

## Original Article



# 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

Received: 2024.02.24  
Accepted: 2024.04.16

Seyed Mohsen Mousavi,<sup>1\*</sup>  Naghmeh Mobarghaee Dinan,<sup>1\*</sup>   
Saeed Ansarifard<sup>2</sup>

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

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

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** Climate change and global warming, caused by the increase in the concentration of greenhouse gases, 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, the demand for energy and the consumption of fossil fuels have escalated, leading to increased greenhouse gas emissions. 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.

**Material and Methods:** There are various methods for measuring 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, 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 indicate a significant increase in atmospheric carbon dioxide concentration over the 18 years examined by all three satellites. In addition to examining annual changes, this study also investigated seasonal and monthly variations in atmospheric CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> between seasons revealed the most significant changes from spring to summer, with an average decrease of 6 ppm. Conversely, the highest increases in atmospheric CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 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

## How to cite this article:

Mousavi, S.M., Mobarghaee Dinan, N. and Ansarifard, S., 2024. 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. *Environ. Sci.* 22(2): 305-324

\* Corresponding Author Email Address: n\_mobarghaee@sbu.ac.ir; se\_mousavi@sbu.ac.ir  
DOI: 10.48308/envs.2024.1382



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## بررسی و تحلیل تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه غلظت اتمسفری دی‌اکسید کربن در منطقه خاورمیانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌های

### OCO-2 و GOSAT، SCIAMACHY

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

سید محسن موسوی\*<sup>۱</sup>، نغمه مبرقی دینان\*<sup>۱</sup>، سعید انصاری فرد<sup>۲</sup>

#### چکیده مبسوط

**سابقه و هدف:** تغییر اقلیم و گرمایش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، 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 بوجود آورده است. از زمان انقلاب صنعتی، نیاز به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردیده است. مقادیر ورودی و خروجی دی‌اکسید کربن اتمسفری بطور طبیعی در تعادل با طبیعت بوده است، اما در چند دهه اخیر بدلیل افزایش فعالیت‌های انسانی و انتشار دی‌اکسید کربن، این تعادل برهم خورده و باعث ایجاد پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شده است.

**مواد و روش‌ها:** روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن با استفاده از داده‌های ماهواره‌های GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2 در منطقه خاورمیانه با مساحت ۷۵۷۰×۷۲ کیلومتر مربع است از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ صورت گرفت.

**نتایج و بحث:** نتایج نشان داد که غلظت گاز دی‌اکسید کربن اتمسفری در این دوره ۱۸ ساله، برای هر سه ماهواره افزایش قابل توجهی داشته است. علاوه بر تغییرات سالانه، تغییرات فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن اتمسفری در فصل بهار و در ماه‌های آوریل و می مشاهده گردید. همچنین نتایج محاسبه اختلاف دی‌اکسید کربن اتمسفری بین فصول مختلف نشان داد که بیشترین تغییرات بین فصول مختلف، از بهار به تابستان بود است که غلظت این گاز گلخانه‌ای بطور متوسط شش ppm کاهش یافته است. از طرفی تغییرات این گاز گلخانه‌ای بین فصول مختلف نشان داد که بیشترین افزایش دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن 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، دی‌اکسید کربن اتمسفری، گرمایش جهانی

<sup>۱</sup> گروه برنامه ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران

استناد به این مقاله: موسوی،

س.م.، ن. مبرقی دینان و س. انصاری فرد. ۱۴۰۳. بررسی و تحلیل تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه غلظت اتمسفری دی‌اکسید کربن در منطقه خاورمیانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌های GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2. فصلنامه علوم محیطی. ۳۲۴-۳۰۵: (۲) ۲۲

\* Corresponding Author Email Address: n\_mobarghaee@sbu.ac.ir; se\_mousavi@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1382



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## مقدمه

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 بطوریکه هیچ گونه ایستگاه زمینی در منطقه خاورمیانه و کشور ایران وجود ندارد (Mousavi and Falahatkar, 2020). علم سنجش از دور با پیش‌های 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<sup>۲</sup> سازمان فضایی اروپا، ماهواره‌ی GOSAT<sup>۳</sup> و ماهواره‌ی OCO-2<sup>۴</sup> ناسا و ... اشاره نمود (Butz *et al.*, 2011; Wunch *et al.*, 2017).

با توجه به اینکه ایستگاه‌های زمینی پیش‌گر دی‌اکسیدکربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه وجود ندارد لذا استفاده از ماهواره‌های پیش‌گر 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 (Falahatkar *et al.*, 2017; Mousavi *et al.*, 2017a, 2017b, 2018, 2020; Golkar *et al.*, 2019; Golkar and Shirvani, 2020; Mousavi and Falahatkar, 2020; Golkar and Mousavi, 2022; Mousavi *et al.*, 2022b, 2023; Safaeian *et al.*, 2023). اما هیچ کدام از این مطالعات بصورت جامع و دقیق به بررسی تغییرات سالانه، ماهانه و فصلی غلظت اتمسفری گاز گلخانه‌ای دی-اکسیدکربن در منطقه خاورمیانه نپرداخته است.

لذا هدف این مطالعه بررسی جامع و دقیق میزان دی-اکسیدکربن 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

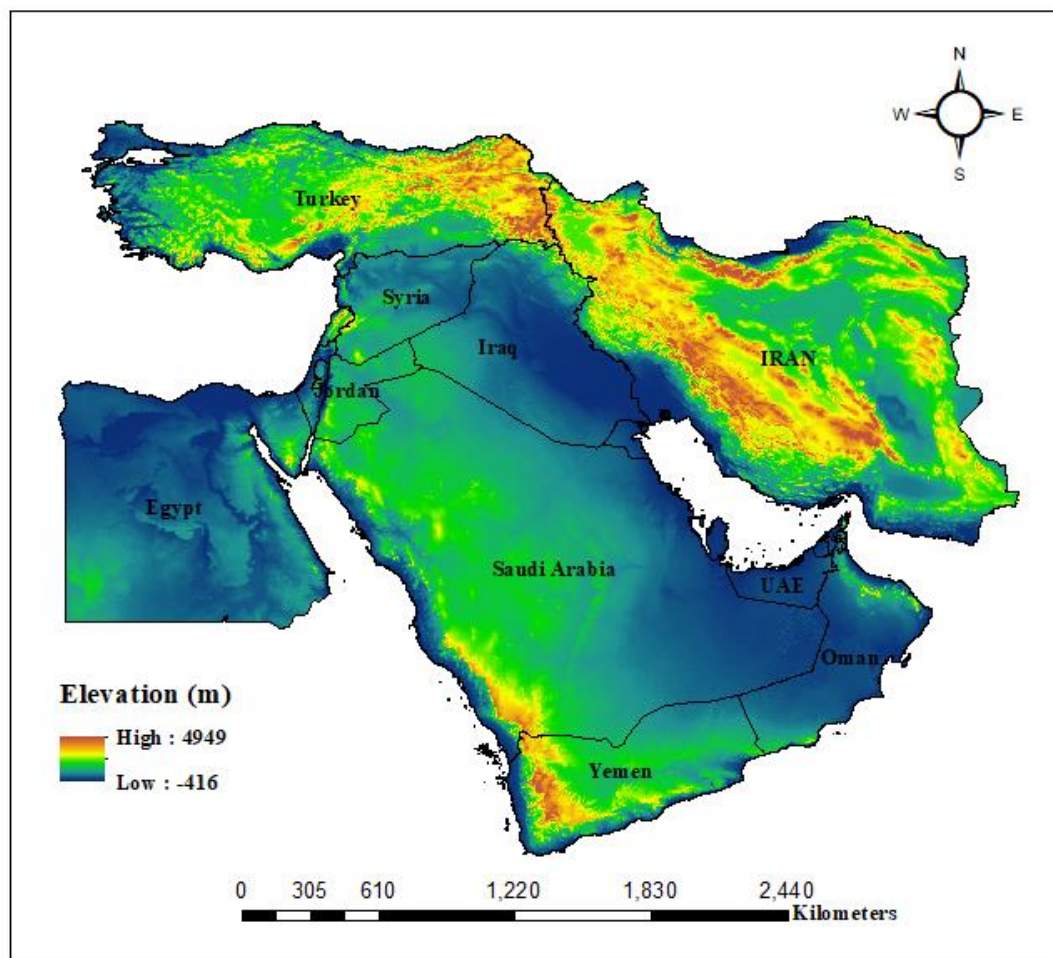
تغییر اقلیم و بویژه گرمایش جهانی بدلیل افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، سبب جلب توجه جهانی به این موضوع شده (Yousefi *et al.*, 2021; Ghayoumi *et al.*, 2023; Borhani *et al.*, 2023a; Darvishi *et al.*, 2024) و نگرانی‌های گسترده‌ای را در جوامع بین‌المللی بوجود آورده است (Hatami *et al.*, 2024). بطوریکه انتشار گازهای گلخانه‌ای به یکی از کانون‌های موردتوجه کارشناسان محیط‌زیست تبدیل شده است (Borhani *et al.*, 2023b; Hoveidi *et al.*, 2017). 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 (Javanbakht *et al.*, 2024; Ezimand *et al.*, 2021). بطوریکه میانگین غلظت اتمسفری گاز دی‌اکسیدکربن از سال ۱۷۵۰ تا سال ۲۰۲۱ از مقدار ۲۸۰ ppm به ۴۱۹ ppm رسیده است (Dlugokencky and Tans, 2024). اگر زمین بعنوان 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 (Borhani *et al.*, 2022). 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 بوسیله‌ی فتوسنتز گیاهان اشاره کرد (Mac Dowell *et al.*, 2017; Darvishi *et al.*, 2021; Darvishi *et al.*, 2022). منابع ورودی و خروجی کربن بطور طبیعی در حال دارای تعادل باهم می‌باشند (Aslam *et al.*, 2024) اما طی چند دهه اخیر بدلیل افزایش فعالیت‌های انسانی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن این تعادل برهم خورده و باعث بوجود آمدن پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شده است (Borhani and Noorpoor, 2020; Mousavi *et al.*, 2019; IPCC<sup>۱</sup> 2022a). روش‌های مختلفی بمنظور اندازه‌گیری گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن وجود دارند، این روش‌ها شامل:

## مواد و روش‌ها

### 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).

دوره زمانی می‌باشد. در این مطالعه ابتدا داده‌های ماهواره‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری سه ماهواره‌ی پیش‌گر گازهای گلخانه‌ای GOSAT، SCIAMACHY 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.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (خاورمیانه)

Fig. 1- Location of the study area (Middle East)

خاورمیانه بدلیل 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 (Mousavi *et al.*, 2017c; Magazzino and Cerulli, 2019). این منطقه بعنوان یکی از مشارکت‌کنندگان اصلی در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای است که بیش از هفت درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای

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

**داده دی اکسیدکربن اتمسفری ماهواره GOSAT**

ماهواره‌ی مشاهده‌کننده‌ی گازهای گلخانه‌ای GOSAT در ۲۳ ژانویه‌ی ۲۰۰۹ در ژاپن به فضا پرتاب شد (Kuze *et al.*, 2011; Parker *et al.*, 2009). پروژه‌ی مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط‌زیست (MOE) و انجمن ملی مطالعات محیط‌زیست (NIES) می‌باشد (Miao *et al.*, 2013). هدف اولیه‌ی پروژه‌ی GOSAT تخمین دقیق منابع انتشار و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس زیر قاره‌ای برای کمک به مدیران محیط‌زیست در ارزیابی تعادل چرخه‌ی کربن زیست‌بوم‌های زمینی می‌باشد (Kuze *et al.*, 2009; Mustafa *et al.*, 2022). 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 (Khaliq *et al.*, 2024). 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 *et al.*, 2011). همچنین این ماهواره خورشید آهنگ و با زاویه‌ی انحراف ۹۸ درجه بوده (Morino *et al.*, 2010) دارای قدرت تفکیک طیفی ۰/۲ cm<sup>-1</sup> و تفکیک مکانی ۱۰/۵ کیلومتر می‌باشد (Wang *et al.*, 2014). این ماهواره برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای به دو سنجنده TANSO-FTS<sup>۹</sup> و TANSO-CAI<sup>۱۰</sup> مجهز است.

داده‌های ماهواره‌ی GOSAT دارای سطوح مختلفی می‌باشند. بعد از اعتبارسنجی‌های انجام شده توسط پایگاه‌های زمینی و یا بوسیله‌ی هواپیما داده‌های سطح دو تولید می‌شوند (Miao *et al.*, 2013). دقت مشاهدات ارزیابی فراوانی ستون‌های بازیابی شده برای GOSAT در بیشتر موارد کمتر از یک درصد می‌باشد (Yoshida *et al.*, 2011). در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق از داده‌های سطح دو ماهواره‌ی GOSAT از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ استفاده گردید.

ای جهان را تشکیل می‌دهد (WRI, 2023). با توجه به شرایط اقلیمی منحصربه‌فرد در منطقه مورد مطالعه، نگرانی‌ها در مورد حساسیت این منطقه نسبت به خطرات تغییرات آب و هوایی بشدت در حال افزایش است. این نگرانی‌ها شامل مسائلی مانند سیل، خشکسالی و طوفان می‌شود (Cheraghi and Borhani, 2016; Magazzino, 2017; Ghayoumi *et al.*, 2022).

### داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای پیشگر گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری شامل GOSAT، SCIAMACHY 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 *et al.*, 2002). 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 *et al.*, 2007). این ماهواره اندازه‌گیری‌های خود را در ناحیه‌ی SWIR انجام داده و دقت اندازه‌گیری آن بطور متوسط ۱/۵٪ می‌باشد (Schneising *et al.*, 2008). داده‌های این ماهواره دارای دو سطح صفر و یک می‌باشند، سطح صفر داده‌های خامی می‌باشد که قابل بکارگیری نبوده و هیچ گونه 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 *et al.*, 2012). با توجه به هدف مطالعه از داده‌های سطح یک دی‌اکسیدکربن این ماهواره از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ 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 اربیی CO<sub>2</sub> روزانه مرتبط با فتوسنتز به کمترین حد خود برسد (Dass *et al.*, 2024). ارتفاع پرواز این ماهواره ۷۰۵ کیلومتر بوده و هدف اصلی آن اندازه‌گیری غلظت گاز CO<sub>2</sub> در مقیاس قاره‌ای و منطقه‌ای با بزرگنمایی تقریباً ۳ کیلومتر مربع می‌باشد. ماهواره OCO-2 حامل یک سنجنده که شامل سه طیف‌سنج شبکه‌ای با بزرگنمایی بالا در برداشت همزمان سه محدوده طیفی ۰/۷۶ (باند A برای O<sub>2</sub>)، ۱/۶ (باند ضعیف CO<sub>2</sub>) و ۲ (باند قوی CO<sub>2</sub>) میکرومتر در ناحیه مادون قرمز نزدیک می‌باشد (Frankenberg *et al.*, 2014). هر طیف‌سنج در هر ثانیه ۲۴ طیف را ثبت می‌کند (Wang *et al.*, 2022). روزانه در حدود یک میلیون داده برداشت می‌شود و تنها حدود ۱۰ درصد از این داده‌ها به لحاظ محدودیت پوشش ابری، کارایی مناسب را جهت محاسبه مقادیر گاز دی‌اکسیدکربن خواهند داشت. برداشت همزمان مقادیر O<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> 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 (An *et al.*, 2022). ماهواره OCO-2 دارای سه دید نادر، لکه روشنایی و دید هدف است. این سنجنده اندازه‌گیری‌های خود را در نواحی SWIR انجام می‌دهد و دقت اندازه‌گیری آن ۰/۳ درصد می‌باشد (Crisp *et al.*, 2004; Mustafa *et al.*, 2020; Mustafa *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021; Mousavi *et al.*, 2024). در این تحقیق از داده‌های سطح دو ماهواره OCO-2 گاز دی‌اکسیدکربن از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ استفاده گردید.

## روش کار

در این مطالعه با استفاده از داده‌های سطح دو، سه ماهواره‌ی پیشگر گازهای گلخانه‌ای GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2 گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ داندود و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، بعد از داندود تمامی داده‌ها برای منطقه مورد مطالعه یعنی خاورمیانه استخراج گردید و داده‌های خارج از منطقه مورد مطالعه حذف گردید. سپس از آنجاییکه تمامی داده‌ها بدلیل 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 آنجاییکه داده‌های این ماهواره‌ها بصورت روزانه بودند با استفاده از میانگین‌گیری، این داده‌ها تبدیل به داده‌های ماهانه گردیدند و در ادامه میانگین فصلی و میانگین سالانه نیز با این داده‌ها محاسبه گردید.

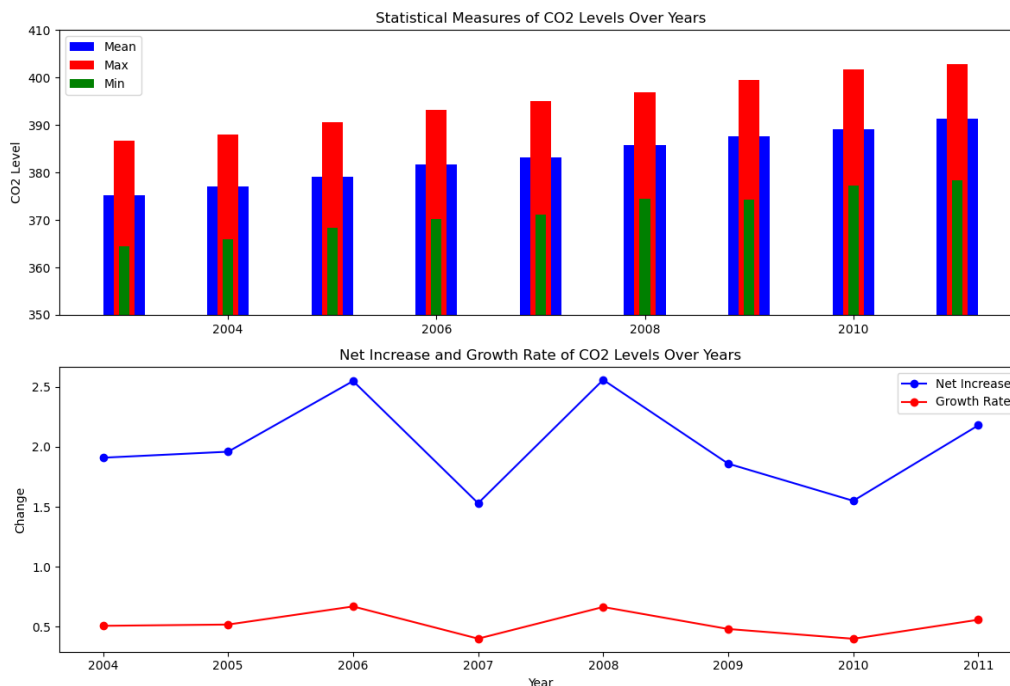
## نتایج و بحث

### تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری

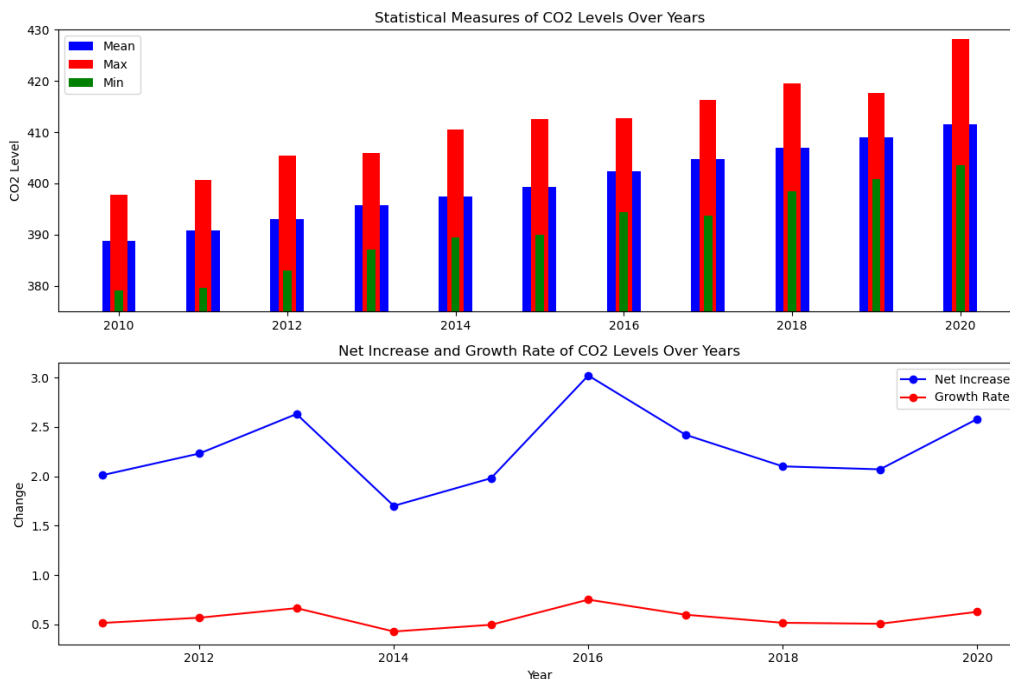
در این بخش با استفاده از داده‌های سه ماهواره GOSAT، SCIAMACHY و OCO-2، تغییرات سالانه غلظت گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اتمسفری در خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. بطور کلی شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهند که در این مدت و برای هر سه ماهواره، غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری افزایش یافته است. 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، بویژه استفاده از سوخت‌های فسیلی و تغییرات در کاربری اراضی می‌باشد (Huang *et al.*, 2020; Watson *et al.*, 2020). شکل ۲ که به داده‌های SCIAMACHY اختصاص دارد نشان می‌دهد که تغییرات گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری در طی این هشت سال و با استفاده از ماهواره‌های

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 در حالی که در سال ۲۰۱۰ کمترین رشد با میزان ۱/۵۵ ppm و افزایش ۰/۳۹ درصد مشاهده شده است.

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 بطور میانگین



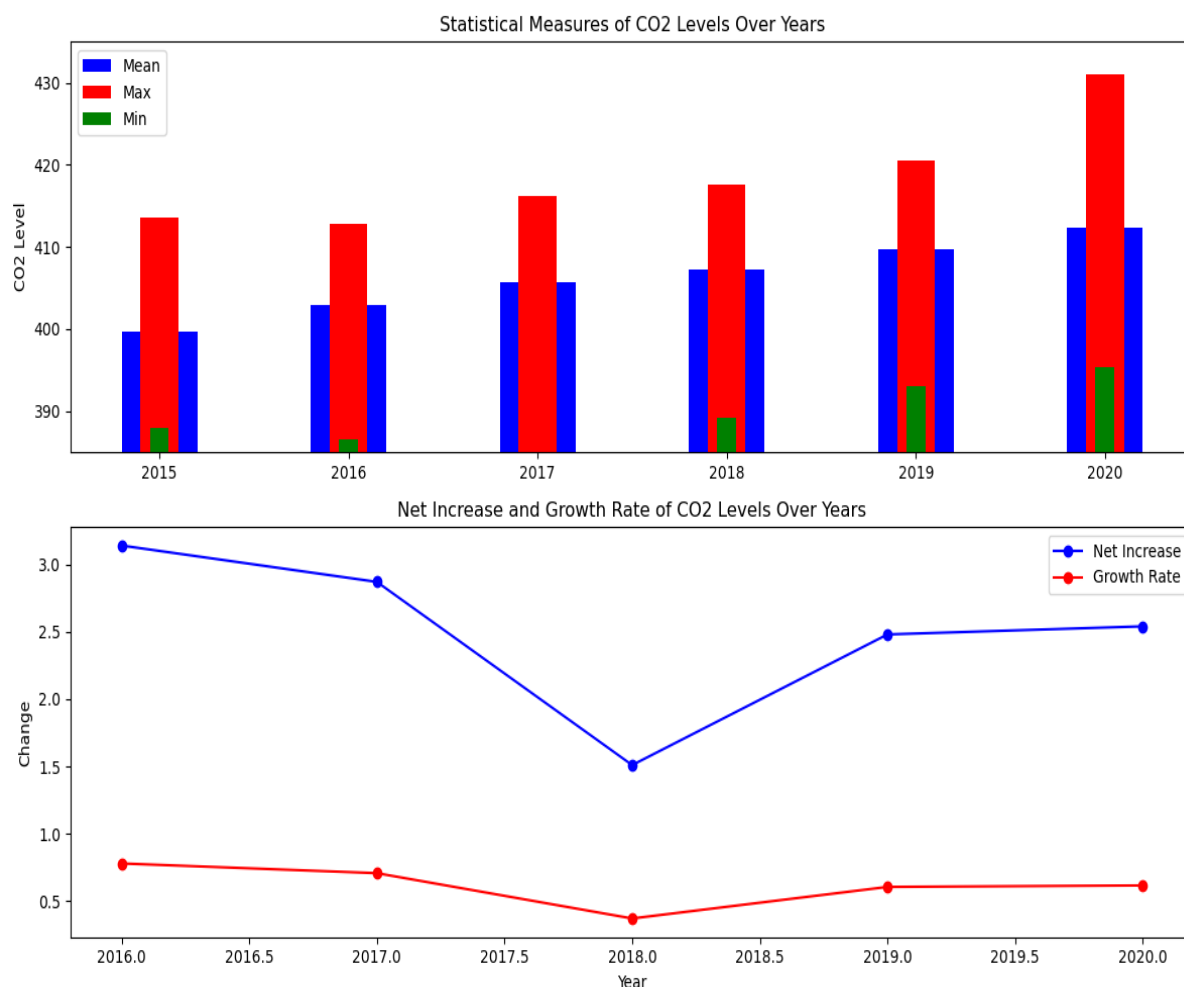
شکل ۲- میزان تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن، افزایش خالص و نرخ رشد آن از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SCIAMACHY  
 Fig. 2- The annual changes in carbon dioxide, net increase, and growth rate from 2003 to 2012 using SCIAMACHY satellite data



شکل ۳- میزان تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن، افزایش خالص و نرخ رشد آن از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GOSAT  
 Fig. 3- The annual changes in carbon dioxide, net increase, and growth rate from 2010 to 2020 using GOSAT satellite data

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 ppm ۲۲/۷۴ افزایش یافته است که میانگین سالانه افزایش آن ۲/۲۷ ppm می‌باشد.

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



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

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

۴۱۲/۲۷ افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش ۱۲/۵۴ ppm از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ است و میانگین نرخ رشد دی‌اکسیدکربن اتمسفری آن در طول این شش سال ۲/۵۵ ppm است. افزایش این گازهای گلخانه‌ای طی این مدت در ایران مطابق با تغییرات جهانی و رشد جهانی دی‌اکسیدکربن اتمسفری است (Dlugokencky and

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 شش سال در شکل ۴ نمایش داده شده است. مقدار این گاز در طول این دوره از ۳۹۹/۷۳ به ۴۱۱/۵۵ ppm



(Tans, 2024).

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 دی‌اکسیدکربن اتمسفری در تمامی نقاط جهان در سال‌های گذشته می‌باشد. بطوریکه در تمامی نقاط دنیا حتی در مناطقی که هیچ‌گونه انتشار دی‌اکسیدکربنی به اتمسفر وجود ندارد نیز شاهد افزایش غلظت اتمسفری این گاز می‌باشیم.

### تغییرات فصلی غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری

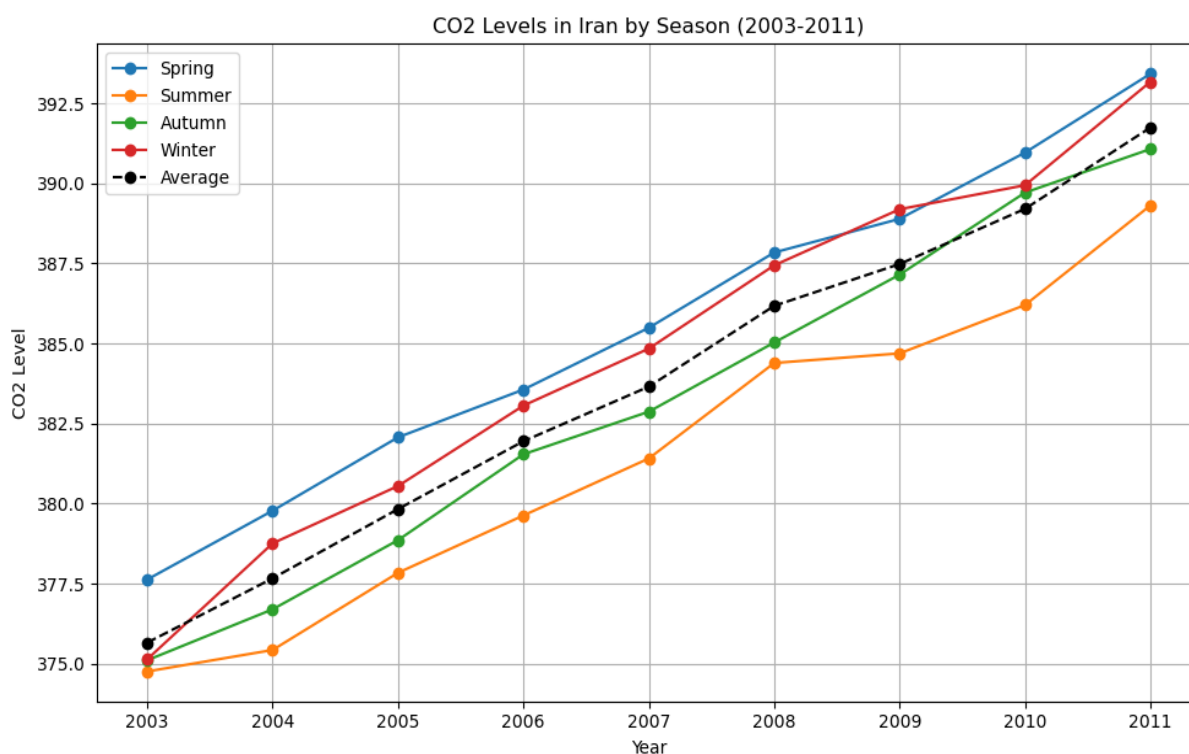
در این بخش، تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن ماهواره‌های مختلف SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2 از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل‌های ۵ تا ۷).

نتایج نشان داد که داده‌های هر سه ماهواره در این مدت دارای نوسانات فصلی بوده است بطوریکه علاوه بر تأیید 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.

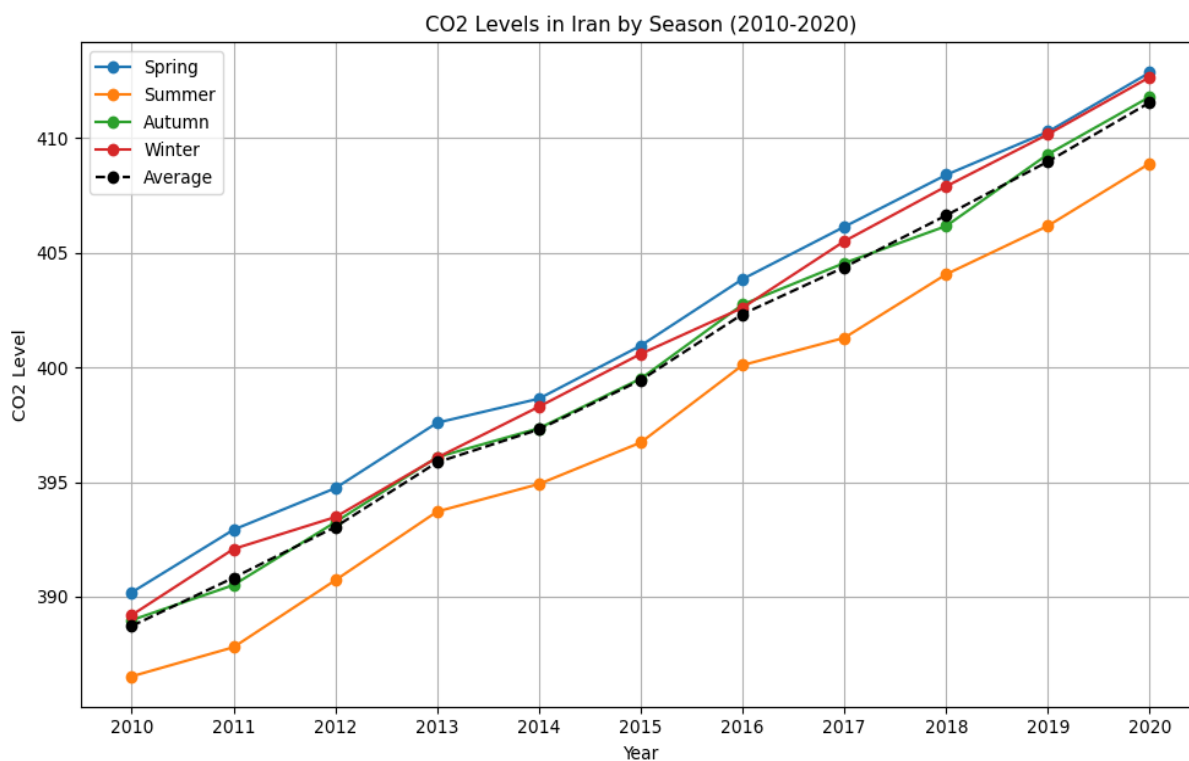
علاوه بر این، همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات بین فصول مختلف از بهار تا تابستان است که غلظت این گاز گلخانه‌ای بطور متوسط ۶ ppm کاهش یافته است که نشان دهنده چرخه فصلی قوی در این دوره است. این در حالی است که بیشترین افزایش تغییرات بین فصول مختلف گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری از تابستان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

در این خصوص Cao *et al.* (2017) 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 گونه‌ای بوده است که به طور میانگین در هر سال غلظت اتمسفری این گاز حدود ۱/۹۷ ppm افزایش یافته است. در مطالعه‌ی دیگر Yin *et al.* (2018) 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.

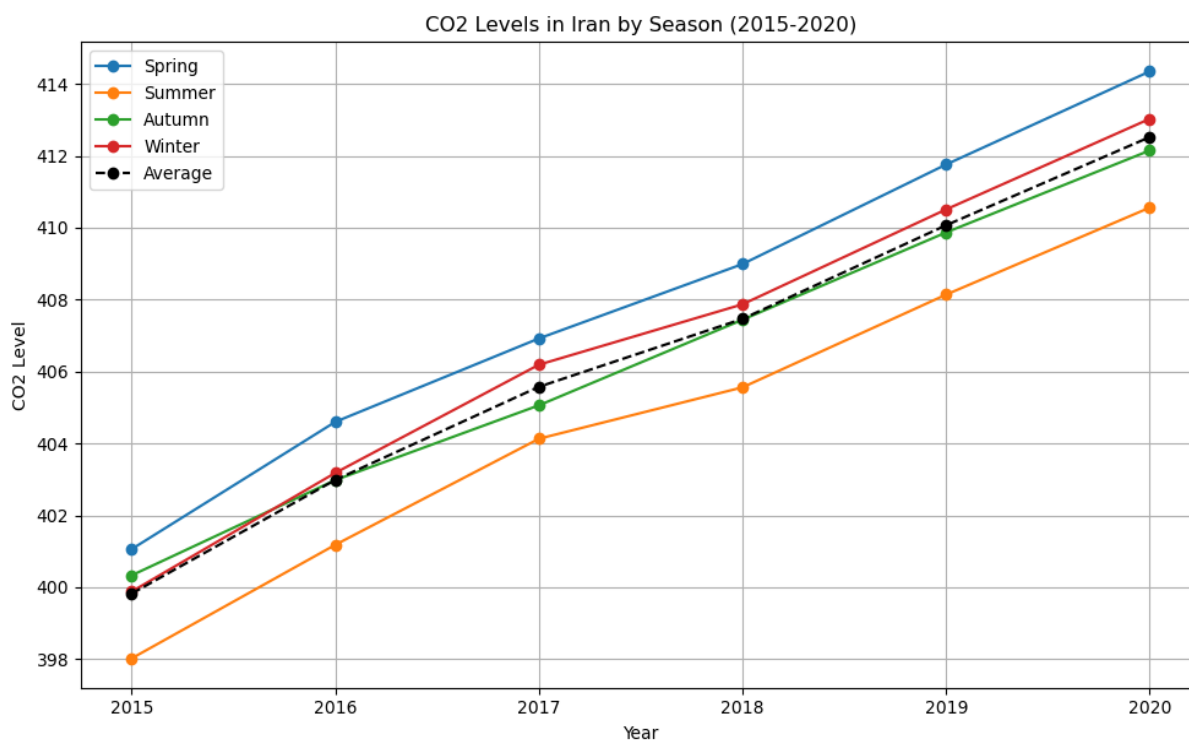
Yin *et al.* (2018) در مطالعه‌ای دیگر که تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری کشور اندونزی را مورد بررسی قرار دادند چنین گزارش دادند که غلظت اتمسفری این گاز گلخانه‌ای از ۳۸۵/۲ ppm در سال ۲۰۰۹ به ۴۰۱/۵ ppm در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است. Gupta *et al.* (2019) در کشور هندوستان بررسی تغییرات سالانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ مورد مطالعه قرار دادند و در طول این دوره مطالعه شاهد افزایش ۲/۰۱ ppm بطور میانگین بوده‌اند. Buchwitz *et al.* (2018) تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری کل دنیا را از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ مورد مطالعه و



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 دی‌اکسیدکربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GOSAT  
 Fig. 6- Seasonal atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2010 to 2020 using GOSAT satellite data



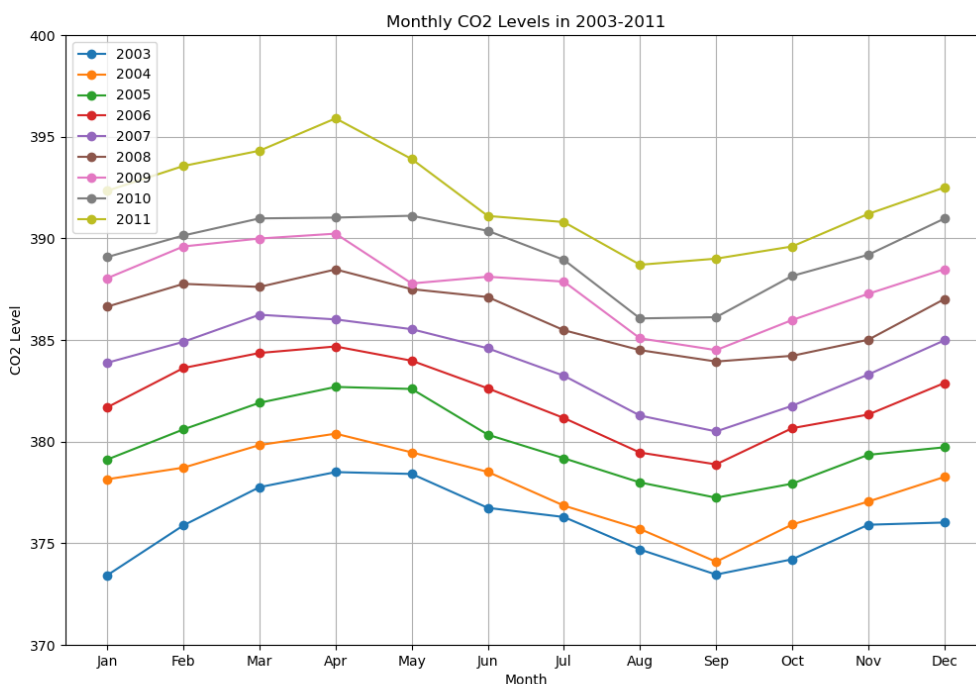
شکل ۷- تغییرات فصلی دی‌اکسیدکربن اتمسفری خاورمیانه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای OCO-2  
 Fig. 7- Seasonal atmospheric carbon dioxide changes in the Middle East from 2015 to 2020 using OCO-2 satellite data

میزان تنفس بر فتوسنتز چیره شده و سبب بالا بودن غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در این دوره زمانی می‌باشد (Canadell *et al.*, 2020; Iqbal *et al.*, 2022). 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.

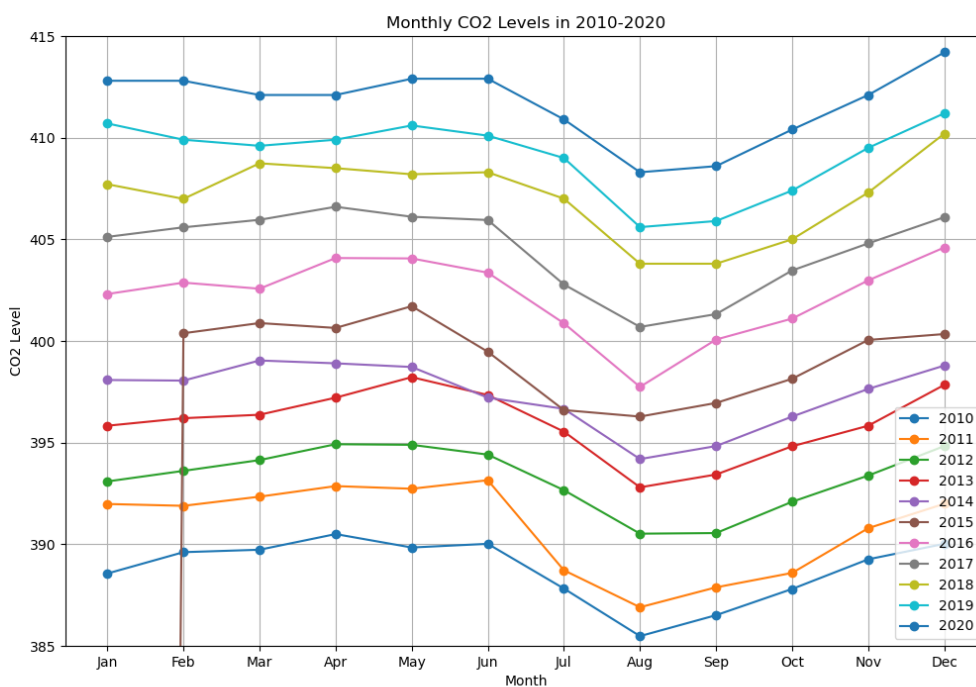
#### تغییرات ماهانه دی‌اکسیدکربن اتمسفری

در این بخش، به بررسی تغییرات ماهانه 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.

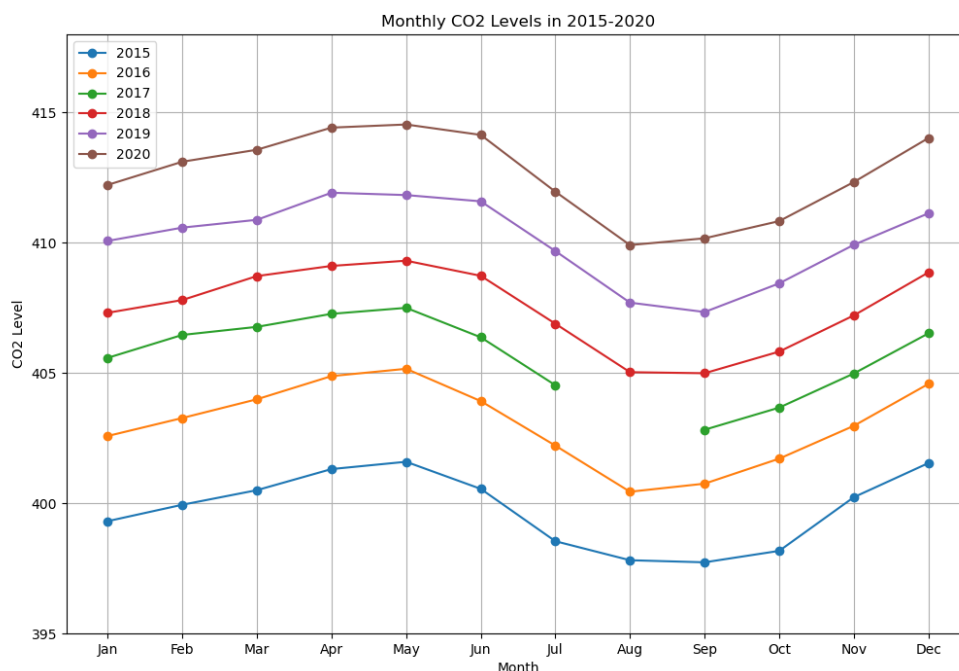
در خصوص تغییرات ماهانه و فصلی دی‌اکسیدکربن، مطابق با نتایج بیان شده در فصل قبل دی‌اکسیدکربن اتمسفری از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ دارای تغییرات و چرخه‌های ماهانه و فصلی قابل ملاحظه‌ای بوده بطوریکه کمترین میزان‌ها در فصل تابستان و در دو ماه اوت و سپتامبر و بیشترین میزان‌ها در اواخر زمستان و در ماه مارس و در اوایل بهار و در ماه‌های آوریل و مه ملاحظه گردید است. که نتایج مطالعه حاضر منطبق با مطالعات دیگر می‌باشد (Falahatkar *et al.*, 2017; Mai *et al.*, 2020; Watham *et al.*, 2021). از آنجاییکه 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 توجهی داشته باشد. در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار با افزایش تدریجی درجه حرارت، تنفس ارگانیسم‌های خاک افزایش یافته در حالی که هنوز رشد پوشش گیاهی به حداکثر مقدار خود نرسیده است. بنابراین



شکل ۸- تغییرات ماهانه دی‌اکسیدکربن 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 دی‌اکسیدکربن 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 دی‌اکسیدکربن 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

ایران نیز مشابه تغییرات جهانی این گاز گلخانه‌ای می‌باشد (NOAA, 2023).

Cao *et al.* (2017) با بررسی تغییرات فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در مرکز آسیا بیان نمودند که نوسانات فصلی این گاز گلخانه‌ای به‌صورتی 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 *et al.* (2019) 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. Gupta *et al.* (2019) 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 اشکال به طور جامع نشان‌دهنده‌ی تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه می‌باشند و این دوره هر سال تکرار می‌شود و هر سال به میزان دی‌اکسیدکربن اتمسفری افزوده می‌شود. بررسی میانگین تغییرات ماهانه‌ی این سه ماهواره در طول این بازه‌ی زمانی ۲۰۴ ماهه نشان می‌دهد که بیشترین غلظت اتمسفری دی‌اکسیدکربن در ماه‌های آوریل و می و کمترین میزان غلظت این گاز گلخانه‌ای در ماه‌های اوت و سپتامبر مشاهده گردیده است.

منحنی keeling نیز بعنوان یکی از مهم‌ترین مستندات که تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن 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 دی‌اکسیدکربن در طول این دوره این گاز گلخانه‌ای دارای نوسانات ماهانه و فصلی بوده بطوریکه بر اساس این نتایج بیشترین مقدار دی‌اکسیدکربن اتمسفری در ماه می و کمترین آن در ماه سپتامبر و اکتبر مشاهده گردیده است که تغییرات دی‌اکسیدکربن اتمسفری

۱۶/۱ در طول این هشت سال می‌باشد بطوریکه 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 ppm بوده است. علاوه بر این روند افزایشی کلی، تغییرات فصلی و ماهانه قابل توجهی نیز در داده‌های دی‌اکسیدکربن اتمسفری در منطقه خاورمیانه مشاهده شد. کمترین غلظت دی‌اکسیدکربن 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 بوجود آمده است. افزایش روند غلظت دی‌اکسیدکربن 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.

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 *et al.*, 2018) 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 *et al.*, 2000). 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 (Xavier *et al.*, 2020; de Araújo Santos *et al.*, 2022; da Costa *et al.*, 2022; Lucena *et al.*, 2023).

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرات طولانی‌مدت سالانه، فصلی و ماهانه غلظت دی‌اکسیدکربن 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 بطور قابل توجهی افزایش یافته است. بطور دقیق‌تر، براساس داده‌های ماهواره SCIAMACHY، غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری از ۳۷۵/۲۲ ppm در سال ۲۰۰۳ به ۳۹۱/۳۲ ppm در سال ۲۰۱۱ افزایش یافت است که نشان دهنده افزایش ppm

<sup>2</sup> Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography

<sup>3</sup> Greenhouse Gases Observing Satellite

<sup>4</sup> Orbiting Carbon Observatory-2

<sup>5</sup> National Aeronautics and Space Administration

<sup>6</sup> Japanese Aerospace Exploration Agency

<sup>7</sup> Ministry of the Environment

<sup>8</sup> National Institute For Environmental Studies

<sup>9</sup> Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Fourier Transform Spectrometer

<sup>10</sup> Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Cloud and Aerosol Imager

## References

An, N., Mustafa, F., Bu, L., Xu, M., Wang, Q., Shahzaman, M., Bilal, M., Ullah, S. and Feng, Z., 2022. Monitoring of atmospheric carbon dioxide over Pakistan using satellite dataset. *Remote Sensing*. 14(22), p.5882. <https://doi.org/10.3390/rs14225882>

Aslam, R.W., Shu, H., Tariq, A., Naz, I., Ahmad, M.N., Quddoos, A., Javid, K., Mustafa, F. and Aeman, H., 2024. Monitoring landuse change in Uchhali and Khabeki wetland lakes, Pakistan using remote sensing data. *Gondwana Research*. 16(5), p.928. <https://doi.org/10.3390/rs16050928>

Borhani, F. and Noorpoor, A., 2020. Measurement of air pollution emissions from chimneys of production units moisture insulation (Isogam) Delijan. *Journal of Environmental Science and Technology*. 21 (12), 57-71. <https://doi.org/10.22034/jest.2020.25934.3488>

Borhani, F., Ehsani, A.H., McGuirk, S.L., Shafiepour Motlagh, M., Mousavi, S.M., Rashidi, Y. and Mirmazloumi, S.M., 2023b. 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*. 72, 1-36. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01179-1>

Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A.H. and Rashidi, Y., 2022. Evaluation of short-lived atmospheric fine particles in Tehran, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 15(16), 1398. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10667-5>

Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A.H., Rashidi, Y., Maddah, S. and Mousavi, S.M., 2023a. On the predictability of short-lived particulate matter around a cement plant in Kerman, Iran: machine learning analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 20(2), 1513-1526. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04645-3>

Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Boesch, H., Anand, J., Parker, R., Detmers, R.G., Aben, I. and Hasekamp, O.P., 2018. Copernicus Climate Change Service (C3S) global satellite observations of atmospheric carbon dioxide and methane. *Advances*

## سپاسگزاری

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

## پی‌نوشت‌ها

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

## منابع

in *Astronautics Science and Technology*. 1, pp.57-60. <https://doi.org/10.1007/s42423-018-0004-6>

Buchwitz, M., Schneising, O., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Reuter, M. and Notholt, J., 2007. First direct observation of the atmospheric CO<sub>2</sub> year-to-year increase from space. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7(16), pp.4249-4256. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4249-2007>

Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Schepers, D., Galli, A., Aben, I., Frankenberg, C., Hartmann, J.M., Tran, H., Kuze, A. and Keppel-Aleks, G., 2011. Toward accurate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observations from GOSAT. *Geophysical Research Letters*. 38(14), L14812. <https://doi.org/10.1029/2011GL047888>

Canadell, J.G., Mooney, H.A., Baldocchi, D.D., Berry, J.A., Ehleringer, J.R., Field, C.B., Gower, S.T., Hollinger, D.Y., Hunt, J.E., Jackson, R.B. and Running, S.W., 2000. Commentary: Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding. *Ecosystems*. 3, pp.115-130. <https://doi.org/10.1007/s100210000014>

Cao, L., Chen, X., Zhang, C., Kurban, A., Qian, J., Pan, T., Yin, Z., Qin, X., Ochege, F.U. and Maeyer, P.D., 2019. The global spatiotemporal distribution of the mid-tropospheric CO<sub>2</sub> concentration and analysis of the controlling factors. *Remote Sensing*. 11(1), 94. <https://doi.org/10.3390/rs11010094>

Cao, L., Chen, X., Zhang, C., Kurban, A., Yuan, X., Pan, T. and De Maeyer, P., 2017. The temporal and spatial distributions of the near-surface CO<sub>2</sub> concentrations in Central Asia and analysis of their controlling factors. *Atmosphere*. 8(5), p.85. <https://doi.org/10.3390/atmos8050085>

Cheraghi, A. and Borhani, F., 2016. Evaluation of environmental and sustainable development of four pavements in Iran by four method of multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Science Studies*. 1(2), 51-62. [https://www.jess.ir/article\\_47113\\_en.html](https://www.jess.ir/article_47113_en.html)

Crisp, D., Atlas, R.M., Breon, F.M., Brown, L.R., Burrows, J.P., Ciais, P., Connor, B.J., Doney, S.C., Fung, I.Y., Jacob, D.J. and Miller, C.E., 2004. The orbiting carbon observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*. 34(4), 700-709.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>

Da Costa, L.M., De Araújo Santos, G.A., Panosso, A.R., De Souza Rolim, G. and La Scala, N., 2022. An empirical model for estimating daily atmospheric column-averaged CO<sub>2</sub> concentration above São Paulo state, Brazil. *Carbon Balance and Management*. 17(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00209-7>

Darvishi, A., Yousefi, M. and Mobargae, D.N., 2021. Evaluating the correlation between pollination ecosystem service and landscape pattern metrics (Case study: Qazvin province). *Iranian Journal of Applied Ecology*. 10 (1), 51-63. <https://sid.ir/paper/1058635/en>

Darvishi, A., Yousefi, M., Marull, J. and Dinan, N.M., 2022. Modelling ecological scarcity considering the long-term interaction between human and nature in dry agricultural landscapes. Application in Qazvin (Iran). *Ecological Modelling*. 472, 110106. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110106>

Darvishi, A., Yousefi, M., Schirrmann, M. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170163>

Dass, A., Mishra, A.K., de Araújo Santos, G.A. and Ranjan, R.K., 2024. Spatio-temporal variation of atmospheric CO<sub>2</sub> and its association with anthropogenic, vegetation, and climate indices over the state of Bihar, India. *Environmental Advances*. 16, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100513>

De Araújo Santos, G.A., Morais Filho, L.F.F., de Meneses, K.C., da Silva Junior, C.A., de Souza Rolim, G. and La Scala Jr, N., 2022. Hot spots and anomalies of CO<sub>2</sub> over eastern Amazonia, Brazil: A time series from 2015 to 2018. *Environmental Research*. 215 (2), 114379. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114379>

De Lucena, W.B., Vicentini, M.E., Santos, G.A.D.A., Silva, B.D.O., Da Costa, D.V.M., Canteral, K.F.F., Román, J.A.N., Rolim, G.D.S., Panosso, A.R. and La Scala Jr, N., 2023. Temporal variability of the CO<sub>2</sub> emission and the O<sub>2</sub> influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. *Journal of South American Earth Sciences*. 121, 104120. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104120>

Dlugokencky and Tans, 2024. E. Dlugokencky, P. Tans. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [WWW Document]. [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends). (Accessed 15 January March 2024).

Doelling, D.R., Lukashin, C., Minnis, P., Scarino, B. and Morstad, D., 2011. Spectral reflectance corrections for satellite intercalibrations using SCIAMACHY data. *IEEE Geoscience and Remote*

*Sensing Letters*. 9(1), 119-123. DOI: 10.1109/LGRS.2011.2161751.

Ezimand, K., Aghighi, H., Ashourloo, D. and Shakiba, A., 2024. The analysis of the spatio-temporal changes and prediction of built-up lands and urban heat islands using multi-temporal satellite imagery. *Sustainable Cities and Society*. 103, 105231. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105231>

Falahatkar, S., Mousavi, S.M. and Farajzadeh, M., 2017. Spatial and temporal distribution of carbon dioxide gas using GOSAT data over IRAN. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189 (12), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6285-8>

Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., Köhler, P., Pollock, R. and Taylor, T.E., 2014. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*. 147, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.007>

Ghayoumi, R., Charles, A. and 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), 33. <https://doi.org/10.5751/ES-14217-280233>

Ghayoumi, R., Ebrahimi, E. and Mousavi, S.M., 2022. Dynamics of mangrove forest distribution changes in Iran. *Journal of Water and Climate Change*. 13(6), 2479-2489. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.069>

Golkar, F. and Mousavi, S.M., 2022. Variation of XCO<sub>2</sub> anomaly patterns in the Middle East from OCO-2 satellite data. *International Journal of Digital Earth*. 15(1), 1219-1235. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2096936>

Golkar, F. and Shirvani, A., 2020. Spatial and temporal distribution and seasonal prediction of satellite measurement of CO<sub>2</sub> concentration over Iran. *International Journal of Remote Sensing*. 41(23), 8891-8909. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1788743>

Golkar, F., Al-Wardy, M., Saffari, S.F., Al-Aufi, K. and Al-Rawas, G., 2019. Using OCO-2 satellite data for investigating the variability of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in relationship with precipitation, relative humidity, and vegetation over Oman. *Water*. 12(1), 101. <https://doi.org/10.3390/w12010101>

Gupta, A., Dhaka, S.K., Matsumi, Y., Imasu, R., Hayashida, S. and Singh, V., 2019. Seasonal and annual variation of AIRS retrieved CO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> over India during 2003–2011. *Journal of Earth System Science*. 128, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1108-7>

Hoveidi, H., Aslemand, A., Borhani, F. and Naghadeh, S.F., 2017. Emission and health costs estimation for air pollutants from municipal solid waste management scenarios, case study: NO<sub>x</sub> and



- SOx pollutants, Urmia, Iran. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 5(1), 59-64. <https://doi.org/10.1029/1999GB001137>
- Hatami, H., Khani, M., Rad, S.A.R. and Shokri, B., 2024. CO<sub>2</sub> conversion in a dielectric barrier discharge plasma by argon dilution over MgO/HKUST-1 catalyst using response surface methodology. *Heliyon*. 10 (4), e26280. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26280>.
- Huang, J., Zhang, G., Zhang, Y., Guan, X., Wei, Y. and Guo, R., 2020. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degradation and Development*. 31(11), 1380-1391. <https://doi.org/10.1002/ldr.3556>
- IPCC, 2019. Climate change and land. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Iqbal, R., Raza, M.A.S., Rahman, M.H.U., Hyder, S., Israr, M., Aslam, M.U., Mustafa, F., Shahzaman, M., Ayaz, M., Toleikiene, M. and Hashemi, F., 2022. Effect of partial rhizosphere drying on plant photosynthetic, antioxidative and water related indicators in cotton. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 53(16), pp.2125-2140. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2070633>
- Javanbakht, M., Saghafipour, A., Ezimand, K., Hamta, A., Farahani, L.Z. and Soltani, N., 2021. Identification of climatic and environmental factors associated with incidence of cutaneous leishmaniasis in Central Iran using satellite imagery. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 11(1), pp.40-46. DOI: 10.4103/2221-1691.300730
- Khaliq, M.A., Mustafa, F., Rehman, S.U., Shahzaman, M., Javed, Z., Sagir, M., Bashir, S. and Zuo, H., 2024. Spatiotemporal investigation of near-surface CH<sub>4</sub> and factors influencing CH<sub>4</sub> over South, East, and Southeast Asia. *Science of The Total Environment*. 922, p.171311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171311>
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M. and 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. <https://doi.org/10.1364/AO.48.006716>
- Mac Dowell, N., Fennell, P.S., Shah, N. and Maitland, G.C., 2017. The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. *Nature climate change*. 7(4), 243-249. <https://doi.org/10.1038/nclimate3231>
- Magazzino, C. and Cerulli, G., 2019. The determinants of CO<sub>2</sub> emissions in MENA countries: a responsiveness scores approach. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 26(6), 522-534. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1606863>
- Magazzino, C., 2017. Stationarity of electricity series in MENA countries. *The Electricity Journal*. 30(10), 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.014>
- Mai, B., Deng, X., Zhang, F., He, H., Luan, T., Li, F. and Liu, X., 2020. Background characteristics of atmospheric CO<sub>2</sub> and the potential source regions in the Pearl River Delta region of China. *Advances in Atmospheric Sciences*. 37, 557-568. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9238-z>
- Miao, R., Lu, N., Yao, L., Zhu, Y., Wang, J. and 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. <https://doi.org/10.3390/rs5073431>
- Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., Wennberg, P.O., Toon, G.C., Wunch, D., Roehl, C.M., Notholt, J. and Warneke, T., 2010. Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 3(6), 5613-5643. <https://doi.org/10.5194/amt-4-1061-2011>
- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. and Farajzadeh, M., 2017a. Assessment of seasonal variations of carbon dioxide concentration in Iran using GOSAT data. *Natural Resources Forum*. 41 (2), 83–91. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12121>
- Mousavi, S.M. and Falahatkar, S., 2020. Spatiotemporal distribution patterns of atmospheric methane using GOSAT data in Iran. *Environment, development and sustainability*. 22, 4191-4207. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00378-5>
- Mousavi, S.M., Darvishi, G., Mobarghaee Dinan, N. and Naghibi, S.A., 2022a. Optimal landfill site selection for solid waste of three municipalities based on boolean and fuzzy methods: A case study in Kermanshah Province, Iran. *Land*. 11(10), 1779. <https://doi.org/10.3390/land11101779>
- Mousavi, S.M., Dinan, N.M., Ansarifard, S. and Sonnentag, O., 2022b. Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. *Atmospheric Environment: X*. 14, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.aeoa.2022.100163>
- Mousavi, S.M., Dinan, N.M., Ansarifard, S., Borhani, F., Ezimand, K. and Naghibi, A., 2023. Examining the role of the main terrestrial factors on the seasonal distribution of atmospheric carbon dioxide concentration over Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 51(4), 865-875. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01650-4>
- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. and Farajzadeh, M., 2017b. Monitoring of monthly and seasonal methane amplitude in Iran using GOSAT data. *Physical Geography Research*. 49(2), 327-340. doi: 10.22059/jphgr.2017.62848

- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. and Farajzadeh, M., 2018. Concentration in changes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> greenhouse gases relation to environmental variable in Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*. 6(4), 65-79. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-781-en.html>
- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. and 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. <https://sid.ir/paper/402606/en>
- Mousavi, S.M., Golkarian, A., Naghibi, S.A., Kalantar, B. and Pradhan, B., 2017c. GIS-based groundwater spring potential mapping using data mining boosted regression tree and probabilistic frequency ratio models in Iran. *Aims Geosci*. 3(1), 91-115. DOI: 10.3934/geosci.2017.1.91
- Mousavi, S.M., Mobarghaee Dinan, N., Ansarifard, S., Darvishi, G., Borhani, F. and Naghibi, A., 2024. Assessing the impact of global carbon dioxide changes on atmospheric fluctuations in Iran through satellite data analysis. *Journal of Water and Climate Change*. p.jwc2024702. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.702>
- Mustafa, F., Bu, L., Wang, Q., Ali, M.A., Bilal, M., Shahzaman, M. and Qiu, Z., 2020. Multi-year comparison of CO<sub>2</sub> concentration from NOAA carbon tracker reanalysis model with data from GOSAT and OCO-2 over Asia. *Remote Sensing*. 12(15), p.2498. <https://doi.org/10.3390/rs12152498>
- Mustafa, F., Bu, L., Wang, Q., Shahzaman, M., Bilal, M., Aslam, R.W. and Dong, C., 2022. Spatiotemporal Investigation of Near-Surface CO<sub>2</sub> and Its Affecting Factors Over Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 60, pp.1-16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3178125
- Mustafa, F., Wang, H., Bu, L., Wang, Q., Shahzaman, M., Bilal, M., Zhou, M., Iqbal, R., Aslam, R.W., Ali, M.A. and Qiu, Z., 2021. Validation of gosat and oco-2 against in situ aircraft measurements and comparison with carbontracker and geos-chem over Qinhuangdao, China. *Remote Sensing*. 13(5), 899. <https://doi.org/10.3390/rs13050899>
- National Aeronautics and Space Administration., 2018. [http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD17A2\\_M\\_PSN&year](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD17A2_M_PSN&year). (accessed 15 December 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., Goede, A.P. and Muller, C., 2002. Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY. *Advances in Space Research*. 29(11), 1819-1824. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00102-3)
- O'dell, C.W., Eldering, A., Wennberg, P.O., Crisp, D., Gunson, M.R., Fisher, B., Frankenberg, C., Kiel, M., Lindqvist, H., Mandrake, L. and Merrelli, 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. <https://doi.org/10.5194/amt-11-6539-2018>
- Pan, G., Xu, Y. and Ma, J., 2021. The potential of CO<sub>2</sub> satellite monitoring for climate governance: A review. *Journal of Environmental Management*. 277, 111423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111423>
- Parker, R., Boesch, H., Cogan, A., Fraser, A., Feng, L., Palmer, P.I., Messerschmidt, J., Deutscher, N., Griffith, D.W., Notholt, J. and Wennberg, P.O., 2011. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations. *Geophysical Research Letters*. 38(15). L15807. <https://doi.org/10.1029/2011GL047871>
- Safaeian, S., Falahatkar, S. and Tourian, M.J., 2023. Satellite observation of atmospheric CO<sub>2</sub> and water storage change over Iran. *Scientific Reports*. 13(1), 3036. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28961-x>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., Macatangay, R. and 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. <https://doi.org/10.5194/acp-8-3827-2008>
- Soegaard, H., Nordstroem, C., Friberg, T., Hansen, B.U., Christensen, T.R. and Bay, C., 2000. Trace gas exchange in a high-Arctic valley: 3. Integrating and scaling CO<sub>2</sub> fluxes from canopy to landscape using flux data, footprint modeling, and remote sensing. *Global Biogeochemical Cycles*. 14(3), 725-744.
- Wang, Q., Mustafa, F., Bu, L., Yang, J., Fan, C., Liu, J. and Chen, W., 2022. Monitoring of Atmospheric Carbon Dioxide over a Desert Site Using Airborne and Ground Measurements. *Remote Sensing*. 14(20), p.5224. <https://doi.org/10.3390/rs14205224>
- Wang, Q., Mustafa, F., Bu, L., Zhu, S., Liu, J. and Chen, W., 2021. Atmospheric carbon dioxide measurement from aircraft and comparison with OCO-2 and CarbonTracker model data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 14(10), 6601-6617. DOI: 10.5194/amt-14-6601-2021
- Wang, T., Shi, J., Jing, Y., Zhao, T., Ji, D. and Xiong, C., 2014. Combining XCO<sub>2</sub> measurements derived from SCIAMACHY and GOSAT for potentially generating global CO<sub>2</sub> maps with high spatiotemporal resolution. *PLoS One*. 9(8), 105050. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105050>
- Watham, T., Padalia, H., Srinet, R., Nandy, S., Verma, P.A. and Chauhan, P., 2021. Seasonal dynamics and impact factors of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration over subtropical forest canopies: observation from eddy covariance tower and OCO-2

satellite in Northwest Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 193, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08896-4>

Watson, A.J., Schuster, U., Shutler, J.D., Holding, T., Ashton, I.G., Landschützer, P., Woolf, D.K. and Goddijn-Murphy, L., 2020. Revised estimates of ocean-atmosphere CO<sub>2</sub> flux are consistent with ocean carbon inventory. *Nature communications*. 11(1), 4422. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>

WDI (2024). World Development Indicators Databank, <https://databank.worldbank.org/home.aspx#advanced> DownloadOptions, (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., O'Dell, C., Mandrake, L., Viatte, C., Kiel, M. and Griffith, D.W., 2017. Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) X CO<sub>2</sub> measurements with TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*. 10(6), 2209-2238. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2209-2017>

Xavier, C.V., Moitinho, M.R., Teixeira, D.D.B., de Araujo Santos, G.A., Cora, J.E. and La Scala Jr, N., 2020. Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO<sub>2</sub> emissions after long-term no-till application. *Science of the total environment*. 709, p.136107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136107>

2019.136107

Yin, S., Wang, X., Santoso, H., Tani, H., Zhong, G. and Sun, Z., 2018b. Analyzing CO<sub>2</sub> 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. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1359344>

Yin, S., Wang, X., Tani, H., Zhang, X., Zhong, G., Sun, Z. and Chittenden, A.R., 2018a. Analyzing temporo-spatial changes and the distribution of the CO<sub>2</sub> concentration in Australia from 2009 to 2016 by greenhouse gas monitoring satellites. *Atmospheric environment*. 192, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.043>

Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., Morino, I. and Yokota, T., 2011. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*. 4(4), 717-734. <https://doi.org/10.5194/amt-4-717-2011>

Yousefi, M., Darvishi, A., Tello, E., Barghjelveh, S., Dinan, N.M. and Marull, J., 2021. Comparison of two biophysical indicators under different landscape complexity. *Ecological Indicators*. 124, 107439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107439>



*This page is intentionally  
left blank.*