

پایش تغییرات ماهانه و فصلی گاز متان با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT

سید محسن موسوی - دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس
سامره فلاحکار* - استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس
منوچهر فرج‌زاده - استاد گروه سنجش از دور، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۹/۰۹

چکیده

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر معرفی شده است. گاز متان، به منزله یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای، به تنهایی مسئول بیش از ۱۸ درصد از گرمایش ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این تحقیق از داده‌های سطح دو ماهواره GOSAT، محصولات MOD13Q1 و MOD11C3 ماهواره MODIS و پارامترهای هواشناسی دما، رطوبت، و بارندگی به منظور بررسی تغییرات ماهانه و فصلی گاز متان در سال ۲۰۱۳ استفاده شد. نتایج نشان داد گاز متان دارای افزایش ثابتی در طول این دوره بوده است؛ به طوری که میزان آن از 1788.36 ppb به 1823.45 ppb افزایش یافته؛ این موضوع نشان‌دهنده افزایش 35.09 ppb این گاز در ایران است. گاز متان دارای نوسانات ماهانه است؛ به طوری که حداکثر غلظت این گاز در ماه‌های اکتبر و سپتامبر و حداقل آن در ماه‌های مارس و آوریل مشاهده شد. این گاز با متغیرهای دما و LST ارتباط مثبت دارد و با متغیرهای NDVI، رطوبت، و بارندگی دارای ارتباط منفی است. این امر بیان‌کننده افزایش غلظت متان در مناطقی با پوشش گیاهی کم‌تراکم‌تر و با درجه حرارت بالاتر در ایران است. بنابراین، حفظ پوشش گیاهی طبیعی به‌ویژه در مناطق گرم و خشک به منظور کاهش غلظت گاز متان توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پایش ماهواره‌ای، تغییر اقلیم، گاز متان، GOSAT و MODIS

مقدمه

تغییر اقلیم و به‌ویژه گرمایش جهانی، به دلیل افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، سبب جلب توجه به این موضوع شده است (دایی و همکاران، ۲۰۱۳؛ فو و همکاران، ۲۰۱۵). دی‌اکسید کربن (CO_2) و دیگر گازهای گلخانه‌ای از جمله متان (CH_4)، نیتروز اکسید (N_2O)، هیدروفلوروکربن‌ها (HFCs)، پرفلوروکربن‌ها (PFCs)، و سولفور هگزا فلورید (SF_6) مواردی هستند که انتشارشان تحت نظارت قوانین پروتکل کیوتو قرار گرفته است (مورینو و همکاران، ۲۰۱۰؛ میاوو و همکاران، ۲۰۱۳). گاز متان به تنهایی مسئول بیش از ۱۸ درصد از گرمای تولیدشده ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (سازمان هواشناسی جهانی^۱، ۲۰۱۵). تغییر میزان متان از 700 ppb به 1808 ppb بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۱۰ نشان‌دهنده افزایش ۱۵۸ درصدی این گاز از دوران صنعتی شدن تا کنون بوده است (گو و همکاران، ۲۰۱۳a).

* E- mail: samereh.falahatkar@modares.ac.ir

نویسنده مسئول: ۰۱۱۴۴۵۵۳۱۰۳

1. World Meteorological Organization

چرخه متان دارای تغییرات فصلی است؛ به طوری که این تغییرات به فصلی بودن منابع تولید (تالاب‌ها، مزارع برنج، و سوزاندن بیومس) و خروجی ناشی از واکنش اتمسفری این گاز بستگی دارد. منابع انتشار متان به سه دسته تقسیم می‌شود: بیوژنیک^۱؛ ترموژنیک^۲؛ و پیروژنیک^۳. منابع بیوژنیک شامل تولید متان میکروبی در محیط‌های بی‌هوازی از جمله تالاب‌های طبیعی و مزارع برنج، مخازن آب شیرین با اکسیژن محدود از جمله سدها، سیستم گوارش نشخوارکنندگان و موریانه‌ها و شیرابه محل دفن، فاضلاب، و کودهای حیوانی است. منابع ترموژنیک شامل انفجارها و انتشار سوخت‌های فسیلی از زیر سطح زمین و آتشفشان‌های طبیعی است و منابع پیروژنیک شامل احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی است (کرسچک و همکاران، ۲۰۱۳).

روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای وجود دارد؛ از میان آن‌ها می‌توان به استفاده از پایگاه‌های زمینی، برج‌های بلند^۴، کشتی‌ها، هواپیماها، بالن، و ماهواره اشاره کرد (اینو و همکاران، ۲۰۱۳). در زمینه پایش ماهواره‌ای گازهای گلخانه‌ای، می‌توان به سنجنده‌های AIRS^۵، SCIAMACHY^۶، GOSAT^۷ و OCO-2^۸ اشاره کرد. در حال حاضر، GOSAT تنها ماهواره‌ای است که به اندازه‌گیری گاز گلخانه‌ای متان می‌پردازد و دارای دقت اندازه‌گیری کمتر از ۱ درصد است (گالی و همکاران، ۲۰۱۴؛ یوشیدا و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به جدید بودن علم پایش ماهواره‌ای گازهای گلخانه‌ای، مطالعات زیادی در این زمینه در ایران انجام نگرفته است. تنها مطالعه‌ای که در این زمینه در ایران انجام یافته مطالعه موسوی و همکاران (۲۰۱۷) است؛ آنان در مطالعه‌شان با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT و داده‌های ماهواره مودیس به بررسی تغییرات ماهانه و فصلی گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن در ایران پرداخته‌اند.

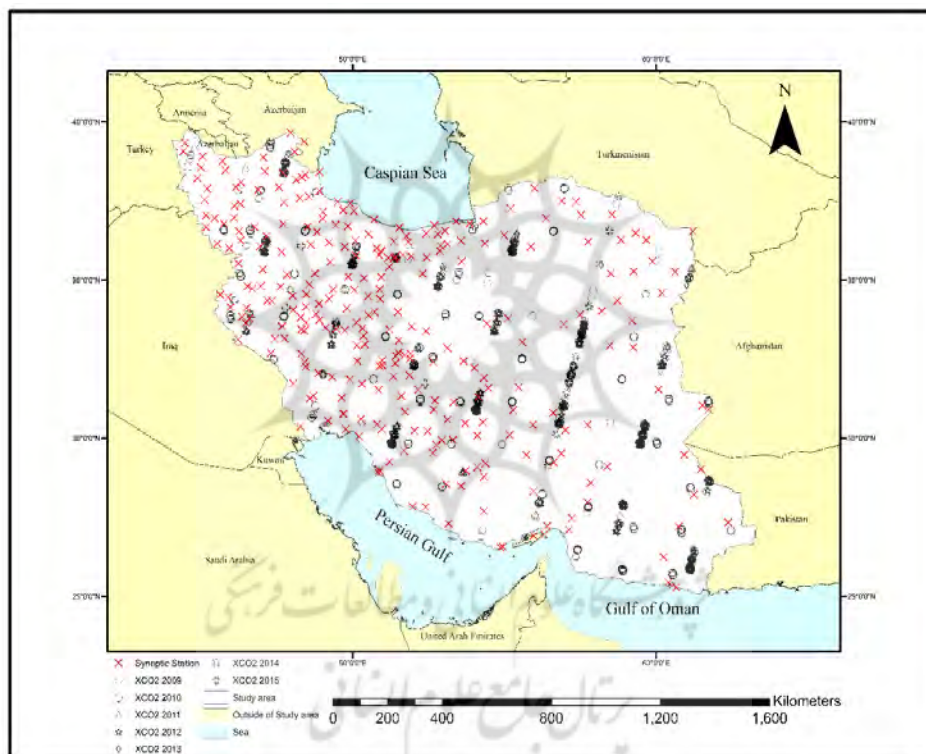
با توجه به نگرانی‌های گسترده در جوامع بین‌المللی در خصوص تغییر اقلیم و بر طبق گزارش‌های اعلام‌شده مؤسسه منابع طبیعی جهانی (مؤسسه تحقیقات جهانی^۹، ۲۰۱۵)، مبنی بر قرارگرفتن ایران در بین ده کشور پیشرو در انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۵ و همچنین با توجه به نبود پایگاه‌های زمینی اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای در ایران، در مطالعه حاضر از داده‌های ماهواره GOSAT به منظور بررسی تغییرات سالانه، ماهانه، و فصلی گاز متان در ایران استفاده شد. با توجه به ضرورت اجرای آیین‌نامه شورای محیط زیست برنامه ششم توسعه، مبنی بر طراحی و استقرار نظام اقتصاد کم‌کربن، هدف از مطالعه حاضر استخراج پایش ماهواره‌ای گاز متان و تحلیل تغییرات آن در ایران از نظر زمانی و دلایل حاکم بر آن است که می‌تواند در پی‌بردن به منابع احتمالی انتشار و جذب کربن، برنامه‌ریزی در سیاست‌های کلان اقلیمی، و اقدامات محیط زیستی در ارزیابی تعادل چرخه کربن اکوسیستم‌های خشکی کمک‌کننده باشد.

1. Biogenic
2. Thermogenic
3. Pyrogenic
4. Tall Tower
5. Atmospheric Infrared Sounder
6. Scanning Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography
7. Greenhouse Gas Observatory Sattelite
8. Orbiting Carbon Observatory
9. World Resource Institiue

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری است در غرب آسیا و مرکز خاورمیانه که بین عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی واقع شده است (شکل ۱). ایران دارای اقلیم‌های مختلفی است، از جمله اقلیم‌های معتدل و مرطوب سواحل جنوبی دریای خزر، اقلیم سرد کوهستان‌های غرب، اقلیم گرم و خشک فلات مرکزی، و اقلیم گرم و مرطوب سواحل جنوبی (فائو، ۲۰۱۵). میانگین ارتفاعی در ایران ۱۲۰۰ متر بالای سطح دریاست که پایین‌ترین ارتفاع آن نقطه‌ای در دشت لوت با ارتفاع ۵۶ متر زیر سطح دریا گزارش شده و مرتفع‌ترین نقطه در ارتفاع ۵۶۱۰ متری در قله دماوند است (فائو، ۲۰۱۵). میانگین بارندگی ایران ۲۳۹/۱۹ میلی‌متر است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۲).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، ستون‌های اندازه‌گیری گاز متان و ایستگاه‌های سینوپتیک

داده‌های مورد استفاده

داده‌های سطح ۲ ماهواره GOSAT به منظور استخراج گاز متان

ماهواره مشاهده‌کننده گازهای گلخانه‌ای GOSAT در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ و در جزیره تانگاشیمای ژاپن به فضا پرتاب شد (کیوز و همکاران، ۲۰۰۹؛ یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹؛ پارکر و همکاران، ۲۰۱۱). GOSAT پروژه مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط زیست (MOE)، و انجمن ملی مطالعات محیط زیست (NIES) با سرمایه‌گذاری بیست میلیارد یورو است (میاوو و همکاران، ۲۰۱۳). این ماهواره در ارتفاع ۶۶۶ کیلومتری سطح زمین

قرار گرفته است. هر بار گردش را تقریباً در ۱۰۰ دقیقه کامل می‌کند و زمان محلی گردش آن ۱۲:۴۸ دقیقه است (یوشیدا و همکاران، ۲۰۱۱؛ میاوو و همکاران، ۲۰۱۳). هدف اولیه پروژۀ GOSAT تخمین دقیق منابع انتشار و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس زیر قاره‌ای برای کمک به مدیران محیط زیستی در ارزیابی تعادل چرخه کربن اکوسیستم‌های زمینی است (کیوز و همکاران، ۲۰۰۹؛ مورینو و همکاران، ۲۰۱۰). این ماهواره اولین ماهواره دنیاست که برای اندازه‌گیری‌های غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و متان از باند SWIR و با پوشش جهانی هر سه روز یک‌بار طراحی شده است (گو و همکاران، ۲۰۱۳a). همچنین، این ماهواره خورشیدآهنگ و با زاویه انحراف ۹۸ درجه است (مورینو و همکاران، ۲۰۱۰) و دارای قدرت تفکیک طیفی 0.2 cm^{-1} است و تفکیک مکانی آن دایره‌ای به شعاع ۱۰/۵ کیلومتر است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). این ماهواره برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای به دو سنجندۀ TANSO-FTS و TANSO-CAI^۲ مجهز است. مولکول‌های دی‌اکسید کربن و متان در اتمسفر اشعه‌هایی را با طول موج خاصی جذب می‌کند و اندازه‌گیری‌های آن به صورتی خواهد بود که مقدار دی‌اکسید کربن و متان را به صورت ستون‌هایی از سطح زمین تا بالای جو اندازه‌گیری می‌کند (پارکر و همکاران، ۲۰۱۱). ستون‌های یادشده در پهنای عرضی ماهواره به تعداد پنج نقطه به شعاع ۱۰/۵ کیلومتر برداشت می‌شود که فاصله تقریبی بین این ستون‌ها ۱۰۰ کیلومتر است (پارکر و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به اینکه زمان بازگشت ماهواره هر سه روز یک بار است، مشاهدات فراوانی که کل جهان را پوشش بدهد وجود دارد، اما، به دلیل محدودیت شرایط بدون ابر، فقط از ۱۰ درصد از مشاهدات انجام‌شده به وسیله TANSO-FTS می‌توان برای بازیابی گازهای دی‌اکسید کربن و متان استفاده کرد (مورینو و همکاران، ۲۰۱۰). داده‌های ماهواره GOSAT دارای سطوح مختلفی است؛ به طوری که داده‌های به‌دست‌آمده از سنجنده‌های TANSO-FTS و TANSO-CAI^۱ داده‌های سطح ۱ می‌باشند. این داده‌ها اعتبارسنجی نشده‌اند و به اعتبارسنجی نیاز دارند. NIES مسئول اعتبارسنجی و توسعه الگوریتم‌هایی برای بازیابی میانگین ستون‌های دی‌اکسید کربن و متان از داده‌های سطح ۱ است و بعد از اعتبارسنجی‌های انجام‌شده به وسیله پایگاه‌های زمینی یا به وسیله هواپیما داده‌های سطح ۲ تولید می‌شود (میاوو و همکاران، ۲۰۱۳). دقت مشاهدات ارزیابی فراوانی ستون‌های بازیابی‌شده برای GOSAT در بیشتر موارد کمتر از یک درصد است (یوشیدا و همکاران، ۲۰۱۱).

محصولات ماهواره MODIS به منظور پایش پوشش گیاهی و دمای سطح زمین

سنجندۀ MODIS یک ابزار کلیدی نصب‌شده بر روی Terra و Aqua است و از قابل اعتمادترین منبع داده‌ها در مقیاس قاره‌ای است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹). MODIS دارای ۳۶ باند طیفی است که داده‌ها را در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر جمع‌آوری می‌کند و همچنین قادر است کل سطح زمین را در طول یک تا دو روز مشاهده کند. از نقاط قوت MODIS می‌توان به پوشش جهانی، قدرت تفکیک طیفی بالا، و کالیبراسیون دقیق در باندهای مرئی، مادون قرمز

1. Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Fourier Transform Spectrometer

2. Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Cloud and Aerosol Imager

نزدیک، و مادون قرمز حرارتی اشاره کرد (گو و همکاران، ۲۰۱۳a). بیش از ۱۰ نوع اطلاعات را می‌توان از MODIS استخراج کرد. در مطالعه حاضر از محصولات MOD13Q1 و MOD11C3 استفاده شده است که به ترتیب معرف شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده^۱ (NDVI) و دمای سطح زمین^۲ (LST) است. بعد از دانلود داده‌های مورد نظر از سایت زمین گشت^۳، با توجه به وسیع بودن منطقه مورد مطالعه و قرار گرفتن آن در بلوک‌های مختلف، داده‌ها در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۳ و با استفاده از روش موزائیک‌گیری در کنار هم قرار گرفتند و در پایان یکسان‌سازی اندازه پیکسل‌های داده‌های مورد مطالعه با استفاده از روش bilinear انجام شد.

داده‌های هواشناسی

پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه شامل میانگین دمای ماهانه (°C)، میانگین رطوبت نسبی ماهانه (%، و میانگین بارش ماهانه (mm) است که از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. شایان ذکر است که این داده‌ها بعد از میانگین‌گیری داده‌های روزانه به دست آمد. شکل ۱ موقعیت مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد. در این مطالعه، اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک با فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر از ستون‌های متان اتخاذ شد. در مطالعه حاضر با اینکه اطلاعات ۲۹۰ ایستگاه سینوپتیک وجود داشت، فقط از اطلاعات ۶۲ ایستگاه، که در فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر از ستون‌های اندازه‌گیری متان قرار داشتند، استفاده شد.

آنالیزهای آماری

آنالیزهای آماری و ضریب همبستگی بین ستون‌های متان، پارامترهای هواشناسی (دما، رطوبت، و بارندگی)، و شاخص‌های LST و NDVI ماهواره مودیس در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ بررسی شدند. برای بررسی میزان اختلاف معنادار بودن متغیر گاز متان منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ از آزمون واریانس یک‌طرفه و برای تعیین تفاوت بین گروه‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

آمار توصیفی متغیرهای مورد مطالعه

جدول ۱ پارامترهای آمار توصیفی متغیر متان و متغیرهای هواشناسی دما و رطوبت را، که شامل میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، و ضریب تغییرات است، برای سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد.

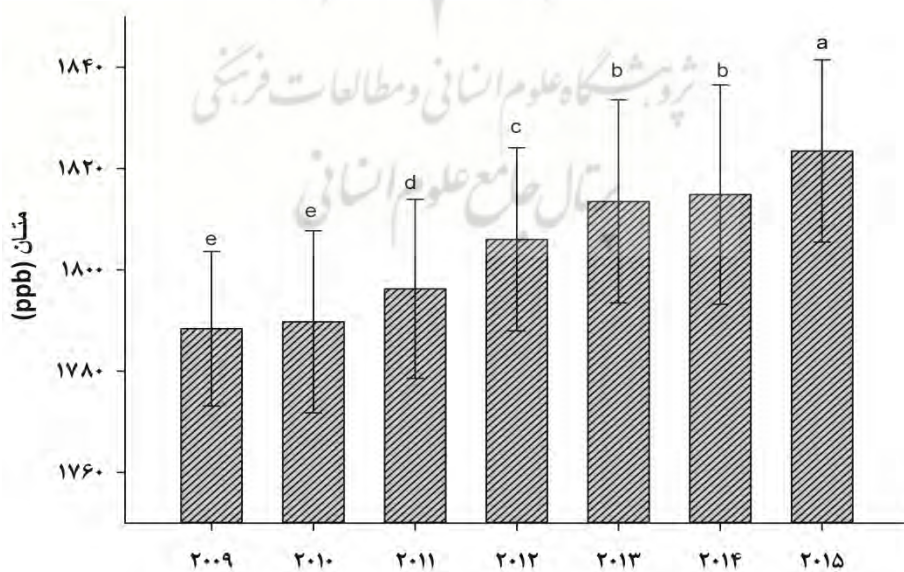
1. Normalized Difference Vegetation Index
2. land Surface Temperature
3. Earth Explorer

جدول ۱. آمار توصیفی متغیرهای مورد استفاده

متان (PPb)	میانگین دما (°C)	میانگین رطوبت (%)	
۲۵/۱۷۵۷	-۲۶/۶۰	۰	کمینه
۱۸۸۲/۸۲	۵۲	۱۰۰	بیشینه
۱۸۱۳/۵	۱۷/۷۳	۴۷/۸۷	میانگین
۲۰/۰۴	۹۱۲/۱	۲۶/۳۵	انحراف معیار
۱/۱۱	۰/۶۹	۰/۵۵	ضریب تغییرات

بررسی روند تغییرات متان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵

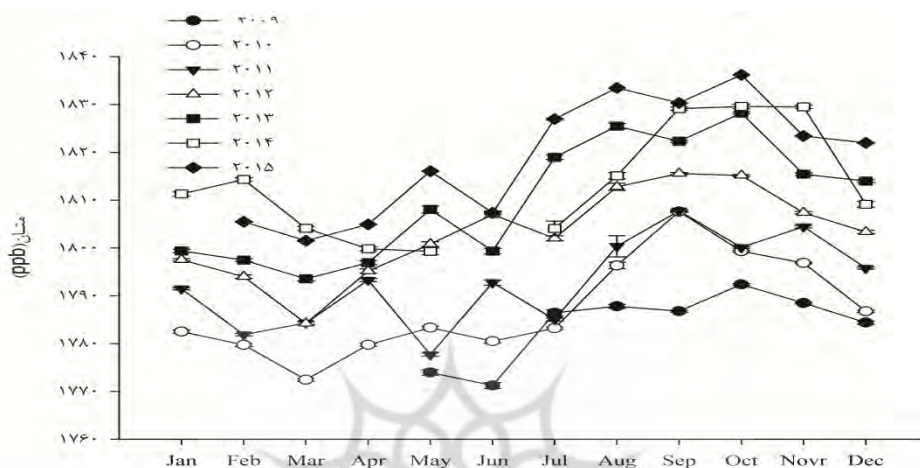
شکل ۲ تغییرات متان را از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، گاز متان دارای افزایش ثابتی در طول این دوره شش‌ساله بوده است؛ به طوری که میزان متان از ۱۷۸۸/۳۶ ppb به ۱۸۲۳/۴۵ ppb افزایش یافته؛ این موضوع نشان‌دهنده افزایش ۳۵/۰۹ ppb این گاز در ایران است. به‌رغم اینکه ایران در آذر ۱۳۸۴ به پروتکل کیوتو ملحق شده و در خصوص کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف انرژی، نفت و گاز، کشاورزی، منابع طبیعی، و جنگل‌داری اعلام همکاری نموده، همچنان روند افزایشی انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT در ایران مشاهده می‌شود. نتایج آزمون آنالیز واریانس نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار گاز متان در همه سال‌ها در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد است. به استثنای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ و سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، که اختلاف معناداری مشاهده نشد.



شکل ۲. روند تغییرات متان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ در ایران

بررسی تغییرات ماهانه متان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵

در این تحقیق به منظور بررسی نوسانات ماهانه گاز متان از داده‌های سطح ۲ ماهواره GOSAT ایران استفاده شد. این بررسی بیانگر تغییرات ماهانه این گاز از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ در ایران است؛ شکل ۳ نتایج آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳. بررسی روند تغییرات گاز متان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ در ایران

با توجه به نتایج، حداکثر غلظت این گاز در ماه‌های اکتبر و سپتامبر و حداقل آن در بیشتر سال‌های مورد بررسی در ماه مارس مشاهده شد. درجه حرارت از جمله عوامل مؤثر در انتشار گاز متان است (کیپلر و همکاران، ۲۰۰۶). مطابق با شکل‌های ۳ و ۴، با افزایش درجه حرارت در فصل بهار و تابستان روند افزایشی گاز متان در این فصول مشاهده می‌شود. درخور ذکر است که توزیع مکانی منابع طبیعی و انسانی انتشار گاز متان مانند تالاب‌ها، شالیزارها، محل‌های دفن زباله، و دامداری‌ها از جمله عوامل تأثیرگذار در انتشار این گاز در ماه‌های مختلف سال است (کاویتا و همکاران، ۲۰۱۶a).

نتایج همبستگی گاز متان با پارامترهای هواشناسی، LST، و NDVI

ضریب همبستگی به منظور بررسی ارتباط میانگین ماهانه گاز متان و پارامترهای هواشناسی دما، رطوبت، بارندگی، LST، و NDVI در سال ۲۰۱۳ در ایران بررسی شد. برای ارتباط گاز متان با پارامترهای هواشناسی ارتباط سالانه و برای ارتباط متغیرهای LST و NDVI با این گاز ارتباط فصلی در نظر گرفته شد؛ شکل‌های ۴ - ۹ نتایج آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ضریب همبستگی پارامترهای اقلیمی و گاز متان در سال ۲۰۱۳

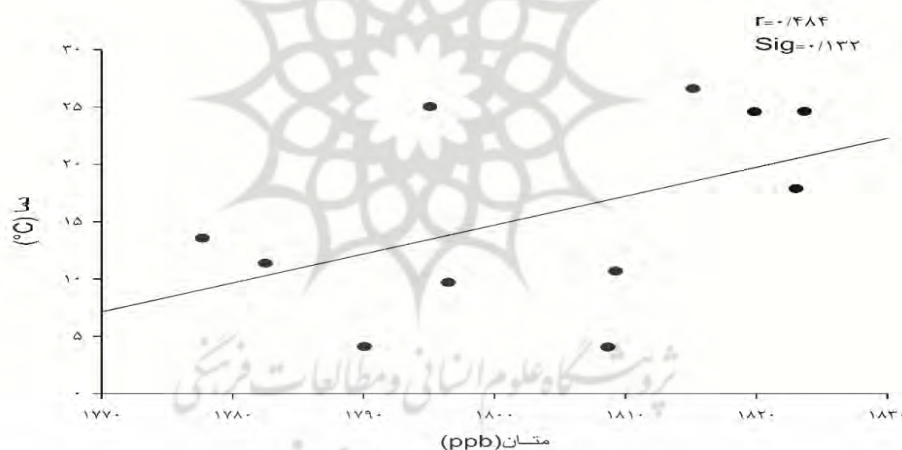
رطوبت	بارندگی	دما	
-۰٫۴۷۹	-۰٫۵۰۵	۰٫۴۸۴	R
۰٫۲۲۹	۰٫۲۵۵	۰٫۲۳۴	R ² متان
۰٫۱۳۶	۰٫۱۱۳	۰٫۱۳۲	Pvalue

جدول ۳. ضریب همبستگی NDVI و گاز متان در فصول مختلف سال ۲۰۱۳

NDVI زمستان	NDVI پاییز	NDVI تابستان	NDVI بهار		
-۰/۳۲۲	-۰/۱۸۶	-۰/۱۳۸	-۰/۵۲۶	R	
۰/۱۰۳	۰/۰۳۴	۰/۰۱۹	۰/۲۷۷	R ²	متان
۰/۰۳۱	۰/۲۰۶	۰/۳۶۷	۰/۰۰۸	Pvalue	

جدول ۴. ضریب همبستگی LST و گاز متان در فصول مختلف سال ۲۰۱۳

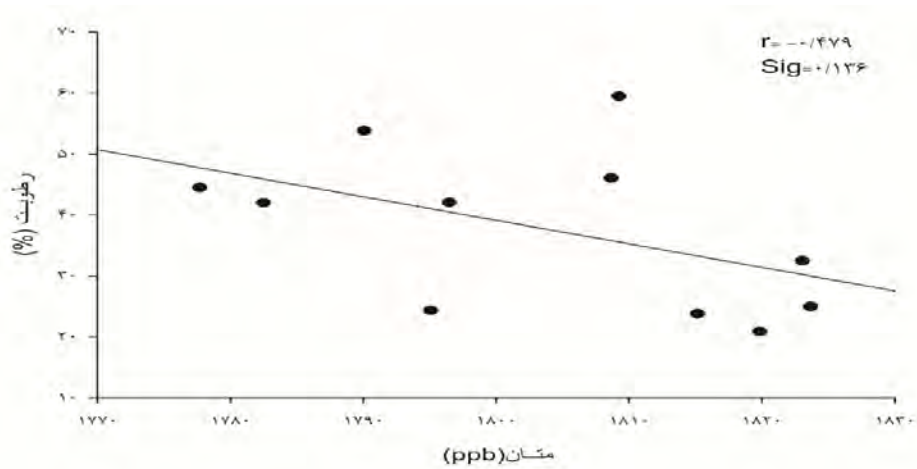
LST زمستان	LST پاییز	LST تابستان	LST بهار		
۰/۶۳۴	۰/۴۵۸	۰/۲۲۳	۰/۶	R	
۰/۴۰۱	۰/۲۰۹	۰/۰۴۹	۰/۳۶	R ²	متان
۰/۰۰	۰/۰۰۱	۰/۱۴۰	۰/۰۰۲	Pvalue	



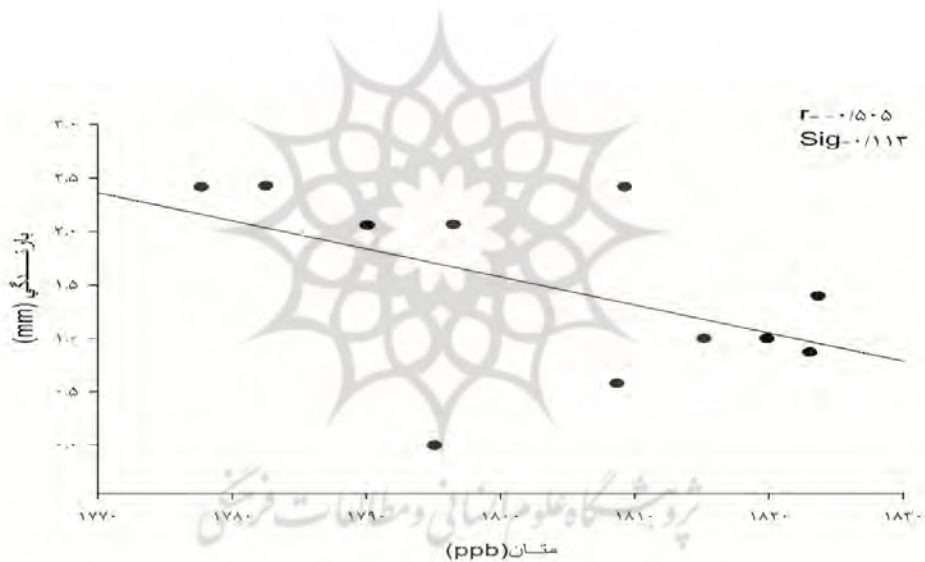
شکل ۴. بررسی ارتباط میانگین ماهانه گاز متان و متغیر دما در سال ۲۰۱۳

همان طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، نتایج همبستگی بین گاز متان و میانگین دمای ماهانه سال ۲۰۱۳ مثبت است

($r=0.484$ ، $\text{Sig}=0.132$)؛ به طوری که غلظت گاز متان با افزایش دما در سال ۲۰۱۳ افزایش یافته است.

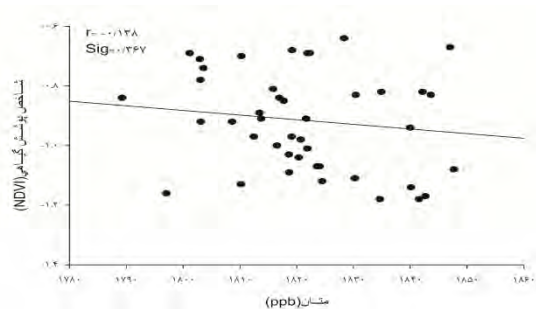


شکل ۵. بررسی ارتباط میانگین ماهانه گاز متان و متغیر درصد رطوبت نسبی در سال ۲۰۱۳

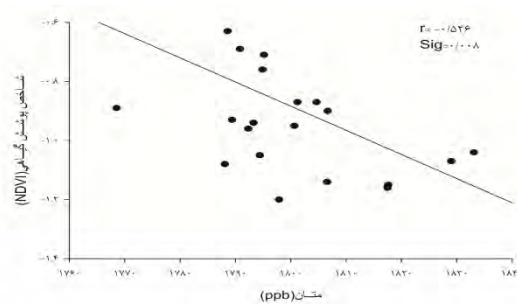


شکل ۶. بررسی ارتباط میانگین ماهانه گاز متان و متغیر بارندگی در سال ۲۰۱۳

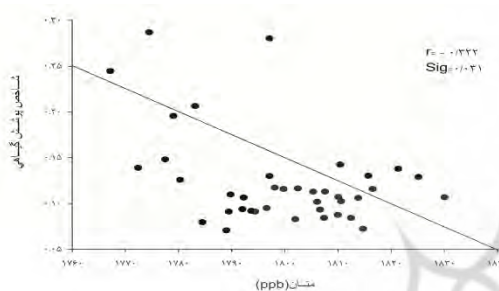
با توجه به شکل ۵، گاز متان دارای ارتباط منفی با متغیر رطوبت است ($r = -0.479$, $\text{Sig} = 0.136$)؛ به طوری که در سال ۲۰۱۳، با افزایش درصد رطوبت نسبی ماهانه، غلظت گاز متان کاهش یافته است. علت این همبستگی در ارتباط با کاهش رادیکال آزاد OH در هوای خشک در بخش بحث ارائه خواهد شد. همان طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، گاز متان دارای ارتباط منفی با متغیر بارندگی در سال ۲۰۱۳ در ایران است ($r = -0.505$, $\text{Sig} = 0.113$)؛ به صورتی که با افزایش بارندگی میزان غلظت متان در منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد.



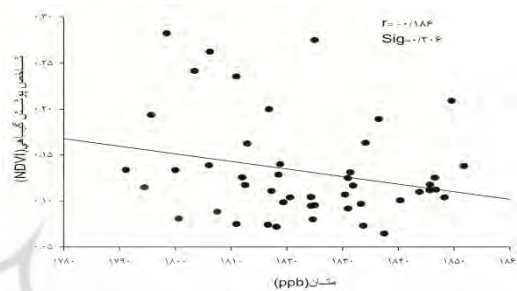
ب) رابطه متان و NDVI فصل تابستان *



الف) رابطه متان و NDVI فصل بهار *

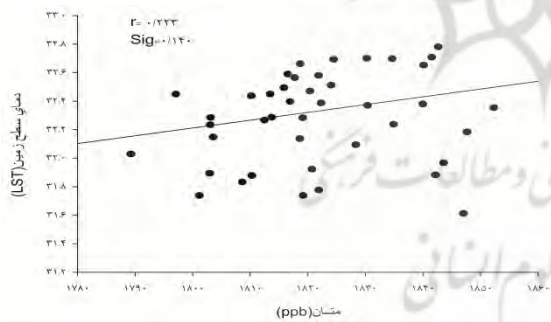


د) رابطه متان و NDVI فصل زمستان

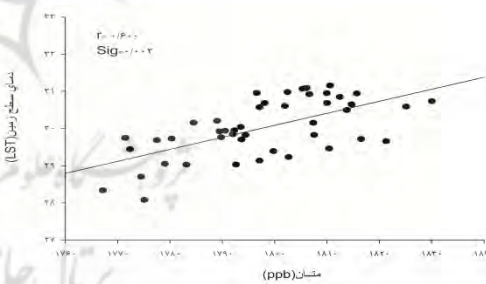


ج) رابطه متان و NDVI فصل پاییز

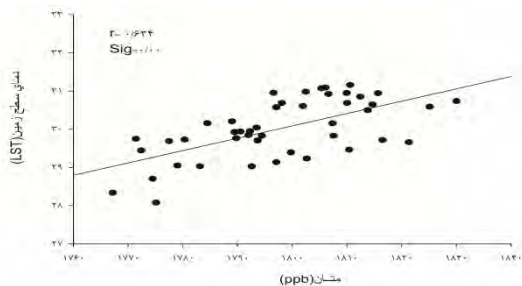
شکل ۷. همبستگی غلظت ماهانه گاز متان و شاخص NDVI در فصول مختلف سال ۲۰۱۳
 (* گفتنی است که این مقادیر نرمال شد).



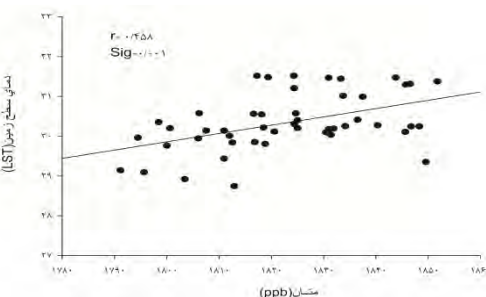
ب) رابطه متان و LST فصل تابستان



الف) رابطه متان و LST فصل بهار



د) رابطه متان و LST فصل زمستان



ج) رابطه متان و LST فصل پاییز

شکل ۸. همبستگی غلظت ماهانه گاز متان و شاخص LST فصول مختلف سال ۲۰۱۳

شکل‌های ۷ و ۸ رابطه بین گاز متان و شاخص‌های NDVI و LST را در ایران در فصول مختلف سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد. در همه فصول رابطه بین گاز متان و شاخص NDVI منفی و رابطه بین این گاز با شاخص LST مثبت است. برای بهار و پاییز ارتباط‌های NDVI و متان معنی‌دار و برای LST، به استثنای تابستان، سایر فصول دارای ارتباط‌های معنی‌دارند؛ به طوری که با افزایش دما و کاهش NDVI در همه فصول غلظت گاز متان افزایش یافته است. ضرایب همبستگی بین گاز متان و شاخص NDVI در فصول بهار، تابستان، پاییز، و زمستان به ترتیب ۰/۵۲۶، -۰/۱۳۸، ۰/۱۸۶، و -۰/۳۲۲ است و نشان می‌دهد که در فصول تابستان و پاییز هیچ ارتباطی بین NDVI و گاز متان وجود ندارد. همچنین، ضریب همبستگی بین این گاز و شاخص LST در فصول بهار، تابستان، پاییز، و زمستان به ترتیب ۰/۲۲۳، ۰/۴۵۸، و ۰/۶۳۴ گزارش شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

مطابق با نتایج بیان شده، گاز متان دارای تغییرات ثابتی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ بوده است؛ به طوری که میزان این گاز از ۱۷۸۸/۳۶ ppb به ۱۸۲۳/۴۵ ppb افزایش یافته و نشان‌دهنده افزایش ۳۵/۰۹ ppb این گاز در ایران است. در این زمینه گو و همکاران (۲۰۱۳a) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات سالانه گازهای دی‌اکسید کربن و متان در چین و مغولستان با استفاده از دو ماهواره GOSAT و SCIAMACHY پرداختند. آنان شاهد روند افزایشی تغییرات این دو گاز در منطقه مورد مطالعه خود بودند. در تحقیقی دیگر، پراساد و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ماهواره‌های GOSAT، SCIAMACHY، و پایگاه زمینی NOAA به بررسی روند تغییرات دی‌اکسید کربن و متان از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ در هندوستان پرداختند. آنان در تحقیق خود شاهد روند افزایشی و رو به رشد دی‌اکسید کربن بودند، اما در زمینه متان رشد درخور توجهی را در منطقه مورد مطالعه ملاحظه نکردند. سان و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تغییرات سالانه متان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ در شرق آسیا پرداختند. آنان در تحقیق خود شاهد روند افزایشی این گاز در منطقه مورد مطالعه‌شان به میزان ۵/۹۷ ppb طی دوره پنج‌ساله بودند. همچنین، در تحقیقی که آژانس هواشناسی ژاپن انجام داد تغییرات سالانه متان از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ بررسی شد. در طی این دوره افزایش میانگین سالانه متان ۵/۶۰ ppb اندازه‌گیری شد (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۱۵). نتایج پژوهش محققانی که در بالا ذکر شد تأییدکننده روند افزایشی گاز متان در بیشتر نقاط جهان در سال‌های اخیر است.

مطابق نتایج بیان شده، گاز متان دارای نوسانات فصلی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ بوده است؛ به طوری که حداکثر غلظت این گاز در ماه‌های اکتبر و سپتامبر و حداقل آن در بیشتر سال‌های مورد بررسی در ماه مارس مشاهده شد. در مطالعات مشابه، گو و همکاران (۲۰۱۳a)، در بررسی تغییرات ماهانه متان در چین و مغولستان، کمترین غلظت این گاز را در ماه می و بیشترین غلظت آن را در ماه سپتامبر گزارش کردند. آنان بیان کردند که علت افزایش متان از می تا سپتامبر به سبب افزایش دما در طی این مدت بوده است. سان و همکاران (۲۰۱۶)، در بررسی تغییرات متان در شرق آسیا، شاهد تغییرات فصلی متان در منطقه مورد مطالعه‌شان بودند؛ به طوری که حداکثر غلظت این گاز را در ماه آگوست و حداقل آن را در ماه‌های فوریه و مارس مشاهده کردند. کاویتا و همکاران (۲۰۱۶b)، در تحقیقی در هندوستان، حداقل غلظت متان

در فصل زمستان و حداکثر غلظت این گاز در ماه‌های آگوست و جولای را اندازه‌گیری کردند. سرینیواس و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ای در منطقه شادناگار^۱ هندوستان، بیان کردند که دلیل افزایش متان در فصل تابستان به سبب افزایش فعالیت میکروبی خاک در این مناطق است. کاویتا و همکاران (۲۰۱۶a) در هندوستان به این نتیجه دست یافتند که از ماه ژوئن به بعد میانگین غلظت متان اتمسفری افزایش می‌یابد و در آگوست و سپتامبر به بیشترین حد خود می‌رسد. آنان دلایل تغییرات فصلی متان را با کشت برنج، تالاب‌ها، و سوزاندن بیومس مرتبط دانستند. نتایج نوسانات ماهانه گاز متان در مطالعات فوق با نتایج تحقیق حاضر همسوست. در همه فصول رابطه بین گاز متان و شاخص NDVI منفی و رابطه بین این گاز با شاخص LST مثبت بوده است؛ به طوری که با افزایش دما و کاهش NDVI در همه فصول غلظت گاز متان افزایش یافته است. البته، درخور ذکر است که همه روابط بیان‌شده دارای ضریب همبستگی بالایی با متغیر متان نیست؛ این امر در مطالعات مشابه در سایر کشورها نیز مشاهده می‌شود. گو و همکاران (۲۰۱۳b) گزارش کردند که رابطه بین متان و NDVI منفی است و ضریب رگرسیون این گاز با NDVI ۰/۵۰ است. گو و همکاران (۲۰۱۳a) در مطالعه‌ای به بررسی توزیع مکانی متان در شرق آسیا پرداختند و درباره ارتباط پارامترهای محیطی با گازهای گلخانه‌ای بیان کردند که NDVI با متان رابطه منفی و معنی‌داری دارد؛ به طوری که افزایش NDVI موجب کاهش CH₄ در منطقه مورد مطالعه می‌شود. آنان گزارش کردند که ضریب رگرسیون این متغیر با NDVI ۰/۷۵ است. آنان مهم‌ترین علت کاهش متان را اکسیداسیون متان به وسیله رادیکال آزاد هیدروکسیل بیان کردند.

از مهم‌ترین منابع خروج متان اتمسفری در تروپوسفر، اکسیداسیون آن به وسیله رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل (OH) است (کروتزن و گیدل، ۱۹۸۳؛ سیسرون و اورملند، ۱۹۸۸)؛ به طوری که بیش از ۹۰ درصد متان اتمسفری به وسیله این رادیکال‌های آزاد از اتمسفر خارج می‌شود (وقجیانی و راویشانکارا، ۱۹۹۱؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۵). در اتمسفر مولکول‌های ازون با دریافت انرژی‌های لازم از پرتوهای خورشید به مولکول O₂ و اتم O تجزیه می‌شود و حاصل واکنش اتم O با بخار آب تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل (OH) است. در مناطقی که دما بالا و رطوبت پایین است، بخار آب اتمسفر کاهش و در پی آن OH نیز کاهش می‌یابد (ایسل و همکاران، ۱۹۹۷؛ گو و همکاران، ۲۰۱۳b). کیپلر و همکاران بیان کردند که انتشار متان به دما حساس است؛ به طوری که افزایش ۱۰ درجه‌ای دما در محدوده دمایی (۳۰-۷۰ درجه) موجب دوبرابر شدن غلظت متان می‌شود. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، که نشان‌دهنده رابطه مثبت گاز متان با متغیرهای دما و LST و رابطه منفی این گاز با متغیرهای NDVI، بارندگی، و رطوبت است، در مناطقی با رطوبت، بارندگی، و پوشش گیاهی پایین و مناطقی با دما و درجه حرارت سطح زمین بالا حداکثر غلظت گاز گلخانه‌ای متان مشاهده می‌شود. بنابراین، حفظ اکوسیستم‌های طبیعی به‌ویژه پوشش‌های گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند در تعدیل گاز متان نقش مؤثری داشته باشد. در پایان پیشنهاد می‌شود به منظور پی‌بردن به منابع و خروجی‌های احتمالی گاز متان توزیع مکانی این گاز در مقیاس ملی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GOSAT تهیه شود.

سپاسگزاری

از معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری «صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور» به جهت حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین، محققان پژوهش حاضر از همکاری سازمان هواشناسی ایران در زمینه ارائه آمار و اطلاعات مورد نیاز سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۹۲). سالنامه آماری ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

- Cicerone, R.J. and Oremland, R.S. (1988). Biogeochemical aspects of atmospheric methane, *Global biogeochemical cycles*, 2(4): 299-327.
- Crutzen, P.J. and Gidel, L.T. (1983). A two-dimensional photochemical model of the atmosphere: 2. The tropospheric budgets of the anthropogenic chlorocarbons CO, CH₄, CH₃Cl and the effect of various NO_x sources on tropospheric ozone, *Journal of Geophysical Research*, 88(C11): 6641-6661.
- Dai, L.; Jia, J.; Yu, D.; Lewis, B.J.; Zhou, L.; Zhou, W.; Zhao, W. and Jiang, L. (2013). Effects of climate change on biomass carbon sequestration in old-growth forest ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China, *Forest Ecology and Management*, 300: 106-116.
- Eisele, F.L.; Mount, G.H.; Tanner, D.; Jefferson, A.; Shetter, R.; Harder, J.W. and Williams, E.J. (1997). Understanding the production and interconversion of the hydroxyl radical during the Tropospheric OH Photochemistry Experiment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D5): 6457-6465.
- Food and Agriculture Organization (2015). <http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/iran/iran%20.htm>. last visited at 23/04/2015.
- Fu, L.; Zhao, Y.; Xu, Zh. and Wu, B. (2015). Spatial and temporal dynamics of forest aboveground carbon stocks in response to climate and environmental changes, *Soils Sediments*, 15(2): 249-259.
- Galli, A.; Guerlet, S.; Butz, A.; Aben, I.; Suto, H.; Kuze, A. ... and Landgraf, J. (2014). The impact of spectral resolution on satellite retrieval accuracy of CO₂ and CH₄, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6(6): 10399-10441.
- Guo, M.; Wang, X.F.; Li, J.; Yi, K.P.; Zhong, G.S.; Wang, H.M. and Tani, H. (2013a). 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.
- Guo, M.; Wang, X.; Li, J.; Wang, H. and Tani, H. (2013b). Examining the relationships between land cover and greenhouse gas concentrations using remote-sensing data in East Asia, *International journal of remote sensing*, 34(12): 4281-4303.
- Inoue, M.; Morino, I.; Uchino, O.; Miyamoto, Y.; Yoshida, Y.; Yokota, T. ... and Patra, P.K. (2013). Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(19): 9771-9788.
- Kavitha, M. and Nair, P.R. (2016a). Region-dependent seasonal pattern of methane over Indian region as observed by SCIAMACHY, *Atmospheric Environment*, 131: 316-325.
- Kavitha, M. and Nair, P.R. (2016b). Non-homogeneous vertical distribution of methane over Indian region using surface, aircraft and satellite based data, *Atmospheric Environment*, 141: 174-185.
- Kepler, F.; Hamilton, J.T.; Braß, M. and Röckmann, T. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions, *Nature*, 439(7073): 187-191.
- Kim, H.S.; Chung, Y.S.; Tans, P.P. and Dlugokencky, E.J. (2015). Decadal trends of atmospheric methane in East Asia from 1991 to 2013, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3): 293-298.
- Kirschke, S.; Bousquet, P.; Ciais, P.; Saunoy, M.; Canadell, J.G.; Dlugokencky, E.J. ... and Cameron-Smith, P. (2013). Three decades of global methane sources and sinks, *Nature Geoscience*, 6(10): 813-823.

- 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.
- 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.
- Morino, I.; Uchino, O.; Inoue, M.; Yoshida, Y.; Yokota, T.; Wennberg, P. ... and 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. and Farajzadeh, M. (2017). Assessment of seasonal variations of carbon dioxide concentration in Iran using GOSAT data, *Natural Resources Forum*, 41(2):83-91.
- Parker, R.; Boesch, H.; Cogan, A.; Fraser, A.; Feng, L.; Palmer, P.I. 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).
- Prasad, P.; Rastogi, S. and Singh, R.P. (2014). Study of satellite retrieved CO₂ and CH₄ concentration over India, *Advances in Space Research*, 54(9): 1933-1940.
- Sreenivas, G.; Mahesh, P.; Subin, J.; Kanchana, A.L.; Rao, P.V.N. and Dadhwal, V.K. (2016). Influence of Meteorology and interrelationship with greenhouse gases (CO₂ and CH₄) at a suburban site of India, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6): 3953-3967.
- Sun, Z.; Wang, X.; Tani, H.; Zhong, G. and Yin, S. (2016). Spatial Distribution of CO₂ Concentration over South America during ENSO Episodes by Using GOSAT Data, *American Journal of Climate Change*, 5(01): 77.
- Vaghjiani, G.L. and Ravishankara, A.R. (1991). New measurement of the rate coefficient for the reaction of OH with methane, *Nature*, 350(6317): 406-409.
- Wang, T.; Shi, J.; Jing, Y.; Zhao, T.; Ji, D. and 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.
- World Meteorological Organization (2015). WMO WDCGG Data Summary No. 39; Japan Meteorological Agency/WMO: Tokyo, Japan, 2015; pp. 17-22.
- World research institute (2015). <http://www.wri.org>. last visited at 15/8/2015.
- Yokota, T.; Yoshida, Y.; Eguchi, N.; Ota, Y.; Tanaka, T.; Watanabe, H. and Maksyutov, S. (2009). Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results, *Sola*, 5: 160-163.
- Yoshida, Y.; Ota, Y.; Eguchi, N.; Kikuchi, N.; Nobuta, K.; Tran, H. and 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.
- Zhang, Y.; Xu, M.; Chen, H. and Adams, J. (2009). Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate, *Global Ecology and Biogeography*, 18(3):280-290.