

شبیه‌سازی عددی غلظت ستونی گاز گلخانه‌ای CO₂ روی ایران: اعتبار

سنجی مدل WRF-GHG در برابر مشاهدات ماهواره گوست

سمیرا کرباسی^۱، حسین ملکوتی^{۲*}، عاطفه محمدی^۳

۱- دکتری هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان

۲- استاد، علوم و تکنولوژی محیط زیست، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان

۳- دکتری مهندسی صنایع، پژوهشکده هواشناسی

چکیده

به عنوان یکی از عوامل مهم گرمایش جهانی، غلظت CO₂ و تغییرات آن حساسیت‌هایی را در سراسر جهان برانگیخته است. ایجاد درک صریح از توزیع مکانی و زمانی غلظت CO₂ در مقیاس منطقه‌ای، یک چالش فنی حیاتی برای تحقیقات تغییرات آب و هوایی است. ضمن تدوین اطلاعات گسیل CO₂ از منابع مختلف، شبیه‌سازی عددی منطقه‌ای با تفکیک فضایی ۳۰ و ۱۰ کیلومتر از غلظت جوی CO₂، با استفاده از مدل تحقیقات آب و هوا و پیش‌بینی-شیمی (WRF-GHG) انجام شد. اطلاعات بازبازی شده از مشاهدات ماهواره گوست (GOSAT)، به عنوان اطلاعات کنترل دقت و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده در غلظت ستونی CO₂ استفاده گردید. عملکرد شبیه‌سازی‌ها در پیش‌بینی غلظت گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید (CO₂)، برای دوره مطالعاتی فوریه و اوت در سال ۲۰۱۰، نشان داد که تغییرپذیری مکانی و زمانی متغیرهای هواشناسی در مقایسه با مقادیر ایستگاه‌های دیده‌بانی سینوپتیکی، به خوبی با ضرایب همبستگی ۹۳٪-۷۶٪، ۴۷٪-۳۹٪ و ۵۲٪-۸۰٪ برای دما، باد و رطوبت نسبی، شبیه‌سازی شده است. مهمترین منابع گسیل CO₂ شامل، گسیل مصنوعی انسانی، گسیل زیست‌توده، گسیل آتش‌سوزی و گسیل اقیانوسی می‌باشد. در بین منابع گسیل غلظت ستونی CO₂، منابع انسانی، با مقدار (۳۸.۳۳ و ۲۳.۷۰) درصد در ماه فوریه و اوت بزرگترین سهم در گسیل این آلاینده را دارند. گسیل باپوژنیک، بعد از گسیل انسانی، با مقدار (۲۴.۰۸ و ۴۶.۶۴) درصد جذب و (۳۱.۸۱ و ۲۸.۶۴) در ماه فوریه و اوت بزرگترین سهم در تولید و جذب این آلاینده را دارند. گسیل آتش‌سوزی با مقدار (۵.۷۶ و ۲.۰۴) درصد و اقیانوسی با مقدار (۱.۰۶×۱۰^{-۶} و ۳.۲۳×۱۰^{-۶}) درصد برای آلاینده CO₂، به ترتیب در سومین و چهارمین رتبه در سهم گسیل کل CO₂ قرار دارند. از بررسی رفتار مقادیر میانگین ماهانه از میدان فرارفت، در هر دو ماه فوریه و اوت، روی ایران مشخص گردید که مقادیر ماکزیمم فرارفت CO₂ در ماه فوریه، شب هنگام تا اوایل صبح رخ داده است. نتایج ارزیابی، از خطای RMSE نشان دهنده این است که شبیه‌سازی‌های غلظت آلاینده مذکور، در ماه فوریه بهتر از ماه اوت عمل کرده است، به گونه‌ای که غلظت ستونی CO₂ در ماه فوریه (۰.۷۹ ppmv) کم‌برآورد شده است و ماه اوت (۰.۴۵ ppmv) بیش‌برآورد شده بود. این مطالعه نشان داد که مدل WRF-GHG قادر است به خوبی، بسیاری از ویژگی‌های مهم میدانهای متغیرهای جوی را در جنوب غربی آسیا (منطقه خاورمیانه-ایران) شبیه‌سازی نماید و استفاده از آن برای مطالعات آبی در این منطقه را اطمینان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: گرمایش جهانی، کربن‌دی‌اکسید (CO₂)، مدل WRF-GHG، ماهواره GOSAT، ایران

* نویسنده مسئول: هرمزگان، بندرعباس، کیلومتر نه جاده میناب، دانشگاه هرمزگان، دانشکده علوم و فنون دریایی، گروه علوم غیر زیستی

جوی و اقیانوسی، تلفن: (۰۷۶-۱۱-۳۳۷۱۱۰۰۰)

۱- مقدمه

توسعه سیاست‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مختلف کرده است (دایالو و همکاران، ۲۰۰۹).

اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی مختلفی برای مطالعه چرخه‌های جهانی گازهای جوی که نقش کلیدی بر اقلیم و اکولوژی جهانی و منطقه‌ای دارند، انجام گرفته‌اند. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها با وضوح بالا می‌تواند برای تخمین منابع انسانی، زیست‌زایی و چاهه برخی از گونه‌های شیمیایی در مقیاس شهری مورد استفاده قرار گیرد. این کارکرد بسیار مهم است، زیرا کلان‌شهرها اساساً ۷۰٪ از گسیل کربن-دی‌اکسید انسانی که مهمترین گاز گلخانه‌ای بشمار می‌رود را در چند دهه گذشته تامین کرده‌اند (IPCC, ۲۰۰۷; IEA, ۲۰۲۰). رویکردهای متفاوتی برای تخمین گسیل‌های انسانی CO₂ و سایر گازهای گلخانه‌ای در بسیاری از کشورها برای اطمینان از انطباق آنها با معاهدات مربوط به کاهش گسیل گازهای گلخانه‌ای اعمال می‌شود. علاوه بر کنترل گسیل گازهای گلخانه‌ای از قلمرو یک شهر، برآورد گسیل گازهای گلخانه‌ای بصورت یکپارچه اهمیت بسزایی دارد. در چند سال گذشته برای مناطق شهری خاص (به عنوان مثال، مطالعه تیموفیف و همکاران، ۲۰۲۰) مطالعات زیاد مدل‌سازی و مدل‌سازی معکوس گسیل CO₂ انسانی از مناطق شهرهای بزرگ و کلان-شهرها انجام شده است. به عنوان مثال، در مطالعات (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷; Viatte و همکاران، ۲۰۱۷; ماکاروا و همکاران، ۲۰۲۱)، دیدگاه‌هایی در مورد استفاده از تکنیک ستون دیفرانسیل برای برآورد گسیل‌های انسانی بر اساس اندازه‌گیری‌های دقیق از راه دور زمینی و مدل‌سازی پخش شیمیایی ارائه شده است.

هدف مطالعه حاضر، ایجاد یک توصیف و تحلیل جامع از گسیل CO₂ و مقادیر ستونی غلظت آن روی منطقه ایران است. برای به دست آوردن بینش بیشتر در مورد عواملی که بر غلظت‌های مشاهده شده تأثیر می‌گذارند، به شبیه‌سازی‌های با استفاده از مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا، همراه با شیمی WRF-Chem (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۲۱)، درگزینه

گازهای گلخانه‌ای اصلی مانند دی‌اکسید کربن (CO₂) و متان (CH₄) تأثیر مستقیمی بر تعادل تابشی جو دارند. آنها محرک اصلی تغییر آب و هوا هستند، زیرا میانگین غلظت جهانی آنها در طول دوره صنعتی حدود ۴۷٪ و ۱۵۶٪ به ترتیب برای CO₂ و CH₄، در نتیجه فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است (IPCC, ۲۰۲۱).

اهمیت این گازها که از این پس به آنها گازهای گلخانه‌ای (GHGs) گفته می‌شود، ایجاد شبکه‌های رصد جهانی برای نظارت بر روند و تغییرپذیری آنها را ضروری کرده بود. شبکه‌های سنجش از دور زمینی مانند شبکه تشخیص تغییر ترکیب اتمسفر^۱ (NDACC) و شبکه مشاهده ستون کل کربن^۲ (TCCON) به دلیل بازه زمانی طولانی مشاهدات ستونی دقیق، خود مورد استفاده و استقبال محققین می‌باشند (د مازیر و همکاران ۲۰۱۸؛ وانچ و همکاران، ۲۰۱۱).

اندازه‌گیری‌های شبکه‌های مشاهداتی طیف‌سنج فرسرخ تبدیل فوریه^۳ (FTIR)، از نور مستقیم خورشید برای اندازه‌گیری جذب گازهای کیمیا جوی در امتداد خط دید استفاده می‌کند و اطلاعات دقیقی در مورد فراوانی کل ستون یا مشخصات عمودی گازهای گلخانه‌ای و سایر گونه‌ها ارائه می‌دهد. مجموعه این مشاهدات، توسط دانشمندان در سراسر جهان برای تشخیص تغییرات در ترکیب جو، برای بهبود درک ما از چرخه کربن و با ارائه اعتبار برای اندازه‌گیری‌های مبتنی بر فضا استفاده می‌شوند. اخیراً، از طیف‌سنج‌های متحرک FTIR کم‌هزینه در شبکه مشاهده‌کننده ستون کربن اشتراکی^۴ (COCCON) برای معتبر کردن شارها در مناطق شهری استفاده شده است (Hase et al., 2015; Vogel et al., 2019; Makarova et al., 2021).

علاوه بر مشاهدات FTIR، مشاهدات در محل سطحی این گازها برای مدیریت بهتر چشمه و چاهه در مقیاس کوچکتر انجام می‌شود. هر دو نوع مشاهده حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد گسیل و پخش جوی این گونه‌ها هستند و مکمل یکدیگر می‌باشند. ضرورت تخمین گسیل گازهای گلخانه‌ای با استفاده از رویکردهای مستقل، دانشمندان را تشویق به

³ Fourier transform infrared

⁴ Collaborative Carbon Column Observing Network

¹ Network for the Detection of Atmospheric Composition Change

² Total Carbon Column Observing Network

GHG روی منطقه چه میزان است؟ (۲) مقادیر گسیل ناشی از مشارکت‌های منابع مختلف تولید گاز گلخانه‌ای CO₂ (انسان زایی، زیست توده، آتش‌سوزی زیست توده و شارهای اقیانوسی) چقدر است؟ و (۳) نقش ایران با توجه به مقادیر غلظت ستونی و پخش جوی در تولید CO₂ چگونه است. ساختار این مقاله به شرح زیر است. بخش ۲ مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه را شرح می‌دهد. جزئیات در پیکربندی مدل و موجودی‌های ورودی در بخش ۳ توضیح داده شده است. بخش ۴ بخش اصلی این کار را تشکیل می‌دهد. در ابتدا، عملکرد مدل با توجه به میدان‌های هواشناسی سطح در بخش ۱.۴ ارزیابی می‌شود. سپس عملکرد مدل در شبیه‌سازی میدان‌های شیمیایی جو و تجزیه و تحلیل آن‌ها در بخش ۲.۴ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بررسی اثرات انتقال و فرارفت ستونی CO₂ روی ایران و منطقه در بخش ۳.۴ بیان می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۵ آورده شده است.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، کشور ایران است که در جنوب غربی آسیا واقع شده است و دارای جغرافیای بسیار متنوعی است. ایران، دومین کشور بزرگ خاورمیانه می‌باشد. قرارگیری ایران بین عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی، در جنوب منطقه معتدل نیمکره شمالی و همچنین در طول ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی واقع شده است که به تنوع آب و هوا در آن منجر شده است. اقلیم‌های معتدل و مرطوب در سواحل جنوبی و دریای خزر، اقلیم سرد در کوهستان‌های غرب، اقلیم گرم و خشک در فلات مرکزی و اقلیم گرم و مرطوب سواحل جنوبی آن را پوشش می‌دهد (Fao, ۲۰۱۵). منابع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و متان در ایران بخش‌های مختلف تولید و مصرف انرژی (فرایندهای صنعت، انرژی، کشاورزی و دامداری و جنگلداری، پسماند و غیره) می‌باشند.

ردیاب غیرفعال^۱ آن به نام WRF-GHG (بک و همکاران، ۲۰۱۳) پرداخته می‌شود. این مدل جوی منطقه‌ای، میدان‌های ۴ بعدی از ردیاب‌های CO₂، CH₄ و CO را شبیه‌سازی می‌کند، که غلظت آن‌ها در منطقه مورد مطالعه ناشی از وجود چشمه‌ها، چاهک‌ها و پخش جوی آن‌ها در وردسپهر، بدون تعامل با گونه‌های دیگر است و میدان‌های متغیرهای هواشناسی را نیز در نظر می‌گیرد. این مدل جداسازی هر ترکیب شیمیایی را به چندین ردیاب که نشان‌دهنده مشارکت منابع گسیل مختلف در حوزه شبیه‌سازی، مانند گسیل انسان‌زایی^۲، زیست‌توده^۲، آتش‌سوزی و اقیانوسی است، ممکن می‌سازد. علاوه بر این، از محاسبه آنالین شارهای CO₂ زیست‌توده و به دنبال آن مدل فوتوستز و تنفس گیاهی VPRM را نیز بحساب می‌آورد (ماه‌ادوان و همکاران، ۲۰۰۸). تا کنون، کاربردهای WRF-GHG عمدتاً بر روی مطالعه گسیل و پخش جوی CO₂ شهری متمرکز شده است (بیلائی و همکاران، ۲۰۱۶؛ فنگ و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۶؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۹).

و یا از این مدل عددی برای ارزیابی مدل VPRM در ترکیب با مشاهدات درجا و ستونی، برج‌های اندازه‌گیری شار CO₂ و اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای برای درک بهتر چرخه کربن استفاده شده است (احمدوف و همکاران، ۲۰۰۷؛ جمر و نسان، دایالو و همکاران، ۲۰۱۸؛ هو و همکاران، ۲۰۲۰؛ پارک و همکاران، ۲۰۲۰) نتایج همه مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که این مدل یک ابزار توانمند برای مطالعه بودجه‌های کربن منطقه‌ای است. بنابراین این ابزار برای شبیه‌سازی منطقه‌ای در صورت وجود مطالعات پایدار مناسب است. از این رو، هدف این کار ارزیابی عملکرد مدل برای گازهای گلخانه‌ای کلیدی CO₂ در منطقه‌ای مورد مطالعه است. پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل در هر منطقه، ممکن است به طور بالقوه توجه را به کاستی‌های شبیه‌سازی‌ها جلب کند، بنابراین به جامعه مطالعاتی این اجازه و انگیزه را می‌دهد تا آن را بهبود بخشند. این مقاله بر روی عواملی تمرکز می‌کند که بر غلظت گازهای GHG مشاهده‌شده و تغییرات آن‌ها در ایران تأثیر می‌گذارند و به طور خاص، به سؤالات زیر می‌پردازد: (۱) دقت شبیه‌سازی عددی از مقادیر ستون CO₂ با استفاده از مدل WRF-

³ Biogenic Emission

¹ Passive

² Anthropogenic Emission

ش (پارکر و همکاران، ۲۰۱۱؛ یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹؛ گرلت و همکاران، ۲۰۱۳). پروژه گوست تلاش مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط زیست (MOE) و انجمن ملی مطالعات محیط زیست (NIES) ژاپن است (میائو و همکاران، ۲۰۱۳)^۲ (شکل ۱). هدف اصلی از اجرای پروژه گوست، برآورد گسیل و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه قاره‌ای (چند هزار کیلومتر) با دقت بیشتر و همچنین کمک به ارزیابی تعادل جهانی و منطقه‌ای اکوسیستم زمین است. از طریق آنالیز داده‌های گوست، دانشمندان دانش جدیدی در توزیع جهانی و تغییرات زمانی گازهای گلخانه‌ای، همچنین چرخه جهانی کربن و تاثیرات آن بر آب و هوا کسب می‌کنند. یافته‌های جدید از پردازش بلند مدت اطلاعات مشاهدتی GOSAT، برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی آینده و ارزیابی تاثیرات آن استفاده خواهد شد. مشخصات فیزیکی و کلی سنجنده گوست در مطالعه (Yokota et al., 2009) آورده شده است.

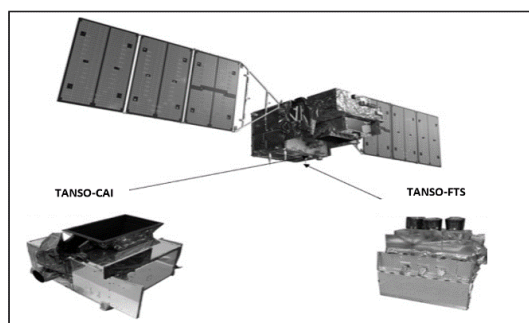
۲-۲ مشاهدات هواشناسی

برای بررسی، ارزیابی و کمی‌سازی اعتبار میدان‌های هواشناسی شبیه‌سازی شده بوسیله WRF-GHG، از مجموعه مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی استفاده گردید. بدین منظور دمای ۲ متری، سرعت باد تراز ۱۰ متر و رطوبت نسبی تراز ۲ متری از سطح زمین، شبیه‌سازی شده بوسیله WRF-GHG. با مجموعه مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی، ۱۰ ایستگاه منتخب از ایستگاه‌های همدیدی مراکز استان (تهران، مشهد، اهواز، ارومیه، تبریز، رشت، اراک، بندرعباس، اصفهان و شیراز) با پراکندگی مناسب انتخاب گردیدند. با استفاده از روش‌های آماری اعتبارسنجی هواشناسی در بازه زمانی فوریه تا ۲۸ فوریه و ۱۱ اوت تا ۳۱ اوت سال ۲۰۱۰، عملکرد شبیه‌سازی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۳ مشاهدات ماهواره‌ای

۲-۳-۱ ماهواره GOSAT

ماهواره مشاهده کننده گازهای گلخانه‌ای GOSAT^۱ (ایبوکی) در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ در جزیره تانگاشیما ژاپن به فضا پرتاب



شکل ۱- ماهواره گوست (Yokota et al., 2009)

² Ru Miao, Multi-Year Comparison of Carbon Dioxide from Satellite Data with Ground-Based FTS Measurements (2003–2011), *Remote Sensing* 5 (7):3431-3456 · July 2013.

¹ Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT, or 'IBUKI')

۳-۲ مشاهدات ماهواره‌ای

۱-۳-۲ ماهواره GOSAT

ماهواره مشاهده کننده گازهای گلخانه‌ای GOSAT^۱ (ایبوک) در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ در جزیره تانگاشیمای ژاپن به فضا پرتاب شد (پارکر و همکاران، ۲۰۱۱؛ یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹؛ گرلت و همکاران، ۲۰۱۳). پروژه گوست تلاش مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط زیست (MOE) و انجمن ملی مطالعات محیط زیست (NIES) ژاپن است (میائو و همکاران، ۲۰۱۳)^۲ (شکل ۱). هدف اصلی از اجرای پروژه گوست، برآورد گسیل و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه قاره‌ای (چند هزار کیلومتر) با دقت بیشتر و همچنین کمک به ارزیابی تعادل جهانی و منطقه‌ای اکوسیستم زمین است. از طریق آنالیز داده‌های گوست، دانشمندان دانش جدیدی در توزیع جهانی و تغییرات زمانی گازهای گلخانه‌ای، همچنین چرخه جهانی کربن و تاثیرات آن بر آب و هوا کسب می‌کنند. یافته‌های جدید از پردازش بلند مدت اطلاعات مشاهده‌ای GOSAT، برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی آینده و ارزیابی تاثیرات آن استفاده خواهد شد. مشخصات فیزیکی و کلی سنجنده گوست در مطالعه (Yokota et al., 2009) آورده شده است.

این ماهواره اولین ماهواره در دنیا است که به طور خاص برای اندازه‌گیری‌های همزمان غلظت گازهای گلخانه‌ای دی-اکسیدکربن، متان با اندازه‌گیری هر دو تابش^۳ TIR و^۴ SWIR طراحی شده است. این ماهواره، مجهز به دو حسگر طیف سنج تبدیل فوری حرارتی و مادون قرمز نزدیک، برای مشاهده کربن (TANSO-FTS^۵) و حسگر تصویربرداری ابر و آبروسل (TANSO-CAI^۶) می‌باشد.

الگوریتم NIES، مسئول اعتبارسنجی و توسعه الگوریتم‌هایی برای بازیابی میانگین ستون‌های کربن‌دی‌اکسید و متان از داده‌های سطح ۱ است. بعد از اعتبارسنجی‌های انجام شده به

وسیله پایگاه‌های مشاهداتی زمینی و هواپیما، داده‌های سطح ۲ (level 2) تولید می‌شود (میائو و همکاران، ۲۰۱۳). عدم قطعیت ستون‌های بازیابی شده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای گوست، در بیشتر موارد کمتر از یک درصد است (پوشیدا و همکاران، ۲۰۱۱). داده‌های تولید شده از داده‌های خام گوست توسط الگوریتم NIES که از اعتبار بهتری برخوردار است، بازیابی می‌شوند. (کرباسی و همکاران، ۲۰۲۲). اطلاعات داده‌های غلظت گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید در بازه‌های زمانی روزانه و میانگین در وبگاه <https://data2.gosat.nies.go.jp/GosatDataArchive> (Service) در دسترس عموم قرار دارد.

۲-۳-۲ مشاهدات ماهواره‌ای برای

اعتبارسنجی شیمیایی

ارزیابی اخیر عملکرد الگوریتم‌های بازیابی NIES، ACOS و 7Remo Tec برای مشاهدات پایه ماهواره گوست، بر روی منطقه عرض میانه (بین عرض‌های جغرافیایی ۰ و ۷۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۷۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب شرقی و غربی)، نشان از برتری کیفی الگوریتم‌های بازیابی NIES داشت (کرباسی و همکاران، ۲۰۲۲). بر همین اساس، در این مطالعه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های WRF_GHG و بررسی آماری غلظت ستونی گازهای گلخانه‌ای مورد نظر (CO₂)، در نقاطی که شامل داده‌های سنجنش از دور (داده‌های سنجنده گوست) می‌باشد، از مجموعه محصولات سطح ۲ تولید شده توسط الگوریتم NIES، استفاده گردید. شبیه‌سازی‌ها برای ماه‌های فوریه و اوت انجام می‌شود که نمایانگر ماه‌هایی با شرایط آب و هوایی خشک و تا حدودی مرطوب است تنظیم گردید. ارزیابی‌ها نیز در بازه زمانی ا تا ۲۸ فوریه ۲۰۱۰ و ا تا ۳۱ اوت ۲۰۱۰ انجام می‌شود.

زمان گذر محلی ماهواره گوست ۱۳:۰۰-۹:۰۰ است، بنابراین غلظت شبیه‌سازی شده WRF-GHG برای این زمان در تجزیه و تحلیل استفاده شده است. از آنجا که

^۵ Thermal and Near-infrared Sensor for Carbon Observation Fourier Transform Spectrometer

^۶ Cloud and Aerosol Imager

^۷ SRFP (the proxy and full-physics ... SRON/KIT's RemoTeC algorithm)

^۱ Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT, or 'IBUKI')

^۲ Ru Miao, Multi-Year Comparison of Carbon Dioxide from Satellite Data with Ground-Based FTS Measurements (2003-2011), *Remote Sensing* 5 (7):3431-3456 · July 2013.

^۳ Thermal infrared

^۴ Shortwave infrared

۲-۴-۲ معرفی داده‌های گسیل^{۱۵} جهانی

WRF-GHG

گسیل گازهای گلخانه‌ای ناشی از منابع مختلف گسیل انسان ساخت^{۱۶}، زیست توده^{۱۷}، آتش‌سوزی زیست توده^{۱۸}، تالاب^{۱۹} و اقیانوس^{۲۰}، با دقت مناسب به مدل WRF-GHG معرفی گردید. در این بخش توضیح مختصری از روش‌های پارامترسازی و موجودی‌های گسیل استفاده شده برای محاسبه شار CO₂ که سپس به WRF-GHG ارائه شدند معرفی می‌شود.

• گسیل انسانی

برای گسیل گازهای گلخانه‌ای انسان ساخت از بین داده‌های جهانی گسیل انسان-ساخت مانند REAS, RETRO, EDGAR, NEI, و غیره، با توجه به موجود بودن داده‌ها در منطقه مورد نظر و بازه زمانی مطالعه، از موجودی جهانی گسیل EDGAR استفاده شده است. موجودی گسیل EDGARv5.0، شامل سه گاز اصلی گلخانه‌ای (CO₂, CH₄ و N₂O) در هر بخش و کشور می‌باشد و در وبگاه رسمی (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>) با وضوح ۰.۱ در ۰.۱ درجه و در سطح جهانی برای گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂, CH₄ و سایر گازهای ردیاب برای سال‌های ۱۹۷۰-۲۰۱۵ به صورت سالانه در دسترس است. گسیل‌های محاسبه شده با استفاده از الگوریتم به کار گرفته شده در شبکه شبه‌سازی مورد نظر (WRF-GHG) درون‌یابی زمانی و مکانی می‌شود و برای ارائه به مدل یکپارچه‌سازی می‌گردد.

GOSAT_(XCO₂) را به عنوان میانگین ستون نسبت‌های آمیختگی اندازه‌گیری می‌کند، مقادیر غلظت شبه‌سازی شده WRF-GHG نیز به میانگین ستونی تبدیل گردیده است.

۲-۴-۳ معرفی داده‌های اولیه هواشناسی و گسیل

جهانی WRF-GHG

۲-۴-۱ معرفی داده‌های اولیه و مرزی

هواشناسی شبه‌سازی

داده‌های هواشناسی مورد نظر در (ارتفاع ژئوپتانسیل^۱، رطوبت ویژه^۲، رطوبت نسبی^۳، دما^۴، مولفه مداری باد^۵ و مولفه نصف النهاری باد^۶) سه بعد و در دو بعد (فشار سطح^۷، فشار متوسط سطح دریا^۸، دمای سطح^۹، درجه حرارت دو متری^{۱۰}، رطوبت نسبی^{۱۱}، سرعت باد مداری و نصف النهاری باد ۱۰ متری^{۱۲} و داده‌های ارتفاع خاک^{۱۳}، دما و رطوبت خاک در لایه‌های موجود برای استفاده به عنوان شرایط اولیه و مرزی از پایگاه داده‌های^{۱۴} ECMWF_ERA5 به مدل WR-GHG معرفی شده است. این داده‌های بازتحلیل شده مدل جوی نسخه ۱ در ۳۸ سطح ترکیبی با وضوح افقی ۰.۲۸ درجه هستند و دارای وضوح زمانی ۶ ساعت بودند. ERA5 تخمین‌های ساعتی از تعداد زیادی از متغیرهای اقلیمی، زمینی و اقیانوسی را ارائه می‌دهد. داده‌های مربوط به سطح زمین را در یک شبکه با تفکیک حدود ۳۲ کیلومتر فراهم نموده است و با استفاده از ۱۳۷ تراز از سطح زمین تا ارتفاع ۸۰ کیلومتر، جو را پوشش می‌دهد (بالا، ۲۰۱۲).

¹² 10-meter U and V components of wind

¹³ Soil data (temperature and moisture) and soil height

¹⁴

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

¹⁵ Emission input

¹⁶ Anthropogenic Emission

¹⁷ Biogenic Emission

¹⁸ Biomass burning Emission

¹⁹ Wetlands Emission

²⁰ Ocean Emission

¹ geopotential

² relative humidity

³ specific humidity

⁴ temperature

⁵ u_component_of_wind

⁶ v_component_of_wind

⁷ Surface Pressure

⁸ Mean Sea Level Pressure

⁹ Skin Temperature/SST

¹⁰ 2-meter Temperature

¹¹ 2-meter Relative or Specific Humidity

• گسیل زیست‌کره

مطالعات پوشش جهانی کاربری‌های اراضی تاثیرگذار به منظور درک عمده‌ترین متغیرهای تبادل خالص گسیل زیست‌کره - جو و تعیین مقدار تبادلات بین جو و بیوسفر صورت گرفته است. به منظور معرفی گسیل CO₂ زیست‌کره (مبادله خالص زیست‌کره و جو) از مجموعه داده‌های NEE-CRUNCEP_V1 با تفکیک مکانی ۰.۵ در ۰.۵ درجه استفاده شده است (ترامونتانا و همکاران، ۲۰۱۶) و سپس با تفکیک مدل یکپارچه‌سازی شده است.

• گسیل آتش‌سوزی

آتش یک فرآیند پیچیده بیوفیزیکی با تأثیرات متعدد مستقیم و غیرمستقیم بر جو، بیوسفر (زیست‌کره) و هیدروسفر (آب کره) می‌باشد. گسیل گازهای ردیاب و ذرات معلق در هوا حاصل از سوختن زیست توده (bio mass burning) بصورت روزانه با استفاده از سیاهه گسیل آتش سوزی GFAS^۱ محاسبه گردید. مشاهدات FRP که در حال حاضر در GFAS دریافت شده‌اند، از محصولات تولید شده در ناسا Terra MODIS و Aqua MODIS در زمینه آتش فعال هستند. حوزه داده‌های موجود، جهانی است و وضوح مکانی آن ۰.۱ درجه می‌باشد. اطلاعات در دسترس دوره سال‌های ۲۰۰۳ تا به امروز را پوشش می‌دهد.

• گسیل اقیانوس

شار اقیانوسی CO₂ نیز می‌تواند به WRF-GHG معرفی شود. شار CO₂ اقیانوس را می‌توان در شبکه ۵۰ × ۴۰ از مجموعه داده‌های جهانی از پایگاه داده CarboScope بارگیری کرد (تاکاهاشی و همکاران، ۲۰۰۹). تخمین شار CO₂ در این مجموعه بر اساس انواع مختلف اندازه‌گیری،

نسبت‌های آمیختگی CO₂ جو، فشار جزئی CO₂ سطح اقیانوسی ارائه می‌شود.

۲-۴-۳ شرایط اولیه میدان‌های شیمیایی

شرایط اولیه و مرزی برای میدان شیمیایی در-WRF GHG از داده‌های بازتحلیل سرویس نظارت جو (CAMS^۲ data) با وضوح مکانی ۰.۸ درجه در ۱۳۷ تراز قائم و با وضوح زمانی ۶ ساعته استفاده شده است (۳ آگوستی پاناردا و همکاران، ۲۰۱۷). این میدان‌های جهانی غلظت با استفاده از روال درون یابی، به شبکه WRF-GHG ارائه می‌شوند و به عنوان مقادیر پس‌زمینه از کل غلظت‌های CO₂، یعنی متغیرهای ردیاب CO₂، استفاده می‌شوند (احمدوف و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۵ مدل WRF-GHG

در این بخش، یک نمای کلی از مدل عددی WRF-GHG، مدل جهانی TM3^۴، تنظیمات و پیکربندی مدل و مجموعه داده‌های مورد استفاده به عنوان شرایط اولیه و مرزی مدل ارائه می‌شود.

۲-۵-۱ تنظیمات و پیکربندی مدل

انتخاب تنظیمات مورد استفاده می‌تواند تأثیرات معنی‌دار روی کیفیت شبیه‌سازی عددی و بر خروجی مدل داشته باشد که اغلب منجر به تغییرات بایاس می‌شود

(میسینیس و ژانگ، ۲۰۱۰). با توجه به تعداد زیاد طرحواره‌های معرفی شده برای WRF، در این بخش، بر روی طرحواره‌هایی که برای تحقیق با WRF-GHG در این مطالعه استفاده می‌شوند، تمرکز شده است. در این مطالعه از مدل تحقیقات آب و هوا و پیش بینی / شیمی-WRF (Chem نسخه ۳.۹.۱ استفاده شده است. این مدل تنها مبتنی

^۳ <https://atmosphere.copernicus.eu>

^۴ The Global Atmospheric Tracer Model TM3

^۱ Global Fire Assimilation System

^۲ Copernicus Atmosphere Monitoring Service

بر میداین هواشناسی تعیین شده نیست، و رفتار شیمیایی جو در ماژول‌های شیمی به‌مراه برهمکنش جوی، پخش جوی، تولید گازهای گلخانه‌ای، رسوب خشک و تر و شیمی فاز گاز را شبیه‌سازی می‌کند (گرل و همکاران، ۲۰۰۵).

حوزه مورد نظر از دو دامنه (تو در تو) که ابعاد آن‌ها دارای نقاط شبکه افقی ۱۷۳×۱۲۴ و ۲۲۲×۲۱۳ با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر برای دامنه بیرونی (d01) و ۱۰ کیلومتر برای دامنه دوم (d02) می‌باشد، که به ترتیب منطقه خاورمیانه و ایران را پوشش می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲- حوزه مطالعاتی مورد استفاده در شبه‌سازی WRF_GHG

جزئیات اصلی مربوط به تنظیمات، پیکربندی مدل WRF-GHG، برای هر دو دامنه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پیکربندی مدل WRF_GHG و شبه‌سازی‌های عددی انجام شده (BALLAV, 2012)

WSM 3-class (Hong, Dudhia and Chen (2004, MWR))	میکروفیزیک
Long Wave: RRTM (Mlawer et al., (1997, JGR)) – Short Wave: Dudhia scheme (Dudhia (1989, JAS))	تابش
Mellor-Yamada-Janjic (Janjic (1994, MWR))	لایه مرزی
Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001)	مدل سطح
Monin-Obukhov (Janjic) scheme (Monin and Obukhov 1954)	لایه سطح
Grell-Freitas ensemble scheme (Grell and Devenyi, 2002)	فیزیک ابر
Greenhouse Gas tracer emissions	شیمی
CAMS (0.8°), ERA5 (0.25°)	شرایط اولیه و مرزی
2010-02-01_00:00 to 2010-02-28_00:00 and 2010-08-01_00:00 to 2010-08-31_00:00	دوره زمانی
d01: 30km (173 × 124) d02: 10km (222 × 213)	تفکیک افقی (نقاط شبکه)
d01: 180s, d02: 60s	گام زمانی

فرارفت مهمترین مؤلفه فرایند پخشی آلاینده‌ها در جو است. اصطلاح فرارفت افقی، به گرادیان دوبعدی افقی غلظت آلاینده بستگی دارد که برآورد آن به میزان اندازه‌گیری یا شبیه‌سازی غلظت نیاز دارد. اثرات فرارفت بر میدان غلظت ترکیبات شیمیایی جو نظیر گازهای گلخانه‌ای، ناشی از واداشت دوربرد نیز باید در نظر گرفته شود. انتظار می‌رود که توزیع سه‌بعدی غلظت بین دو نقطه در شرایط وزش باد، در کمی‌کردن اثرات انتقال‌های آلاینده‌ها و متعاقباً میزان غلظت آلاینده‌ها در منطقه تاثیرگذار باشد. گردش‌های محلی و منطقه‌ای نیز نقش بسزایی در انتقال، گاه‌ها ماندگاری و بازگردش آلودگی در مقیاس‌های محلی تا منطقه‌ای دارند. تلاطم در لایه مرزی جو باعث انتقال‌های تلاطمی و پخش جوی در راستای قائم می‌شود و در ساختار قائم غلظت لایه مرزی را مدیریت می‌کند.

۲-۶ پارامترهای ارزیابی آماری

مقادیر متناظر زمانی و مکانی شبیه‌سازی‌های متغیرهای جوی و شیمیایی استخراج می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با استفاده از روش‌های آماری مختلف مقایسه کرد. این فرآیند برای داده‌های ماه خشک و مرطوب به صورت جداگانه انجام می‌شود. معیارهای آماری مختلفی را برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی و کمی‌سازی خطاها در متغیرهای هواشناسی و شیمیایی در نظر گرفته می‌شود. به عنوان نمونه، این معیارها شامل خطای میانگین بایاس (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای میانگین مربع ریشه (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) می‌شوند.

۲-۷ پخش جوی منطقه‌ای

Local tendency of u -Horizontal MFC -Vertical MFC Sources and sinks

۲-۷-۱ بیان فیزیکی فرارفت

معادله همگرایی شار غلظت (CFC)^۱ گازهای گلخانه‌ای، با استفاده از قانون بقای غلظت در مختصات فشاری (p) را به صورت معادله زیر می‌توان نوشت:

$$\hat{i} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) + \hat{j} \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (۴)$$

$$\text{and } V_h = (u, v)$$

$$\hat{k} \left(\frac{\partial}{\partial p} \right) \text{ and } w_h = (w)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial p} \quad (۱)$$

در این معادله u ، v و w نشان‌دهنده مولفه‌های سرعت باد در راستای مدار، نصف النهار و قائم در دستگاه مختصات سه بعدی فشاری هستند و q بیانگر غلظت آلاینده مورد نظر (CO₂) می‌باشد. S نشان‌دهنده مقدار خالص تمایل غلظت است که تفاوت بین چشمه و چاهک غلظت آلاینده را به دنبال حرکت بسته هوا بیان می‌کند. در اینجا S را معمولاً به شکل E-C در نظر می‌گیرند، جایی که E و C به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش غلظت می‌باشد.

به طور خاص، (۳) بودجه غلظت یک بسته هوایی را بیان می‌کند، که در آن شرایط، شامل نرخ محلی تغییر q ، واگرایی شار غلظت افقی (منفی CFC افقی)، واگرایی قائم شار غلظت (منفی CFC قائم) است، و شرایط غلظت چشمه و چاهک (به طور خاص، نرخ افزایش و جذب) می‌باشد.

با توجه به خاصیت برداری CFC^۳ افقی، (اغلب به سادگی به عنوان همگرایی افقی و قائم غلظت در علم پیش بینی نامیده می‌شود) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

از معادله بقای جرم و با اضافه کردن صفر به دو طرف معادله (۱)، معادله شار بسط داده می‌شود و به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$CFC = -\nabla \cdot (qV_h) \quad (۴)$$

$$= -V_h \cdot \nabla q - q \nabla \cdot V_h$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial p} = 0$$

$$CFC = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} \quad (۵)$$

$$- q \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Horizontal advection term

$$- q \left(\frac{\partial w}{\partial p} \right)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial p} \quad (۲)$$

$$+ q \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$= E - P$$

Vertical advection term (Convergence term)

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (qu) + \frac{\partial}{\partial y} (qv) + \frac{\partial}{\partial p} (qw) \quad (۳)$$

$$= E - P$$

در معادله (۵)، عبارت فرارفت نشان دهنده مجموع فرارفت افقی و قائم غلظت است، در حالی که عبارت همگرایی،

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (qV_h) + \frac{\partial}{\partial p} (qw) = E - P$$

^۳ اگرچه اصطلاحات ریاضی در معادله (۴) به عنوان منفی واگرایی شار غلظت اشاره می‌کند، در این مطالعه ما از روش عملیاتی رایج پیروی می‌کنیم و معادله (۴) را به عنوان همگرایی شار غلظت در نظر می‌گیریم.

^۱ Concentration Flux Convergence

^۲ Source and Sink

(WS^3) ، که در ۱۰ ایستگاه مشاهداتی با تفکیک زمانی در دسترس هستند. نتایج پارامترهای ارزیابی ذکر شده در جدول ۲ برای دو بازه سرد (فوریه) و گرم (اوت) و ارائه شده است. پارامترهای آماری نشان می‌دهد که میدان‌های جوی و تغییرات روزانه آن‌ها به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند (شکل ۳). مقادیر مشاهدات و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که دما و رطوبت از زمستان به تابستان افزایش می‌یابد. با این حال، برخی از تفاوت‌ها بین مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی و مشاهدات در هر فصل قابل مشاهده است. این تفاوت‌ها در زمستان بیشتر نمایان می‌شود.

میانگین خطای انحراف، (MBE) کلی در دمای شبیه‌سازی شده در تمام ایستگاه‌ها ($0.5^\circ C$)، است و نشان می‌دهد که دما شبیه‌سازی شده کمتر از مشاهدات است. این مورد، ممکن است به دلیل استفاده از طرحواره محلی به کار رفته در لایه مرزی (MYJ PBL) باشد. این طرحواره لایه مرزی، در مدل اختلاط موضعی بیشتری می‌کند، که تا حدی منجر به پایین آمدن درجه حرارت در نزدیکی سطح می‌شود (هو و همکاران، ۲۰۱۰). از ارزیابی‌ها دریافتیم که دمای شبیه‌سازی شده دومتري، مقادیر R^2 برای هر دو فصل، در همه ایستگاه‌های مشاهداتی مقادیر معقولی به خود اختصاص داده است. اگر از ایستگاه مشهد در زمستان چشم‌پوشی شود، مقادیر همبستگی دمای دو متری، بین ۰.۸۵ تا ۰.۹۶ و ۰.۷۰ تا ۰.۸۹ به ترتیب در اوت و فوریه متغیر است. همبستگی پایین تر در زمستان را می‌توان تا حدودی به تعداد کمتر داده‌های موجود ثبت شده مشاهداتی در این فصل نسبت داد. مقادیر خطای RMSE در ماه اوت و فوریه به ترتیب، به طور میانگین ۲.۳۷ و ۳.۸۶ می‌باشد. اختلافات بزرگ در میزان RMSE دمای سطح می‌تواند ناشی از عدم اطمینان در پارامترسازی فیزیک سطح، و متغیرهای سطح زمین در مدل به دلیل وضوح درشت (۳۰ کیلومتر) باشد (کومار، ۲۰۱۲).

حاصلضرب غلظت و همگرایی جرم را نشان می‌دهد. این اصطلاح در سراسر این مقاله استفاده می‌شود. و در ادامه محاسبه فرارفت افقی و قائم غلظت گاز CO_2 پرداخته شده است:

$$CFC_h = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} \quad (6)$$

Horizontal advection term

$$CFC_v = -q \left(\frac{\partial w}{\partial p} \right)$$

Vertical convergence term

تجزیه و تحلیل پخش جوی بر اساس معادله اخیر است، همان‌طور که ذکر شد، CFC را می‌توان به صورت مجموع دو جمله نوشت: جمله‌های فرارفت و همگرایی.

۳- نتایج

۳-۱- راستی آزمایی شبیه‌سازی‌های عددی

مقادیر متناظر زمانی و مکانی مشاهدات ماهواره GOSAT از شبیه‌سازی‌های متغیرهای جوی و شیمیایی استخراج گردیدند و آن‌ها را با استفاده از روش‌های آماری مختلف مقایسه کردیم. این فرآیند برای داده‌های ماه خشک و مرطوب انجام گردید.

۳-۱-۱- راستی آزمایی شبیه‌سازی جوی

بخشی از خطاها در شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها مربوط به عدم قطعیت در میدان‌های شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی جوی می‌باشد. برای اعتبارسنجی هواشناسی در شبیه‌سازی CO_2 جو، سه متغیر اصلی هواشناسی در نظر گرفتیم. یعنی دمای هوا (AT^1)، رطوبت نسبی (RH^2) و سرعت باد

³ Wind Speed

¹ Air Temperature

² Relative Humidity

خطاها در دمای شبه‌سازی شده می‌توانند با تأثیر بر گسیل-های بیوژنیک، شیمی‌فاز گاز، تقسیم بندی گاز / ذرات از ترکیبات آلی نیمه فرار، رسوب خشک آلاینده‌ها از طریق طرح تبادل سطح، برشبییه‌سازی‌های شیمی جوی تأثیر بگذارند. پس از دما، رطوبت نسبی، بهترین مقادیر همبستگی (r) را دارد. مقادیر همبستگی در طول فوریه، کمتر از اوت، دیده می‌شود و احتمالاً به دلیل تنوع فضایی رطوبت، به دلیل وسعت دامنه و تنوع آب و هوایی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همبستگی در طول هر دوماه، سرد و گرم، از ۰.۲۵ تا ۰.۸۸ متغیر است. میانگین خطای بایاس برای رطوبت نسبی با صرف نظر کردن از ایستگاه تهران در تابستان و بندرعباس در زمستان، به ترتیب ۲.۶- و ۴.۲- می‌باشد.

جدول ۲- ارزیابی و کمی‌سازی اعتبار میدان‌های هواشناسی، شبه‌سازی شده بوسیله مدل عددی WRF-GHG، از دمای ۲ متری، سرعت باد تراز ۱۰ متر و رطوبت نسبی تراز ۲ متری

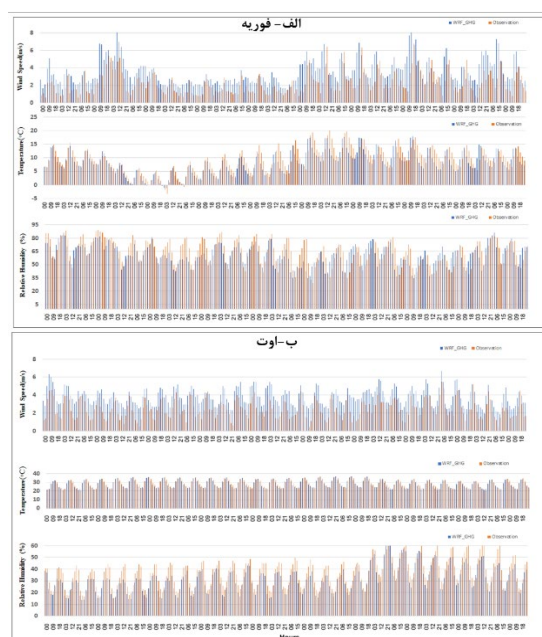
جدول ۲- ارزیابی و کمی‌سازی اعتبار میدان‌های هواشناسی، شبه‌سازی شده بوسیله مدل عددی WRF-GHG، از دمای ۲ متری، سرعت باد تراز ۱۰ متر و رطوبت نسبی تراز ۲ متری

پارامتر آماری	Correlation(r)					
	اوت			فوریه		
نام ایستگاه	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)
اهواز	۰.۴۹	۰.۸۲	۰.۷۵	۰.۳۸	۰.۹۵	۰.۸۳
اراک	۰.۵۸	۰.۷۹	۰.۷۳	۰.۵۱	۰.۹۱	۰.۸۳
ارومیه	۰.۳۷	۰.۸۰	۰.۴۳	۰.۲۲	۰.۹۳	۰.۸۰
اصفهان	۰.۴۰	۰.۷۰	۰.۵۰	۰.۴۳	۰.۸۵	۰.۸۰
بندرعباس	۰.۳۱	۰.۷۴	۰.۷۳	۰.۶۵	۰.۹۰	۰.۷۳
تبریز	۰.۴۴	۰.۸۶	۰.۵۶	۰.۴۲	۰.۹۴	۰.۸۶
تهران	۰.۱۷	۰.۸۹	۰.۴۲	۰.۴۵	۰.۹۶	۰.۸۸
رشت	۰.۴۷	۰.۸۰	۰.۶۰	۰.۶۸	۰.۹۳	۰.۷۹
شیراز	۰.۴۶	۰.۷۴	۰.۶۲	۰.۲۹	۰.۹۱	۰.۶۶
مشهد	۰.۲۳	۰.۴۱	۰.۲۵	۰.۶۶	۰.۹۶	۰.۸۴
Bias error						
ماه	اوت			فوریه		
نام ایستگاه	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)
اهواز	۱.۱۵	-۰.۵۵	-۷.۲۱	۱.۰۴	۰.۱۶	-۳.۸۰۶
اراک	۴.۰۷	-۱.۰۷	-۳.۲۷	۲.۲۵	-۱.۱۹	۰.۷۳۲
ارومیه	۰.۴۳	-۰.۲۴	-۲.۶۹	۰.۹۲	۱.۲۶	-۳.۵۰۵
اصفهان	۱.۵۵	-۳.۲۶	۰.۴۶	۲.۲۳	-۲.۵۸	-۰.۳۴۲
بندرعباس	۰.۲۸	-۱.۰۸	-۲.۶۷	۰.۶۶	-۰.۳۶	-۱۱.۵۴۱
تبریز	۰.۵۳	۱.۱۵	-۴.۷۲	۱.۷۹	-۱.۶۹	۲.۹۵۷
تهران	۰.۳۰	-۲.۹۰	۱۰.۰۰	۰.۴۷	-۰.۷۷	-۴.۷۶
رشت	۱.۰۵	۱.۰۰	-۳.۵۴	۱.۶۰	۲.۰۳	-۹.۸۱۰
شیراز	۲.۸۶	-۰.۲۴	-۸.۷۶	۱.۸۷	-۰.۵۸	-۶.۲۵۴
مشهد	۰.۴۸	-۰.۰۰	-۵.۵۹	۰.۰۳	-۰.۱۲	۰.۴۷۴
RMSE error						
ماه	اوت			فوریه		
نام ایستگاه	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)	WS (m/s)	AT (°C)	RH (%)
اهواز	۲.۱۵	۳.۲۳	۱۵.۲۶	۲.۰۸	۲.۰۷	۱۳.۲۳
اراک	۵.۳۴	۳.۹۹	۲۱.۷۰	۲.۵۷	۲.۵۳	۵.۱۶
ارومیه	۱.۹۱	۳.۱۵	۱۸.۶۵	۱.۸۹	۲.۸۱	۱۲.۴۷

اصفهان	۳.۷۰	۵.۴۴	۱۹.۷۹	۲.۹۵	۳.۹۹	۵.۵۲
بندرعباس	۲.۱۵	۲.۹۵	۱۵.۳۹	۱.۵۶	۲.۱۲	۲۰.۸۲
تبریز	۲.۴۰	۲.۶۳	۱۴.۸۴	۳.۳۴	۲.۳۹	۹.۳۴
تهران	۲.۹۲	۳.۵۹	۲۰.۲۱	۱.۸۷	۱.۳۱	۶.۰۰
رشت	۲.۲۳	۳.۱۱	۱۵.۱۲	۱.۹۷	۲.۶۹	۱۵.۱۵
شیراز	۳.۳۸	۳.۶۶	۱۹.۴۱	۳.۰۲	۲.۲۹	۱۱.۷۰
مشهد	۲.۹۵	۶.۸۹	۲۳.۳۰	۱.۶۹	۱.۴۷	۵.۱۴

میزان باد تأثیر بسزایی در نسبت آمیختگی قائم گازهای گلخانه‌ای دارند و تأثیر مستقیم بر الگوی تبادلات جوی آنها می‌گذارند. از مقایسه ضریب همبستگی (R)، می‌توان مشاهده کرد که هر چند که مقادیر R در سرعت باد ده متری، کمتر از رطوبت نسبی است ولی RMSE آن مقادیر پایین‌تری (به طور متوسط در هر دو ماه اوت و فوریه (به ترتیب ۲.۸۹ و ۲.۹۱) دارد که تفاوت چندانی با مقادیر آن برای دمای دومتری ندارد. مقادیر میانگین بایاس نیز به طور متوسط ۱.۲۸ و ۱.۱۹ در دو ماه گرم و سرد می‌باشد. مدل در هر دو فصل گرم و سرد، مقادیر سرعت باد را به طور متوسط، بیش از مشاهدات تخمین زده است

وجود خطاها در نسبت‌های آمیختگی رطوبت، می‌تواند بر غلظت انواع خاصی از آلاینده‌ها شبیه‌سازی شده توسط مدل تأثیر بگذارند. به عنوان مثال، خطای انحراف مقادیر رطوبت در مدل می‌تواند غلظت رادیکال‌های هیدروکسیل را بیش از حد ارزیابی کند، که به نوبه خود غلظت چندین ترکیب آلی فرار را کم ارزیابی خواهد نمود و مقادیر CH_4 و O_3 را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین، انتظار می‌رود خطاهایی که در شبیه‌سازی محتوای بخار آب نیز رخ می‌دهد در صورت ناچیز بودن شاید وجود خطاها، تأثیر کمی بر شبیه‌سازی شیمی جوی داشته باشد (کومار، ۲۰۱۲).



شکل ۳- مقایسه متوسط سری ماهانه، متغیرهای هواشناسی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بوسیله مدل WRF-GHG در ایستگاه‌های همدیدی برای ماه فوریه (الف) و اوت (ب) دما ($^{\circ}C$)، رطوبت نسبی (%/ و سرعت باد (m/s) در ایستگاه‌های همدیدی برای ماه فوریه (الف) و اوت (ب)

زمان در تجزیه و تحلیل استفاده شده است. از آنجا که GOSAT_(XCO₂) را به عنوان میانگین ستون نسبت‌های آمیختگی اندازه‌گیری می‌کند، مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده WRF-GHG نیز به میانگین ستونی تبدیل گردید.

در جدول ۳، نتایج ارزیابی‌های آماری در عملکرد مدل WRF-GHG، به همراه مکانیزم شیمی‌فاز گازی GHG، با استفاده از میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) را در شبیه‌سازی غلظت کربن‌دی‌اکسید، در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده بوسیله ماهواره گوست، و برآورد غلظت در دو ماه فوریه و اوت ارائه شده است. از بررسی نتایج در جدول ۳، می‌توان دریافت که مدل WRF-GHG در شبیه‌سازی کربن‌دی‌اکسید در ماه سرد بهتر از فصل گرم عمل کرده است. رابطه بین مقادیر ارزیابی شده از ماهواره GOSAT، و مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده در ستون هوا، همبستگی (R) بسیار قوی، با شاخص توافق بیشتر از ۰.۷۱ و ۰.۷۸ در دو فصل سرد و گرم نشان می‌دهد.

۲-۱-۳ نتایج راستی‌آزمایی شبیه‌سازی

جوی-شیمی WRF-GHG

با توجه به ارزیابی اخیر عملکرد الگوریتم‌های NIES، ACOS و Remo Tec^۱ برای ارزیابی غلظت ستونی CO₂ از مشاهدات ماهواره GOSAT، بر روی منطقه عرض میانه (بین عرض‌های جغرافیایی ۰ و ۷۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۷۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب شرقی و غربی)، در این مطالعه از نتایج الگوریتم NIES، استفاده شده است. عبارتی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها و بررسی آماری غلظت ستونی گازهای گلخانه‌ای مورد نظر (CO₂) WRF_GHG، در نقاطی که شامل داده‌های سنجش از دور (داده‌های سنجنده گوست) موجود می‌باشد، از مجموعه محصولات سطح ۲ تولید شده، توسط الگوریتم NIES، استفاده گردید. ارزیابی‌ها نیز در بازه زمانی ا تا ۲۸ فوریه ۲۰۱۰ و ا تا ۳۱ اوت ۲۰۱۰ انجام گردید. زمان گذر محلی ماهواره گوست ۰۰:۱۳-۰۹:۰۰ است، بنابراین غلظت شبیه‌سازی شده WRF-GHG برای این

جدول ۳- اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده CO₂ با استفاده از طرحواره گازهای گلخانه‌ای و مقادیر مشاهداتی ماهواره GOSAT

Gas	Month	MAE	RMSE	MBE	R ² (%)
CO ₂ (PPMV)	فوریه	۱.۴۳	۱.۶۳	-۰.۷۹	۰.۷۱
	اوت	۱.۸۱	۱.۹۶	۰.۴۵	۰.۸۷

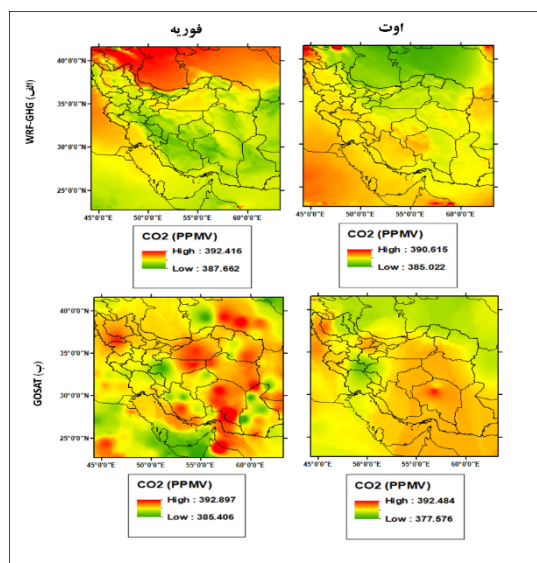
شده است. میانگین ماهانه غلظت گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شده با مشاهدات ماهواره‌ای مقایسه شده است و مشاهده می‌شود که تغییرات فصلی در غلظت گازها، در ایران به خوبی شبیه‌سازی شده است.

توزیع میانگین فضایی غلظت گازهای گلخانه‌ای (CO₂) ارزیابی شده، از مشاهدات ماهواره گوست و مقادیر شبیه‌سازی شده به صورت جمع ستونی، در طول زمستان (فوریه) و تابستان (اوت) در سال ۲۰۱۰ در شکل ۴ نشان داده

¹SRFP (the proxy and full-physics ... SRON/KIT's RemoTeC algorithm)

میزان مقادیر شبیه‌سازی شده کربن‌دی‌اکسید، مقادیر پس زمینه است که توسط داده‌های CAMS به شبیه‌سازی ارائه می‌شود که منجر به افزایش نسبت آمیختگی گازهای آلاینده مورد نظر در مقایسه با داده‌های مشاهداتی گوست در حوزه مطالعاتی مورد نظر می‌شود. علاوه بر این خطا در میزان باد و پخش جوی شبیه‌سازی شده نیز می‌تواند در خطای مهارى داشته باشد. با این حال، کم یا بیش‌برآورد از مقادیر مشاهدات ممکن است به دلیل خطا در سایر متغیرهای هواشناسی مانند رطوبت و دما باشد. بصورت کلی شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی کلیدی خصوصاً در برخی مناطق با ترازى از عدم قطعیت برخوردار است. بنابراین، بکار بستن تکنیک‌های داده‌گواری در شبیه‌سازی‌ها و ارتقای سیاه‌های گسیل آلاینده‌های جوی می‌تواند نتایج را بصورت معنی‌داری بهبود بخشد.

الگوی مقادیر شبیه‌سازی شده، تغییرات مکانی و زمانی و غلظت را مطابق آنچه در داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود، ارائه می‌دهد (شکل ۴). هر دو مقادیر شبیه‌سازی شده و همچنین مقادیر بازیابی GOSAT، نشان می‌دهند که غلظت به طور کلی از تابستان به زمستان افزایش می‌یابد. با این حال، برخی اختلافات بین توزیع فضایی، شبیه‌سازی شده و بازیابی شده GOSAT در هر فصل قابل تشخیص است. این اختلافات در طول تابستان بسیار بارز است و می‌توان آنها را در مناطق داخلی مشاهده کرد. دلایل متعددی می‌تواند منجر به اختلاف، در نسبت آمیختگی کربن‌دی‌اکسید حاصل از شبیه‌سازی عددی و مشاهدات گردد که یک از مهمترین آنها شامل عدم قطعیت در ارزیابی میزان گسیل آلاینده‌ها و توزیع زمانی آن به عنوان گسیل ورودی به شبیه‌سازی در حوزه مورد مطالعه می‌باشد. یکی دیگر از دلایل وجود خطاها در

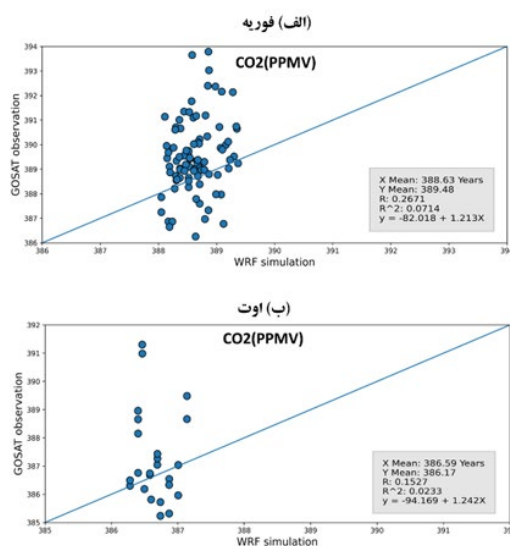


شکل ۴- توزیع میانگین فضایی مقادیر ستونی غلظت گاز گلخانه‌ای (CO₂) حاصل از شبیه‌سازی عددی WRF-GHG (ردیف اول-الف) و بازیابی شده ماهواره GOSAT شده (ردیف دوم-ب) (ماه فوریه) و (ماه اوت) در سال ۲۰۱۰

در این نقاط محدود بررسی شده است. تعداد داده‌های موجود از ماهواره گوست در فصل گرم پوشش پایین تری از فصل سرد در این مطالعه را دارا می‌باشد. حجم نمونه داده در فصل گرم و سرد به ترتیب ۹۳ و ۱۷ می‌باشد. با یک نگاه به نمودار بلافاصله برخی از ویژگی‌های کیفیت شبیه‌سازی را آشکار می‌کند: مقادیر تغییرات غلظت کربن دی‌اکسید، به طور متوسط در دامنه ۳۸۷.۵ تا ۳۸۹.۵ در زمستان و ۳۸۶.۰۲ تا ۳۸۷.۱۳ در تابستان می‌باشد. در صورتی که پراکندگی نقاط، در امتداد حدودی خط ۴۵ درجه جمع و منطبق شوند، کیفیت مناسب شبیه‌سازی‌های را نشان می‌دهد و از قابلیت اطمینان کامل تری برخوردار خواهند بود. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، نقاط به شکل متقارنی حول نیمساز پراکنده شده‌اند. یک از ویژگی‌های مقایسه میانگین اندازه‌گیری ماهانه توسط GOSAT در فصل گرم، حداقل وحداکثر در حدود (۳۸۳.۳-۳۹۲.۵) PPMV برای CO₂ می‌باشد.

با توجه به تفکیک فضایی مدل‌ها در شبیه‌سازی آلاینده‌ها، مدل معمولاً توانایی محدودی در شبیه‌سازی پوشش ابری دارد و کم‌برورد کردن پوشش ابر، تولید آلاینده‌های فتوشیمیایی را افزایش می‌دهد. همچنین خطاها در انتقال‌های رخ داده و رقیق‌سازی بوجود آمده نیز بر شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها تاثیر می‌گذارد. شکل ۵ مقایسه میانگین غلظت CO₂ را در قالب نمودار پراکندگی برای تمام نقاط موجود از ماهواره گوست روی محدوده مورد نظر را نشان می‌دهد. نمودار پراکندگی^۱ احتمالاً ساده‌ترین و گویاترین ابزار ارزیابی می‌باشد.

شکل ۵ نمونه‌ای از نمودار پراکندگی برای مقایسه شبیه‌سازی غلظت ستونی کربن دی‌اکسید حاصل از اجرای WRF-GHG و مشاهدات ماهواره‌ای گوست در هر دو ماه فوریه (الف) و اوت (ب) را نشان می‌دهد. به دلیل پوشش پایین مجموعه داده‌های GOSAT، متأسفانه ارزیابی آماری



شکل ۵- نمودارهای پراکندگی مقادیر مناظر شبیه‌سازی شده توسط WRF-GHG و غلظت ستونی CO₂ بازیابی شده مشاهدات

GOSAT توسط الگوریتم NIES در دو ماه فوریه و اوت ۲۰۱۰

^۱ Scatter plot

منابع گسیل انسان‌زا برای آلاینده CO₂ یک چرخه فصلی متمایز را با بیشینه مقادیر در زمستان و کمینه در تابستان نشان می‌دهد. همچنین درصد میزان سهم منابع گسیل گازهای گلخانه‌ای در هر دو فصل سرد و گرم برای حوزه مورد مطالعه، در جدول ۴ نشان داده شده است.

مجموع گسیل منابع گاز گلخانه‌ای CO₂، به چهار بخش اصلی تقسیم می‌شود. این بخش‌ها شامل گسیل انسانی، زیست‌کره، اقیانوسی، و آتش‌سوزی می‌باشد. سهم درصدی گسیل خالص انسانی در زمستان و تابستان (۳۸.۳۳ و ۲۳.۷۰) برای CO₂ می‌باشد. گسیل زیست‌کره برای کربن‌دی‌اکسید شامل دو بخش جذب و گسیل می‌شوند، که سهم جذب توسط زیست‌کره (۲۴.۰۸ و ۴۶.۶۴) درصد، و سهم گسیل زیست‌کره (۳۱.۸ و ۲۱.۶۴) درصد در زمستان و تابستان ارزیابی گردیده است. همان‌طور که انتظار می‌رود سهم جذب CO₂ در تابستان بیشتر از گسیل انسانی است و در زمستان کمتر از گسیل انسانی می‌باشد. بعد از گسیل انسانی، میزان گسیل زیست‌کره به عنوان بزرگ‌ترین مشارکت‌کننده در گسیل گاز گلخانه‌ای CO₂ شناسایی گردید. گسیل آتش‌سوزی زیست‌توده و اقیانوسی (گسیل و جذب) برای آلاینده CO₂، به ترتیب سومین و چهارمین رتبه در سهم گسیل کل را دارد. مقادیر متوسط ماهانه در جدول ۴ آورده شده است.

توافق بین WRF-GHG و GOSAT در زمستان به نسبت تابستان بهتر است. مقادیر کمتر I در طول زمستان می‌تواند تا حدی مربوط به پوشش ابری گسترده‌تر مرتبط با گردش موسمی در این منطقه و همچنین به دلیل خطاهای بزرگتر در متغیرهای هواشناسی در طول زمستان مرتبط باشد. همان‌گونه که از نتایج خطای بایاس و شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقدار غلظت کربن‌دی‌اکسید شبیه‌سازی شده برای فوریه و اوت عموماً در مقایسه با اندازه‌گیری‌های GOSAT قدری کم برآورد شده است و مقدار MB اندازه‌گیری ثبت شده توسط ماهواره گوست، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

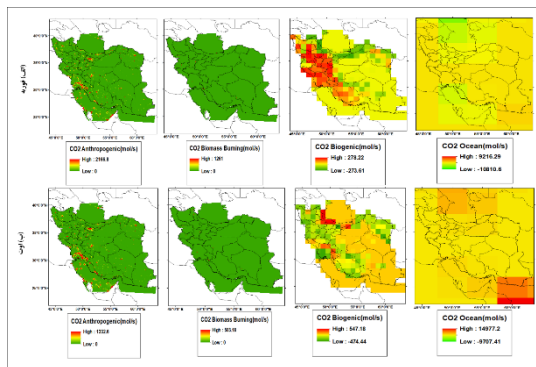
۲-۳ توزیع مکانی و زمانی گسیل گازهای

گلخانه‌ای CO₂

میانگین ماهانه پردازش شده برای این مطالعه و توزیع مکانی منابع گسیل برای ماه‌های فوریه و اوت در شکل ۶- الف، ب ترسیم شده است. گسیل‌های انسانی گازهای گلخانه‌ای در فصل گرم و سرد سال، مناطق شرق و مرکزی را در حوزه شبیه‌سازی ما ناچیز می‌باشد و بیشتر مناطق غرب و نواحی جنوبی ایران را پوشش می‌دهد. عمده گسیل CO₂ انسانی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و سوخت فسیلی می‌باشد.

جدول ۴- سهم درصدی و مولی منابع گسیل گاز گلخانه‌ای CO₂، ارزیابی و معرفی شده به WRF-GHG

منابع گسیل کل (mol/km ² hr)	Anthropogenic (CO ₂)		Biomass Burning (CO ₂)		Biogenic (uptake)	
	-	%	-	%	-	%
فوریه (%)	۱۱۰.۵۴	۳۸.۳۳	۱۶.۶۳	۵.۷	۶۹.۴۶	۲۴.۰۸
اوت (%)	۹۷.۸۲	۲۳.۷۰	۸.۲۶	۲.۰۰۴	۲۰۰.۲۱	۴۶.۶۴
	Biogenic (emission)		Ocean (uptake)		Ocean (emission)	
فوریه (%)	۹۱.۷۴	۳۱.۸۱	۹.۳۲×10^{-6}	۳.۲×10^{-6}	۰	۰.۰
اوت (%)	۱۲۲.۹۵	۲۸.۶۴	۰	۰.۰	۹.۱۸×10^{-6}	۲.۲۲×10^{-6}



شکل ۶- میانگین ماهانه توزیع فضایی سیاهه گسیل گاز گلخانه‌ای CO₂ از منابع مختلف انسانی (EDGAR)، زیست کره (NEE)، اقیانوسی (Carboscop) و آتش‌سوزی (GFAS) فوریه (الف) و اوت (ب)

به طور کلی، غلظت گاز گلخانه‌ای در فصل سرد، (ماه فوریه)، بیشتر است و در اواخر زمستان تا اوایل بهار به اوج خود می‌رسد، در حالی که غلظت آلاینده‌های مورد نظر، در فصل گرم (ماه اوت)، کاهش می‌یابد که این افزایش و کاهش در زمستان و تابستان با توجه به گسیل غالب انسانی و جذب (بودجه منفی) توسط درختان در فصل رشد^۱ مورد انتظار است (شکل ۷). غلظت گازهای گلخانه‌ای در نواحی غربی و شمالی و جنوبی کشور به نسبت نواحی مرکزی و شرقی، سطح بالاتری را نشان می‌دهد و این به دلیل موجودی‌های تراز گسیل گاز گلخانه‌ای است که عمدتاً بر اساس تفاوت نسبی توزیع جمعیت در آن منطقه و همچنین تفاوت‌های منطقه‌ای در فصلی بودن غلظت گازهای گلخانه‌ای است.

با توجه به نسبت آمیختگی در نواحی شرقی کشور، علاوه بر مقادیر ناشی از غلظت پس‌زمینه، همچنین باید به نقش مهم انتقال، که توسط بادهای شدید موجود در این منطقه رخ می‌دهد اشاره کرد، که این بادهای عامل مهم انتقال CO₂ گسیل شده را در شرق کشور می‌باشند. یک الگوی جالب دیگر که با این شبیه‌سازی قابل مشاهده است، نقش کوه‌هاست است. نقش کوه‌ها بسیار تعیین‌کننده است و به نظر می‌رسد که کوه‌ها

۳-۳ توزیع مکانی و زمانی غلظت شبیه-

سازی شده گاز گلخانه‌ای CO₂، WRF-GHG

در این بخش، به بررسی توزیع مکانی و زمانی غلظت ستونی گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید، روی ایران پرداخته می‌شود. شکل ۷ نشان‌دهنده متوسط ستونی ماهانه توزیع مکانی غلظت آلاینده CO₂، برای دو ماه سرد و گرم (ماه فوریه و اوت) می‌باشد.

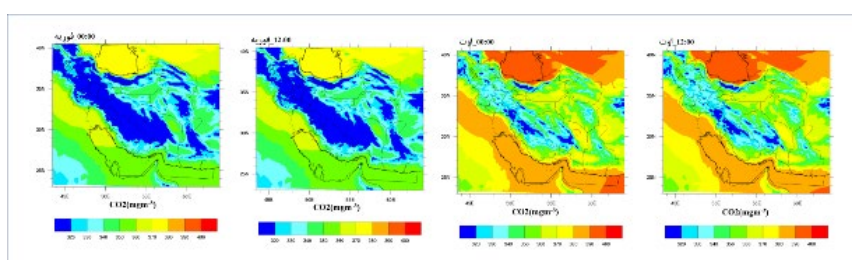
اندازه‌گیری‌های سطحی از آلاینده‌های هوا مثل CO، CO₂، CH₄ در جنوب غرب آسیا و آسیای جنوبی بسیار پراکنده است و فقط در چند مکان در غرب آسیا در دسترس است (Beig et al., 2007). به دلیل کمیاب بودن مشاهدات، استفاده از رصدهای ماهواره‌ای همراه با شبیه‌سازی‌های عددی بسیار ضروری است. مشاهدات فوق‌علیرغم کمیاب بودن آن‌ها، اطلاعات مهمی در مورد رفتار فصلی گاز گلخانه‌ای CO₂ ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که سطح CO₂ در این منطقه در فصل زمستان بالاترین میزان است.

¹ Growing season

منطقه را توجیه نمی‌کنند. این چرخه فصلی در مشاهدات ماهواره ای GOSAT، نیز آشکار است (Frankenberg et al., 2006). منبع دیگر در گسیل و تولید غلظت بیشتر گاز CO₂، که دارای چرخه فصلی قوی است، سوختن زیست توده است. این منبع از استحکام کمتری برخوردار است و در مقایسه با منابع انسان‌زا، الگوی متضادی را نشان می‌دهد، زیرا بیشترین احتراق زیست توده در فصل خشک منطقه رخ می‌دهد (Duncan et al., 2003).

مانع از انتقال آلاینده‌ها به سمت نواحی اطراف می‌شوند و باعث تجمع شان در همان ناحیه می‌شوند (شکل ۷).

منبع مهم دیگر، CO₂ انسان ساخت^۱، فرایند استخراج سوخت‌های فسیلی، مانند نفت، گاز طبیعی می‌باشد. این منابع در قسمت‌های غرب، جنوب و جنوب غربی واقع شده‌اند. به طور کلی گسیل انسانی در دوره زمانی یک سال تقریباً ثابت هستند، بنابراین تغییرات فصلی مشاهده شده در CO₂ جو



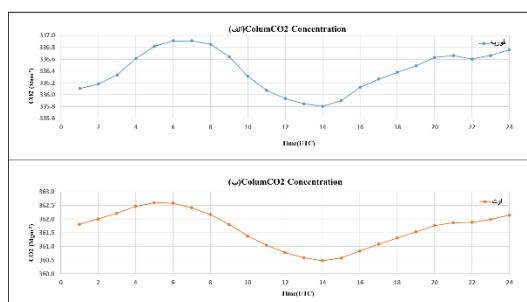
شکل ۷- متوسط ماهانه از پهنه‌های زمانی ۱۲ ساعته از غلظت CO₂ (Mgm⁻³)، در ایران، دو ماه فوریه و اوت

Mgm⁻³ نشان می‌دهد. مقادیر غلظت ستونی CO₂ در فصل سرد، در طول روز روند کاهشی دارد و شب هنگام مجدداً افزایش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی شده از آلاینده‌ها، اثرات روشن روزانه پوشش گیاهی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که مقادیر پایین روزانه ناشی از افزایش فتوسنتز و مقادیر افزایشی هنگام شب ناشی از تنفس زیست کره می‌باشد.

توزیع زمانی متوسط ماهانه غلظت‌های شبیه‌سازی شده متوسط CO₂، مربوط به ساعت‌های صفر و دوازده UTC، در دو ماه فوریه و اوت الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقادیر متوسط جریان‌های مشاهده شده، کمترین میزان غلظت CO₂ را در زمان ظهر ساعت ۱۴:۰۰ UTC، به ترتیب فصل سرد و گرم برای CO₂، با مقادیر Mgm⁻³ ۳۳۵.۸۰ و Mgm⁻³ ۳۳۶.۹۱ و ۳۶۰.۴۸ و گرم به ترتیب Mgm⁻³ ۳۳۶.۹۱ (ساعت سرد و گرم به ترتیب Mgm⁻³ ۳۶۲.۶ و (ساعت ۰۵:۰۰ UTC) و (ساعت ۰۶:۰۰

¹ Anthropogenic Methan



شکل ۸- متوسط ماهانه رفتار زمانی غلظت میانگین ستونی CO₂ (Mgm⁻³)، روی کل ایران، دو ماه فوریه (الف) و اوت (ب)

روی ایران نشان می‌دهد. مقادیر فرارفت افقی از سطح زمین تا ارتفاع سقف مدل در محدوده مطالعاتی ایران، به ترتیب برای CO₂ در هر دو فصل می‌باشند. از سوی دیگر، اندازه مقادیر فرارفت در فصل سرد برای CO₂ بزرگتر از فصل گرم می‌باشد. با توجه به نقش میدان سرعت و غلظت، حاصل مقدار فرارفت، می‌توان مقادیر بزرگتر در فصل سرد را توجیه کرد.

مقادیر بیشینه و کمینه فرارفت افقی در ساعت ۲۳:۰۰ به وقت UTC، ۱۳:۰۰ به وقت UTC می‌باشد. مقادیر ماکزیمم فرارفت متوسط ماهانه، شب هنگام تا اوایل صبح رخ می‌دهد. این مورد می‌تواند به چینه‌بندی باد در لایه مرزی شبانه و غلظت‌های لایه مرزی بالاتر ارتباط داشته باشد. تنفس خاک و پوشش گیاهی، زیست‌کره و فرایند فوتوسنتز، می‌تواند به عنوان یک منبع، برای گاز CO₂ عمل می‌کنند. میانگین مقادیر فرارفت، با نزدیک شدن به حداقل مقدار، در طول روز، برای هر دو ماه فوریه و اوت در هنگام ظهر تا اواسط بعداز ظهر، شبیه‌سازی شده است. این تفاوت در مقادیر روزانه و شبانه فرارفت، علاوه بر تاثیرات سبزینگی، تحت تاثیر آمیختگی قائم لایه‌ی مرزی در نزدیک سطح تا سطوح بالاتر می‌باشد. در هنگام ظهر طی رشد قائم لایه‌ی جوی تحت تاثیر گرمایش تلاطمی، پخش قائم افزایش می‌یابد. در حالت رخداد لایه آمیخته افت برش قائم باد و غلظت‌ها می‌تواند تا حدودی منجر به کاهش فرارفت افقی می‌شوند.

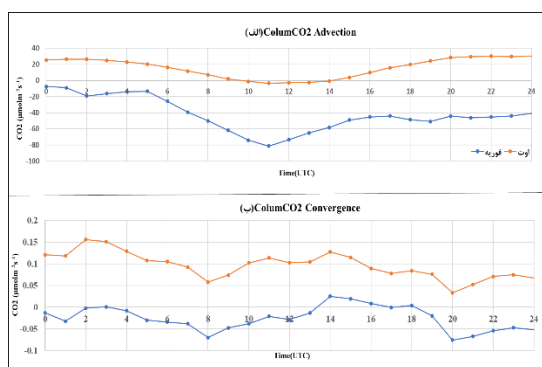
عدم قطعیت در شبیه‌سازی غلظت ستونی آلاینده‌ها، را می‌توان با ارتقای سیاه گسیل، ارتقای تفکیک فضایی، شبیه‌سازی باده‌ها، کاهش خطا در شبیه‌سازی هواشناسی کاهش داد. با این حال، شبیه‌سازی‌های طولانی‌تری برای اطمینان بیشتر به این یافته پیشنهاد می‌شود. به دلیل محدودیت منابع محاسباتی در حال حاضر نمی‌توان یک شبیه‌سازی سالانه با وضوح بالا برای این مطالعه انجام داد.

۳-۴ پخش جوی منطقه‌ای

در این بخش، به نقش رفتاری جمله فرارفت (معادله ۱-۶) تحت شرایط زمانی متفاوت، خواهیم پرداخت. در این مطالعه، مقدار (منفی، مثبت) مقدار میانگین محاسبه شده از تمام نقاط شبکه در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که غلظت آلاینده مورد نظر در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب با زمان کاهش و یا افزایش پیدا می‌کند. این مطالعه بر اندازه گیری فرارفت غلظت آلاینده CO₂ در ایران، تمرکز دارد.

در صورتی که مقدار حاصل از معادله (۶) منفی باشد، نشان می‌دهد که ایران می‌تواند در تولید و افزایش غلظت گاز گلخانه‌ای تاثیر گذار باشد و باعث افزایش غلظت گاز گلخانه‌ای در منطقه خاورمیانه باشد و عبارتی مانند چشمه عمل کند. در ادامه به بررسی مقادیر میانگین ماهانه (فوریه و اوت) از رفتار روزانه (ساعتی) فرارفت افقی و قائم غلظت ستونی روی ایران پرداخته می‌شود.

شکل ۹، سری زمانی متوسط تغییرات شبانه‌روزی فرارفت افقی و قائم خالص، به صورت میانگین ماهانه (فوریه و اوت)،



شکل ۹- متوسط سری‌های زمانی ساعتی از از مقادیر فرارفت افقی و قائم میانگین ماهانه ($\text{CO}_2(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$) در ایران، در دو ماه فوریه (الف) و اوت (ب)

متوسط برای ماه فوریه و اوت به طور متوسط به ترتیب ۴۸۳ و ۱۰۸ کیلوگرم در ماه است می‌باشد. این مقدار نشان می‌دهد که ایران در منطقه خاورمیانه در ماه فوریه و اوت برای آلاینده CO_2 نمی‌تواند به عنوان چشمه تولید گازهای گلخانه‌ای CO_2 عمل کند.

مقادیر خالص فرارفت قائم (معادله ۶) برای CO_2 در فصل سرد $0.088 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ و در فصل گرم $0.25 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ می‌باشد. که در مقایسه با مقادیر افقی بسیار ناچیز و قابل صرفه‌نظر کردن می‌باشد

مقادیر کل جمع ستونی فرارفت (افقی و قائم)، روی ایران، (تا سطح ۶۰۰ هکتوپاسکال) در ماه فوریه و اوت برای CO_2 در جدول ۵ آورده شده است. مقادیر خالص فرارفت افقی برای CO_2 در فصل سرد $42.41 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ و در فصل گرم $15.79 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ می‌باشد. با توجه به مقدار محاسبه شده فرارفت، می‌توان مشاهده کرد که برای آلاینده CO_2 در ماه فوریه، منفی محاسبه شده است، حاصل آن برای ماه اوت مقدار مثبت می‌باشد. مقادیر محاسبه شده به طور

جدول ۵- مقادیر جمع ستونی فرارفت $\text{CO}_2(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ در ایران، در دو ماه فوریه و اوت

$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	فوریه
CO_2 (Colum Advection)	۴۲.۴۱- (یا : ۴۳۶.۷۷ گرم در ماه)
CO_2 (Colum ivergence)	۰.۰۸۸ (یا : ۱۰.۳۳ گرم در ماه)
	اوت
CO_2 (ColumAdvection)	۱۵.۷۹ (یا : ۱۸۰۰.۸۱ گرم در ماه)
CO_2 (Colum Divergence)	۰.۰۲۵- (یا : ۲۸۵ گرم در ماه)

تلاش‌ها برای درک پیامدهای منطقه‌ای و جهانی گسیل‌های آسیایی با همراهی مشاهدات از اندازه‌گیری‌های میدانی فشرده (مانند TRACE-P، PEM-West B، PEM West-A، CARE-Beijing و غیره) و ابزارهای مبتنی بر مشاهدات ماهواره ای همراه با مدل سازی تبادلات شیمیایی انجام شده

۴- نتیجه گیری

مطالعه گسیل گازهای گلخانه‌ای به صورت منطقه‌ای و رفتار و تاثیرات آن بر منطقه و سایر قاره‌ها می‌تواند جهت مدیریت شرایط راهگشا باشد. نیز تأثیر می‌گذارد. برخی

است. با این حال، چنین تلاش‌هایی عمدتاً بر روی منطقه آسیای شرقی متمرکز هستند و مطالعات در زمینه گازهای گلخانه‌ای، روی و در جنوب غربی آسیا محدود هستند.

مدل (WRF-GHG) در منطقه خاورمیانه و ایران، به عنوان حوزه اول و دوم پیاده‌سازی شده است. استفاده از مدل منطقه‌ای به درک بهتر از گسیل گازهای گلخانه‌ای، در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند. یافته‌های مهم حاصل از کار ارائه شده نشان می‌دهد که، تنوع مکانی و زمانی متغیرهای هواشناسی به خوبی با ضریب همبستگی $0.76-0.93$ ، $0.47-0.39$ و $0.80-0.52$ برای متغیرهای به ترتیب دما، باد و رطوبت نسبی، برای دو ماه فوریه و اوت در سال ۲۰۱۰، شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج ذکر شده، می‌توان بیان کرد که در شبیه‌سازی، مقادیر باد بیش از حد برآورد شده است. رطوبت در هر دو فصل، کمتر تخمین شده است. مقایسه معیارهای آماری با مجموعه‌ای از معیارهای پیشنهادی نشان داد که خطاها در پارامترهای هواشناسی شبیه‌سازی شده مدل به خوبی در محدوده یا قابل مقایسه هستند.

مدل شبیه‌سازی شده گازهای گلخانه‌ای، کربن دی‌اکسید، با مشاهدات ماهواره گوست، مقایسه شده است. نتایج اصلی عبارتند از: این مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی تغییرات فصلی CO₂ و ردسپهری در منطقه ایران را دارد. شاخص ضریب همبستگی پیرسون، بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی بدست آمده از ماهواره ۰.۸۷-۰.۷۱ تخمین زده می‌شود که نشان می‌دهد که مدل قادر به بازتولید تغییرپذیری کلی مکانی و زمانی گازهای آلاینده می‌باشد.

اختلاف بین مدل و مشاهدات نشان‌دهنده عدم قطعیت‌های بزرگ در تخمین‌های گسیل گازهای گلخانه‌ای انسان‌زایی و سوزاندن زیست توده، برای CO₂ است. افزایش معنی‌دار گازهای گلخانه‌ای در نواحی در نواحی غربی، جنوب غربی و نوار شمالی و جنوبی، مربوط به گسیل انسان ساخت^۱،

استخراج سوخت‌های فسیلی، مانند نفت، گاز طبیعی می‌باشد. این منابع در قسمت‌های غرب، جنوب و جنوب غربی واقع شده اند.

از بررسی تغییرات فرارفت در ایران نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. مقادیر کل جمع ستونی فرارفت، روی ایران، (تا سطح ۶۰۰ هکتوپاسکال) در ماه فوریه و اوت برای CO₂ به ترتیب $(-42.41 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ در فصل سرد و $(15.79 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$ در فصل گرم می‌باشد. با توجه به مقدار محاسبه شده فرارفت افقی و قائم، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر خالص فرارفت قائم در مقایسه با مقادیر افقی بسیار ناچیز و قابل صرفه‌نظر کردن می‌باشد. همچنین با توجه مقادیر محاسبه شده برای مقادیر فرارفت افقی غلظت‌که ایران در منطقه خاورمیانه در ماه فوریه و اوت برای آلاینده CO₂ نمی‌تواند به عنوان چشمه تولید گازهای گلخانه‌ای CO₂ عمل کند.

مقادیر خالص فرارفت قائم (معادله ۶) برای CO₂ در فصل سرد $0.088 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ و در فصل گرم $-0.025 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ می‌باشد. که در مقایسه با مقادیر افقی بسیار ناچیز و قابل صرفه‌نظر کردن می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور برای همکاری سازنده و در اختیار قرار دادن داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی منتخب کمال تشکر را دارند. این تحقیق با حمایت مالی بنیاد ملی علوم ایران (INSF)، تهران، ایران (شماره کمک هزینه: ۹۸۰۱۲۷۵۲) به انجام رسیده است. داده‌های NIES XCCO₂، نسخه ۲.۹۵، گزارش شده در این مقاله در بخش ۲.۵.۲ بر اساس داده‌های مشاهده شده توسط GOSAT است. ما از اعضای آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن (JAXA)، موسسه ملی مطالعات محیط زیست ژاپن (NIES)، و وزارت محیط زیست ژاپن (MOE)

¹ Anthropogenic Methan

- Leblanc, T., McGee, T. J., Nedoluha, G., Petropavlovskikh, I., Seckmeyer, G., Simon, P. C., Steinbrecht, W., and Strahan, S. E.: The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 4935–4964, <https://doi.org/10.5194/acp-18-4935-2018>, 2018.
7. Feng, S., Lauvaux, T., Newman, S., Rao, P., Ahmadov, R., Deng, A., Díaz-Isaac, L. I., Duren, R. M., Fischer, M. L., Gerbig, C., Gurney, K. R., Huang, J., Jeong, S., Li, Z., Miller, C. E., O’Keeffe, D., Patarasuk, R., Sander, S. P., Song, Y., Wong, K. W., and Yung, Y. L.: Los Angeles megacity: a high-resolution land–atmosphere modelling system for urban CO₂ emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 9019–9045, <https://doi.org/10.5194/acp16-9019-2016>, 2016.
 8. Grell, Georg A., Steven E Peckham, Rainer Schmitz, Stuart A McKeen, Gregory Frost, William C Skamarock, and Brian Eder. 2005. 'Fully coupled “online” chemistry within the WRF model', *Atmospheric Environment*, 39: 6957-75.
 9. Grell, Georg, and Alexander Baklanov. 2011. 'Integrated modeling for forecasting weather and air quality: A call for fully coupled approaches', *Atmospheric Environment*, 45: 6845-51.
 10. Guerlet, S, A Butz, D Schepers, S Basu, OP Hasekamp, A Kuze, T Yokota, J-F Blavier, NM Deutscher, and DW T Griffith. 2013. 'Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO₂ from GOSAT shortwave infrared measurements', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 4887-905.
 11. Hase, F., Frey, M., Blumenstock, T., Groß, J., Kiel, M., Kohlhepp, R., Mengistu Tsidu, G., Schäfer, K., Sha, M. K., and Orphal, J.: Application of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city Berlin, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3059–3068,
- تشریح می‌کنیم. داده‌های NIES XCCO₂، نسخه ۲.۹۵، از طریق سرویس بایگانی داده GOSAT (GDAS) در: <https://data2.gosat.nies.go.jp/> بدست آمده است.
- ### منابع
1. Agusti-Panareda, A., Diamantakis, M., Bayona, V., Klappenbach, F., & Butz, A. (2017). Improving the inter-hemispheric gradient of total column atmospheric CO₂ and CH₄ in simulations with the ECMWF semi-Lagrangian atmospheric global model. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 1-18.
 2. Bao, J.-W., Michelson, S. A., McKeen, S. A., and Grell, G. A. (2005), Meteorological evaluation of a weather-chemistry forecasting model using observations from the TEXAS AQS 2000 field experiment, *J. Geophys. Res.*, 110, D21105, doi: 10.1029/2004JD005024.
 3. Beck, V., Gerbig, C., Koch, T., Bela, M. M., Longo, K. M., Freitas, S. R., Kaplan, J. O., Prigent, C., Bergamaschi, P., and Heimann, M.: WRF-Chem simulations in the Amazon region during wet and dry season transitions: evaluation of methane models and wetland inundation maps, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 7961–7982, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7961-2013>, 2013.
 4. Crisp, D. CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team. A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space.
 5. Dayalu, A., Munger, J. W., Wang, Y., Wofsy, S. C., Zhao, Y., Nehr Korn, T., Nielsen, C., McElroy, M. B., and Chang, R.: Carbon dioxide emissions in Northern China based on atmospheric observations from 2005 to 2009, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2018-632>, 2018.
 6. De Mazière, M., Thompson, A. M., Kurylo, M. J., Wild, J. D., Bernhard, G., Blumenstock, T., Braathen, G. O., Hannigan, J. W., Lambert, J.-C.,

- (WRF-CHEM) over South Asia', Hamburg University Hamburg.
19. Karbasi, S., Malakooti, H., Rahnama, M., & Azadi, M. (2022). Study of CH₄ column concentration on Iran: Application of GOSAT satellite observations and WRF-GHG numerical simulations. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 1-22.
 20. Li, X., Hu, X.-M., Cai, C., Jia, Q., Zhang, Y., Liu, J., Xue, M., Xu, J., Wen, R., and Crowell, S. M. R.: Terrestrial CO₂ Fluxes, Concentrations, Sources and Budget in Northeast China: Observational and Modeling Studies, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 125, e2019JD031686, <https://doi.org/10.1029/2019JD031686>, 2020.
 21. Liu, Y., Yue, T., Zhang, L., Zhao, N., Zhao, M., and Liu, Y.: Simulation and analysis of XCO₂ in North China based on high accuracy surface modeling, *Environ. Sci. Pollut. R.*, 25, 27378–27392, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2683-x>, 2018
 22. Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W.: A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: V
 23. egetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), *Global Biogeochem. Cy.*, 22, GB2005, <https://doi.org/10.1029/2006GB002735>, 2008.
 24. Makarova, M. V., Alberti, C., Ionov, D. V., Hase, F., Foka, S. C., Blumenstock, T., Warneke, T., Virolainen, Y. A., Kostsov, V. S., Frey, M., Poberovskii, A. V., Timofeyev, Y. M., Paramonova, N. N., Volkova, K. A., Zaitsev, N. A., Biryukov, E. Y., Osipov, S. I., Makarov, B. K., Polyakov, A. V., Ivakhov, V. M., Imhasin, H. Kh., and Mikhailov, E. F.: Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign 2019, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 1047–1073, <https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015>, 2015.
 12. Hu, X.-M., Crowell, S., Wang, Q., Zhang, Y., Davis, K. J., Xue, M., Xiao, X., Moore, B., Wu, X., Choi, Y., and DiGangi, J. P.: Dynamical Downscaling of CO₂ in 2016 Over the Contiguous United States Using WRF-VPRM, a WeatherBiosphere-Online-Coupled Model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001875, <https://doi.org/10.1029/2019MS001875>, 2020.
 13. Hu, Xiao-Ming, John W Nielsen-Gammon, and Fuqing Zhang. 2010. 'Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49: 1831-44.
 14. IEA. World Energy Outlook. 2008. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2008> (accessed on 4 November 2020).
 15. IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2007; p. 104.
 16. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2. Jamroensan, A.: Improving bottom-up and top-down estimates of carbon fluxes in the Midwestern USA, PhD thesis, University of Iowa, <https://doi.org/10.17077/etd.99sd8cdc>, 2013.
 17. Janjić, Zaviša I. 1994. 'The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes', *Monthly weather review*, 122: 927-45
 18. Kumar, Rajesh. 2012. 'Weather research and forecasting model with chemistry

- Southern California Air Basin Using the High-Resolution WRF-VPRM Model during the CalNex 2010 Campaign, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 57, 1337–1352, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0358.1>, 2018.
32. Park, C., Park, S.-Y., Gurney, K. R., Gerbig, C., DiGangi, J. P., Choi, Y., and Lee, H. W.: Numerical simulation of atmospheric CO₂ concentration and flux over the Korean Peninsula using WRF-VPRM model during Korus-AQ 2016 campaign, *PLoS ONE*, 15, 1–21, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228106>, 2020.
 33. Parker, Robert, Hartmut Boesch, Austin Cogan, Annemarie Fraser, Liang Feng, Paul I Palmer, Janina Messerschmidt, Nicholas Deutscher, David WT Griffith, and Justus Notholt. 2011. 'Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations', *Geophysical Research Letters*, 38
 34. Pillai, D., Buchwitz, M., Gerbig, C., Koch, T., Reuter, M., Bovensmann, H., Marshall, J., and Burrows, J. P.: Tracking city CO₂ emissions from space using a high-resolution inverse modelling approach: a case study for Berlin, Germany, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 9591–9610, <https://doi.org/10.5194/acp-16-9591-2016>, 2016.
 35. Pillai, D., Gerbig, C., Marshall, J., Ahmadov, R., Kretschmer, R., Koch, T., and Karstens, U.: High resolution modeling of CO₂ over Europe: implications for representation errors of satellite retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 83–94, <https://doi.org/10.5194/acp-10-83-2010>, 2010
 36. S kamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D., and Huang, X.-Y.: A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3, Tech. rep., No. NCAR/TN-556+STR, NCAR/UCAR, <https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>, 2021.
 25. Makarova, M.V.; Alberti, C.; Ionov, D.V.; Hase, F.; Foka, S.C.; Blumenstock, T.; Warneke, T.; Virolainen, Y.A.; Kostsov, V.S.; Frey, M.; et al. Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): An overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign 2019. *Atmos. Meas. Tech.* 2021, 14, 1047–1073. [CrossRef]
 26. Matsunaga, T.; Maksyutov, S. (Eds.) A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data to Evaluate and Improve Greenhouse Gas Emission Inventories, 1st ed.; Satellite Observation Center, National Institute for Environmental Studies: Tsukuba, Japan, 2018; p. 129.
 27. Miao, Jin, Dongshu Guo, Jinzhe Zhang, Qingpei Huang, Genji Qin, Xin Zhang, Jianmin Wan, Hongya Gu, and Li-Jia Qu. 2013. 'Targeted mutagenesis in rice using CRISPR-Cas system', *Cell research*, 23: 1233-36
 28. Misenis, Chris, and Yang Zhang. 2010. 'An examination of sensitivity of WRF/Chem predictions to physical parameterizations, horizontal grid spacing, and nesting options', *Atmospheric Research*, 97: 315-34.
 29. Mlawer, Eli J, Steven J Taubman, Patrick D Brown, Michael J Iacono, and Shepard A Clough. 1997. 'Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102: 16663-82.
 30. Monin, Andreï Sergeevich, and Aleksandr Mikhaïlovich Obukhov. 1954. 'Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere', *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151: e187.
 31. Park, C., Gerbig, C., Newman, S., Ahmadov, R., Feng, S., Gurney, K. R., Carmichael, G. R., Park, S.-Y., Lee, H.-W., Goulden, M., Stutz, J., Peischl, J., and Ryerson, T.: CO₂ Transport, Variability, and Budget over the

- 3285, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3271-2019>, 2019.
43. Wunch, D., Toon, G. C., Blavier, J.-F. L., Washenfelder, R. A., Notholt, J., Connor, B. J., Griffith, D. W. T., Sherlock, V., and Wennberg, P. O.: The Total Carbon Column Observing Network, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 369, 2087–2112, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>, 2011.
 44. Yokota, T, Y Yoshida, N Eguchi, Y Ota, T Tanaka, H Watanabe, and S Maksyutov. 2009. 'Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results', *Sola*, 5: 160-63.
 45. 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.
 46. Zhang, RenHe, and XueShun Shen. 2008. 'On the development of the GRAPES—A new generation of the national operational NWP system in China', *Chinese Science Bulletin*, 53: 3429-32.
 47. Zhao, X., Marshall, J., Hachinger, S., Gerbig, C., Frey, M., Hase, F., and Chen, J.: Analysis of total column CO₂ and CH₄ measurements in Berlin with WRF-GHG, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 11279–11302, <https://doi.org/10.5194/acp-19-11279-2019>, 2019.
 48. Zhao, X.; Marshall, J.; Hachinger, S.; Gerbig, C.; Frey, M.; Hase, F.; Chen, J. Analysis of total column CO₂ and CH₄ measurements in Berlin with WRF-GHG. *Atmos. Chem* <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>, 2021.
 37. Skamarock, WC, JB Klemp, J Dudhia, DO Gill, DM Barker, MG Duda, XY Huang, W Wang, and JG Powers. 2008. "A Description of the Advanced Research WRF Version 3, vol." In: NCAR/TN-475+ STR of NCAR Technical Note, Mesoscale and Microscale.
 38. Timofeyev, Y.M.; Nerobelov, G.M.; Virolainen, Y.A.; Poberovskii, A.V.; Foka, S.C. Estimates of CO₂ Anthropogenic Emission from the Megacity St. Petersburg. *Dokl. Earth Sci.* 2020, 494, 753–756. [CrossRef]
 39. Takahashi, Taro, Stewart C Sutherland, Rik Wanninkhof, Colm Sweeney, Richard A Feely, David W Chipman, Burke Hales, Gernot Friederich, Francisco Chavez, and Christopher Sabine. 2009. 'Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans', *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56: 554-77.
 40. Tramontana, Gianluca, Martin Jung, Christopher R Schwalm, Kazuhito Ichii, Gustau Camps-Valls, Botond Ráduly, Markus Reichstein, M Altaf Arain, Alessandro Cescatti, and Gerard Kiely. 2016. 'Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms', *Biogeosciences*, 13: 4291-313.
 41. Viatte, C.; Lauvaux, T.; Hedelius, J.K.; Parker, H.; Chen, J.; Jones, T.; Franklin, J.E.; Deng, A.J.; Gaudet, B.; Verhulst, K.; et al. Methane emissions from dairies in the Los Angeles Basin. *Atmos. Chem. Phys.* 2017, 17, 7509–7528. [CrossRef]
 42. Vogel, F. R., Frey, M., Staufer, J., Hase, F., Broquet, G., XuerefRemy, I., Chevallier, F., Ciais, P., Sha, M. K., Chelin, P., Jeseck, P., Janssen, C., Té, Y., Groß, J., Blumenstock, T., Tu, Q., and Orphal, J.: XCO₂ in an emission hot-spot region: the COCCON Paris campaign 2015, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3271–