite
4. Orbiting Carbon Observatory-2
5. National Aeronautics and Space Administration
6. Japanese Aerospace Exploration Agency
7. Ministry of the Environment
8. National Institute For Environmental Studies
9. Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Fourier Transform Spectrometer
10. Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Cloud and Aerosol Imager

References

منابع

- Bergamaschi, P., Frankenberg, C., Meirink, J. F., Krol, M., Villani, M. G., Houweling, S., ... & Levin, I. (2009). Inverse modeling of global and regional CH₄ emissions using SCIAMACHY satellite retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D22).
- Borhani, F., Ehsani, A. H., McGuirk, S. L., Shafiepour Motlagh, M., Mousavi, S. M., Rashidi, Y., & Mirmazloumi, S. M. (2023). Examining and predicting the influence of climatic and terrestrial factors on the seasonal distribution of ozone column depth over Tehran province using satellite observations. *Acta Geophysica*, 1-36.
- Borhani, F., Pourezzat, A. A., & Ehsani, A. H. (2024). Spatial Distribution of Particulate Matter in Iran from Internal Factors to the Role of Western Adjacent Countries from Political Governance to Environmental Governance. *Earth Systems and Environment*, 8(1), 135-164.
- Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Boesch, H., ... & Schepers, D. (2018). Copernicus Climate Change Service (C3S) global satellite observations of atmospheric carbon dioxide and methane. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 1(1), 57-60.

- Buchwitz, M., Schneising, O., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Reuter, M., & Notholt, J. (2007). First direct observation of the atmospheric CO₂ year-to-year increase from space. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(16), 4249-4256.
- Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Schepers, D., Galli, A., Aben, I., ... & Warneke, T. (2011). Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 38(14).
- Canadell, J. G., Mooney, H. A., Baldocchi, D. D., Berry, J. A., Ehleringer, J. R., Field, C. B., ... & Bond, B. Y. (2000). Commentary: carbon metabolism of the terrestrial biosphere: a multitechnique approach for improved understanding. *Ecosystems*, 3, 115-130.
- Cao, L., Chen, X., Zhang, C., Kurban, A., Qian, J., Pan, T., ... & Maeyer, P. D. (2019). The global spatiotemporal distribution of the mid-tropospheric CO₂ concentration and analysis of the controlling factors. *Remote Sensing*, 11(1), 94.
- Cao, L., Chen, X., Zhang, C., Kurban, A., Yuan, X., Pan, T., & De Maeyer, P. (2017). The temporal and spatial distributions of the near-surface CO₂ concentrations in Central Asia and analysis of their controlling factors. *Atmosphere*, 8(5), 85.
- Chhabra, A., & Gohel, A. (2019). Dynamics of atmospheric carbon dioxide over different land cover types in India. *Environmental monitoring and assessment*, 191(3), 1-10.
- Cortesi, U., Del Bianco, S., Gai, M., Laurenza, L. M., Ceccherini, S., Carli, B., ... & Buchwitz, M. (2014). Sensitivity analysis and application of KLIMA algorithm to GOSAT and OCO validation. Technical, scientific and research reports, 6, 1-153.
- Crisp, D., Atlas, R. M., Breon, F. M., Brown, L. R., Burrows, J. P., Ciais, P., ... & Miller, C. E. (2004). The orbiting carbon observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*, 34(4), 700-709.
- Dargaville, R. J., Heimann, M., McGuire, A. D., Prentice, I. C., Kicklighter, D. W., Joos, F., ... & Wittenberg, U. (2002). Evaluation of terrestrial carbon cycle models with atmospheric CO₂ measurements: Results from transient simulations considering increasing CO₂, climate, and land-use effects. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 39-1.
- Darvishi, A., Yousefi, M., Schirrmann, M., & Ewert, F. (2024). Exploring biodiversity patterns at the landscape scale by linking landscape energy and land use/land cover heterogeneity. *Science of The Total Environment*, 916, 170163.
- Dhaka, S. (2018). Seasonal and Annual variation of AIRS retrieved CO₂ over Indian region during 2003-2016. *42nd COSPAR Scientific Assembly*, 42, A1-1.
- Dlugokencky and Tans, 2024. E. Dlugokencky, P. Tans. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [WWW Document]. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends. (Accessed 15 January March 2024).
- Doelling, D. R., Lukashin, C., Minnis, P., Scarino, B., & Morstad, D. (2012). Spectral reflectance corrections for satellite intercalibrations using SCIAMACHY data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(1), 119-123.
- Falahatkar, S., Mousavi, S. M., & Farajzadeh, M. (2017). Spatial and temporal distribution of carbon dioxide gas using GOSAT data over IRAN. *Environmental monitoring and assessment*, 189(12), 1-13.
- Frankenberg C., O'Dell C., Berry J., Guanter L., Joiner J., Kohler Ph., Pollock R., E. Taylor T., (2014). Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remot Sensing of environment*, 147: 1-12.
- Fu, L., Xu, Y., Xu, Z., Wu, B., & Zhao, D. (2020). Tree water-use efficiency and growth dynamics in response to climatic and environmental changes in a temperate forest in Beijing, China. *Environment international*, 134, 105209.

- Ghayoumi, R., Charles, A., & Mousavi, S. M. (2023). A multi-level analysis of links between government institutions and community-based conservation: insights from Iran. *Ecology and Society*, 28(2).
- Golkar, F., & Mousavi, S. M. (2022). Variation of XCO₂ anomaly patterns in the Middle East from OCO-2 satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 1219-1235.
- Golkar, F., & Shirvani, A. (2020). Spatial and temporal distribution and seasonal prediction of satellite measurement of CO₂ concentration over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 41(23), 8891-8909.
- Golkar, F., Al-Wardy, M., Saffari, S. F., Al-Aufi, K., & Al-Rawas, G. (2019). Using OCO-2 satellite data for investigating the variability of atmospheric CO₂ concentration in relationship with precipitation, relative humidity, and vegetation over Oman. *Water*, 12(1), 101.
- Guo, M., Wang, X. F., Li, J., Yi, K. P., Zhong, G. S., Wang, H. M., & Tani, H., (2013). Spatial distribution of greenhouse gas concentrations in arid and semi-arid regions: A case study in East Asia. *Journal of Arid Environments*, 91, 119-128.
- Halder, S., Tiwari, Y. K., Valsala, V., Sreesh, M. G., Sijikumar, S., Janardanan, R., & Maksyutov, S. (2021). Quantification of Enhancement in atmospheric CO₂ background due to Indian biospheric fluxes and fossil fuel emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(13), e2021JD034545.
- Huang, J., Zhang, G., Zhang, Y., Guan, X., Wei, Y., & Guo, R. (2020). Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degradation & Development*, 31(11), 1380-1391.
- IPCC. (2019). Climate change and land. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jenn, A., Azevedo, I. L., & Michalek, J. J. (2019). Alternative-fuel-vehicle policy interactions increase US greenhouse gas emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 124, 396-407.
- Koskela, M. (2011). Expert views on environmental impacts and their measurement in the forest industry. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1365-1376.
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., & Hamazaki, T., (2009). Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Applied Optics*, 48(35), 6716-6733.
- Mac Dowell, N., Fennell, P. S., Shah, N., & Maitland, G. C. (2017). The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 7(4), 243-249.
- Magazzino, C. (2017). Stationarity of electricity series in MENA countries. *The Electricity Journal*, 30(10), 16-22.
- Magazzino, C., & Cerulli, G. (2019). The determinants of CO₂ emissions in MENA countries: a responsiveness scores approach. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(6), 522-534.
- Mai, B., Deng, X., Zhang, F., He, H., Luan, T., Li, F., & Liu, X. (2020). Background Characteristics of Atmospheric CO₂ and the Potential Source Regions in the Pearl River Delta Region of China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 557-568.
- Miao, R., Lu, N., Yao, L., Zhu, Y., Wang, J., & Sun, J., (2013). Multi-year comparison of carbon dioxide from satellite data with ground-based FTS measurements (2003–2011). *Remote Sensing*, 5(7), 3431-3456.
- Miao, R., Lu, N., Yao, L., Zhu, Y., Wang, J., & Sun, J., (2013). Multi-year comparison of carbon dioxide from satellite data with ground-based FTS measurements (2003–2011). *Remote Sensing*, 5(7), 3431-3456.

- Miller, C. E., Brown, L. R., Toth, R. A., Benner, D. C., & Devi, V. M. (2005). Spectroscopic challenges for high accuracy retrievals of atmospheric CO₂ and the Orbiting Carbon Observatory (OCO) experiment. *Comptes Rendus Physique*, 6(8), 876-887.
- Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., Wennberg, P., ... & Rettinger, M., (2010). Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(2), 1061-1076.
- Mousavi, S. M., & Falahatkar, S. (2020). Spatiotemporal distribution patterns of atmospheric methane using GOSAT data in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(5), 4191-4207.
- Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., & Sonnentag, O. (2022). Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. *Atmospheric Environment: X*, 14, 100163.
- Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., Borhani, F., Ezimand, K., & Naghibi, A. (2023). Examining the Role of the Main Terrestrial Factors Won the Seasonal Distribution of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration over Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(4), 865-875.
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2017a). Assessment of seasonal variations of carbon dioxide concentration in Iran using GOSAT data. *Natural Resources Forum*, 41, 83-91.
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2017b). Monitoring of monthly and seasonal methane amplitude in Iran using GOSAT data. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(2), 327-340.
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2018). Concentration in changes of CO₂ and CH₄ greenhouse gases relation to environmental variable in Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 6(4), 65-79.
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2020). The role of wind flow on sources of carbon dioxide concentration in the provincial scale. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 147-160.
- National Aeronautics and Space Administration., (2018). http://neo.ssi.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD17A2_M_PSN&year. Last visited at 23/01/2018.
- NOAA (2023) National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (accessed 15 December 2023).
- Noel, S., Bovensmann, H., Wuttke, M. W., Burrows, J. P., Gottwald, M., Krieg, E., ... & Muller, C. (2002). Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY. *Advances in Space Research*, 29(11), 1819-1824.
- O'dell, C. W., Eldering, A., Wennberg, P. O., Crisp, D., Gunson, M. R., Fisher, B., ... & Velasco, V. A. (2018). Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(12), 6539-6576.
- Osterman G., Eldering A., Avis Ch., Chafin B., O, Dell Ch., Frankenberg Ch., Fisher B., Mandrake L., Wunch D., Grant R., Crisp D., (2016). OCO-2 Data Product Users Guide, Operational L1 and L2 Data Version 7 and 7R, Jet Propulsion Laboratory, Copyright 2016 California Institute of Technology. U. S. Government sponsorship acknowledged, 1-73.
- Pan, G., Xu, Y., & Ma, J. (2021). The potential of CO₂ satellite monitoring for climate governance: A review. *Journal of Environmental Management*, 277, 111423.
- Parker, R., Boesch, H., Cogan, A., Fraser, A., Feng, L., Palmer, P. I., ... & Wunch, D., (2011). Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations. *Geophysical Research Letters*, 38(15), 1-20.
- Parkinson Claire L., Ward Alan., King M.D., (2006). Earth Science Reference Handbook. orbi NASA. 199-203.

- Pillai, D., Gerbig, C., Marshall, J., Ahmadov, R., Kretschmer, R., Koch, T., & Karstens, U. (2010). High resolution modeling of CO₂ over Europe: implications for representation errors of satellite retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(1), 83-94.
- Roobaert, A., Laruelle, G. G., Landschützer, P., Gruber, N., Chou, L., & Regnier, P. (2019). The spatiotemporal dynamics of the sources and sinks of CO₂ in the global coastal ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 33(12), 1693-1714.
- Safaeian, S., Falahatkar, S., & Tourian, M. J. (2023). Satellite observation of atmospheric CO₂ and water storage change over Iran. *Scientific Reports*, 13(1), 3036.
- Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., ... & Warneke, T. (2008). Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite—Part 1: Carbon dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(14), 3827-3853.
- Shi, K., Chen, Y., Li, L., & Huang, C. (2018). Spatiotemporal variations of urban CO₂ emissions in China: A multiscale perspective. *Applied Energy*, 211, 218-229.
- Smith, N. G., & Dukes, J. S. (2013). Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO₂. *Global change biology*, 19(1), 45-63.
- Soegaard, H., Nordstroem, C., Friborg, T., Hansen, B. U., Christensen, T. R., & Bay, C. (2000). Trace gas exchange in a high-Arctic valley: 3. Integrating and scaling CO₂ fluxes from canopy to landscape using flux data, footprint modeling, and remote sensing. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3), 725-744.
- Wang, T., Shi, J., Jing, Y., Zhao, T., Ji, D., & Xiong, C., (2014). Combining XCO₂ measurements derived from SCIAMACHY and GOSAT for potentially generating global CO₂ maps with high spatiotemporal resolution. *PLoS ONE* 9(8), 1-9.
- Watham, T., Padalia, H., Srinet, R., Nandy, S., Verma, P. A., & Chauhan, P. (2021). Seasonal dynamics and impact factors of atmospheric CO₂ concentration over subtropical forest canopies: observation from eddy covariance tower and OCO-2 satellite in Northwest Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 1-15.
- Watson, A. J., Schuster, U., Shutler, J. D., Holding, T., Ashton, I. G., Landschützer, P., ... & Goddijn-Murphy, L. (2020). Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory. *Nature communications*, 11(1), 4422.
- WDI (2024). World Development Indicators Databank, <https://databank.worldbank.org/home.aspx#advancedDownloadOptions>, (accessed 05 January 2023).
- WRI (2023). World Resources Institute, <https://www.wri.org/data/greenhouse-gas-emissions-over-165-years>, (accessed 25 December 2023).
- Wunch, D., Wennberg, P. O., Osterman, G., Fisher, B., Naylor, B., Roehl, C. M., ... & Eldering, A. (2017). Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) X CO₂ measurements with TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(6), 2209-2238.
- Yin, S., Wang, X., Santoso, H., Tani, H., Zhong, G., & Sun, Z. (2018b). Analyzing CO₂ concentration changes and their influencing factors in Indonesia by OCO-2 and other multi-sensor remote-sensing data. *International Journal of Digital Earth*, 11(8), 825-844.

Yin, S., Wang, X., Tani, H., Zhang, X., Zhong, G., Sun, Z., & Chittenden, A. R. (2018a). Analyzing temporo-spatial changes and the distribution of the CO₂ concentration in Australia from 2009 to 2016 by greenhouse gas monitoring satellites. *Atmospheric Environment*, 192, 1-12.

Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., ... & Yokota, T., (2011). Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(4), 717-734.

Yousefi, M., Darvishi, A., Tello, E., Barghjelveh, S., Dinan, N. M., & Marull, J. (2021). Comparison of two biophysical indicators under different landscape complexity. *Ecological Indicators*, 124, 107439.

نسخه
پایان
انتشار