

## ارزیابی مدل منطقه‌ای WRF-GHG و مدل جهانی TM3 در مطالعه غلظت ستونی دی‌اکسید کربن روی ایران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT

سمیرا کرباسی<sup>۱</sup>، حسین ملکوتی<sup>۲\*</sup> و امین فضل کاظمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکتری هواشناسی، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، علوم و تکنولوژی محیط زیست، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران  
<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴)

### چکیده

در زمینه گرم شدن کره زمین و تغییرات آب‌وهوایی، کربن‌دی‌اکسید ( $\text{CO}_2$ ) یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که تأثیر بسزایی در روند گرمایش جهانی دارد. به دلیل وضوح افقی کم مدل‌های انتقال جهانی در مناطق قاره‌ای یا ساحلی، شبیه‌سازی گاز کربن‌دی‌اکسید در فواصل زمانی ساعتی/هفتگی با وضوح قائم بیشتر از مهم‌ترین چالش‌های محیطی است. در این مطالعه ضمن گردآوری اطلاعات گسیل کربن‌دی‌اکسید از منابع مختلف، شبیه‌سازی عددی منطقه‌ای غلظت جوی دی‌اکسید کربن با تفکیک مکانی ۳۰ و ۱۰ کیلومتر با استفاده از مدل تحقیقات آب‌وهوا و پیش‌بینی-شیمی (WRF-GHG) انجام و از اطلاعات  $\text{XCO}_2$  بازیابی شده از مشاهدات ماهواره گوست (GOSAT) برای کنترل دقت و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی غلظت ستونی کربن‌دی‌اکسید در فصل گرم (ماه اوت) و سرد (ماه فوریه) در مقایسه با نتایج خروجی مدل جهانی TM3 استفاده شد. عملکرد شبیه‌سازی‌ها در پیش‌بینی غلظت گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید برای دوره مطالعاتی فوریه و اوت در سال ۲۰۱۰ نشان داد تغییرپذیری مکانی و زمانی متغیرهای هواشناسی دما، باد و رطوبت نسبی با ضرایب همبستگی ۹۲٪-۸۶٪، ۷۵٪-۶۷٪ و ۸۲٪-۷۶٪ به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. نتایج ارزیابی نشان داد مدل WRF-GHG با توجه به خطاهای آماری بهتر از مدل جهانی TM3 عمل می‌کند. متوسط خطای آریبی در هر دو ماه گرم و سرد به ترتیب ۰/۷۹- و ۰/۴۵- (۸۵/۰- و ۱۲/۱) در مدل منطقه‌ای (جهانی) است. نتایج ارزیابی همچنین حاکیست تفاوت موجود بین غلظت‌های شبیه‌سازی شده و مشاهدات  $\text{XCO}_2$  از ماهواره GOSAT می‌تواند ناشی از فراتخمین گسیل ناشی از فعالیت‌های انسانی، گسیل اقیانوسی و بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی باشد. این مطالعه نشان داد مدل WRF-GHG قادر است به‌خوبی بسیاری از ویژگی‌های مهم میدان‌های متغیرهای جوی را در جنوب غربی آسیا (منطقه خاورمیانه - ایران) شبیه‌سازی کند و استفاده از آن برای مطالعات آبی در این منطقه کارساز است.

**کلمه‌های کلیدی:** گرمایش جهانی، دی‌اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ )، مدل WRF-GHG، ماهواره GOSAT، مدل TM3، ایران

## ۱ مقدمه

گرمایش جهانی توجه جهانیان را به خود جلب کرده است. غلظت کربن دی‌اکسید جوئی که گاز گلخانه‌ای مهمی محسوب می‌شود، می‌تواند بر روند تحولات آب‌وهوایی مختلف تأثیر بگذارد. این گاز گلخانه‌ای کلیدی اتمسفر با حدود ۶۰٪ از کل اثر، می‌تواند روند تحولات اقلیمی را تحت تأثیر خود قرار دهد. این مهم بر امنیت ملی، جهانی و توسعه اقتصادی پایدار تأثیر جدی خواهد داشت (چین و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸ و هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). بر اساس جدیدترین خبرنامه گازهای گلخانه‌ای سازمان هواشناسی جهانی (۲۰۲۰)، میانگین غلظت جهانی کربن دی‌اکسید اتمسفر به  $4013.2$  ppm در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با  $280$  ppm در دوران پیش از صنعتی شدن افزایش یافته است؛ بنابراین کنترل میزان گسیل کربن دی‌اکسید و کاهش اثر فعالیت انسانی بر گرم شدن آب‌وهوا و درک توزیع مکانی و زمانی کربن دی‌اکسید جوئی بسیار مهم است. تعداد زیادی رصدخانه زمینی در سراسر جهان ساخته شده است که از روش‌های مختلفی برای به‌دست آوردن اطلاعات در زمینه غلظت کربن دی‌اکسید و شار کربن استفاده می‌کنند.

در حال حاضر، گازهای گلخانه‌ای جوئی در سطح جهان با انواع سامانه‌های رصدکننده کنترل می‌شوند. این سامانه‌ها شامل ایستگاه‌های زمینی با مشاهدات منظم و دقیق گونه‌های جوئی؛ اندازه‌گیری‌های درجا؛ نمونه‌گیری فلاسک با هواپیما، کشتی و بالن؛ مشاهدات سنجش از دور اجزای سازنده جو (مانند مشاهداتی که از ماهواره‌ها انجام می‌شود) و همچنین اندازه‌گیری‌های شبکه سطحی مشاهده کل ستون کربن (Total Column Carbon) (Observing Network, TCCON) (تون و همکاران، ۲۰۰۹ و وونچ و همکاران، ۲۰۱۱) هستند؛ با این حال محدودیت اندازه‌گیری‌های مبتنی بر سطح این است که از نمونه‌برداری‌های پراکنده استفاده می‌کنند و توزیع

یکنواختی در سطح جهان ندارند. علاوه بر این توانایی پایش در مقیاس منطقه‌ای محدود است.

اندازه‌گیری اجزای جوئی به صورت مکانی، چالش‌برانگیز است، اما ابزار سنجش از دور چشم‌انداز بی‌نظیری از وضعیت محیط در کوتاه‌مدت و بلندمدت و در سطح محلی و جهانی ارائه می‌دهد (کلرباوکس و همکاران، ۲۰۰۹). در دهه‌های اخیر، با توسعه روش‌های اندازه‌گیری به کمک فناوری‌های سنجش از دور، برای جبران برخی از کمبودهای مشاهدات زمینی از مشاهدات مبتنی بر ماهواره‌ها استقبال شده است. به منظور ارائه مشاهدات پایدار از سطح زمین و جو آن، اولین اندازه‌گیری‌های فضایی برای اندازه‌گیری غلظت گاز کربن دی‌اکسید در سال ۱۹۷۹ و با استفاده از داده‌های NOAA-TOVS (پس از ماهواره هواشناسی قطبی NOAA) صورت گرفت (اسمیت و همکاران، ۱۹۷۹). سنجنده مجهز به حسگر اشعه فرسرخ با وضوح زیاد (High Resolution Infrared Radiation) (Sounder, HIRS)، یکی از سه وسیله‌ای است که در سامانه صوتی عملیاتی (TIROS) (TOVS) نصب شده است و از سری ماهواره‌های خورشید هم‌زمان NOAA است. نتایج نشان می‌دهد اندازه‌گیری‌های صورت گرفته همخوانی خوبی با مقادیر مشاهداتی در سطح و اندازه‌گیری‌های هواپیما دارد (چدین و همکاران، ۲۰۰۲).

سنجنده SCIAMACHY که اولین آشکارساز روی ماهواره تحقیقاتی محیطی آژانس فضایی اروپا (ENVISAT) است، نخستین ابزار فضایی تخصصی بود که به کمک آن نسبت آمیختگی میانگین ستونی کربن دی‌اکسید ( $XCO_2$ ) جو اندازه‌گیری شد (باونسمان و همکاران، ۱۹۹۹). پس از راه‌اندازی سنجنده SCIAMACHY، دقت بهبودیافته در بازیابی گازهای گلخانه‌ای به کمتر از ۱٪ رسید؛ از این رو می‌توان دائم در مقایسه با ابزارهای قبلی از آن استفاده کرد (بوچویتز و باروز، ۲۰۰۴؛ برامستد و همکاران، ۲۰۰۸ و ریوتر و

می‌گیرد. مشخصات بیشتر ابزار OCO-2 در ساکوما و همکاران (۲۰۱۰) شرح داده شده است.

ماهواره رصدکننده گازهای گلخانه‌ای گوست (Greenhouse Gases Observing Satellite, GOSAT) یا ایبوکی (IBUKI) در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ در جزیره تانگاشیمای ژاپن به فضا پرتاب شد (یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹). پروژه گوست تلاش مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط زیست و انجمن ملی مطالعات محیط زیست ژاپن است (میانو و همکاران، ۲۰۱۳). هدف اصلی از اجرای پروژه گوست، برآورد میزان تولید و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه‌قاره‌ای (چند هزار کیلومتر مربع) با دقت بیشتر و همچنین کمک به اداره محیط زیست برای ارزیابی تعادل بوم‌سازگان زمین و ارزیابی تولید و جذب منطقه‌ای است. با تحلیل داده‌های گوست، دانشمندان اطلاعات جدیدی از توزیع جهانی و تغییرات زمانی گازهای گلخانه‌ای و چرخه جهانی کربن و تأثیرات آن بر آب‌وهوا کسب می‌کنند. دقت مشاهدات ارزیابی فراوانی ستون‌های بازیابی شده برای گوست در بیشتر موارد کمتر از یک درصد است (یوشیدا و همکاران، ۲۰۱۱). از این یافته‌های جدید برای پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی آینده و ارزیابی تأثیرات آن استفاده خواهد شد.

در حال حاضر، ماهواره‌های فعال در مدار که به‌طور خاص مشاهدات  $CO_2$  را انجام می‌دهند عبارت‌اند از: ماهواره GOSAT از ژاپن؛ ماهواره OCO-2 از ایالات متحده آمریکا؛ ماهواره TanSat از چین. اهداف این ماهواره‌ها، پایش جهانی بلندمدت و مداوم غلظت  $XCO_2$ ، بهبود دقت اندازه‌گیری منابع گسیل و مخازن کربن و همچنین غلظت منطقه‌ای کربن‌دی‌اکسید و بهبود درک ویژگی‌های توزیعی و تکاملی آنها است (ترنر و همکاران، ۲۰۱۵ و هاکاراینن و همکاران، ۲۰۱۶). یکی دیگر از روش‌های مناسب برای دستیابی به وضوح زیاد توزیع مکانی و زمانی غلظت کربن‌دی‌اکسید، مدل‌های عددی و

همکاران، ۲۰۱۰). با وجود امتیازات و امکانات موجود در سنجنده SCIAMACHY نسبت به سنجنده‌های پیشین، این سنجنده به دلیل نبود یک حالت براق نمی‌تواند اطلاعات دقیقی درباره گازهای موجود روی سطح آب فراهم کند.

سنجنده فروسرخ (Atmospheric Infrared) AIRS روی فضاپیمای Aqua، اولین دستگاه مجهز به TIR است که ابرها را اندازه‌گیری می‌کند. از این سنجنده به‌طور گسترده‌ای برای بازیابی ستونی اجزای تشکیل‌دهنده جوّ مانند  $CO_2$ ،  $CH_4$ ،  $CO$ ،  $SO_2$ ،  $O_3$  و... در محدوده وردسپهر میانی و فوقانی استفاده شده است (چاهین و همکاران، ۲۰۰۸؛ السن و فلمینگ، ۲۰۱۱ و جیانگ و همکاران، ۲۰۱۲). این سرویس که از ۴ مه ۲۰۰۲ در مدار شروع به کار کرده و هنوز هم در حال کار است، توانسته است مقادیر متوسط  $CO_2$  و تغییر مقدار فراوانی آن را در سطحی پذیرفتنی و با دقت ۱٪ یا کمتر ثبت کند (چدین و همکاران، ۲۰۰۲).

دستگاه تداخل‌سنج فروسرخ (IASI Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) ابزار سنجش از دور فروسرخ است که روی ماهواره MetOp-A اروپا قرار دارد. هدف اصلی مأموریت IASI تهیه نمایه‌های دما و رطوبت برای استفاده در پیش‌بینی جوّی و کمی‌سازی اجزای جوّی مانند  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $O_3$  است. دقت محاسبه‌شده در مقیاس زمانی ماهانه، ۲ ppm (۰٪/۵) در مساحت ۵×۵ درجه تخمین زده شده است (کارلسون، ۲۰۱۴).

رصدکننده مدار کربن OCO-2 که بر اساس مأموریت اصلی سنجنده OCO ساخته شده است، تحت نظارت برنامه ESSP (Earth System Science Pathfinder) ناسا توسعه یافته و در پایگاه هوایی واندنبرگ در ۲۴ فوریه ۲۰۰۹ راه‌اندازی شده است (ناسا، ۲۰۱۴). این رصدکننده اولین ابزاری است که فقط غلظت کربن‌دی‌اکسید را اندازه

کیفیت شبیه‌سازی‌های پیش‌رو تا حد زیادی به توانایی ما در نشان دادن ناهمگنی شارهای سطح و رفتار انتقال مدل در اطراف هر سایت بستگی دارد (تولک و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعات اخیر با استفاده از مدل‌های انتقال شیمیایی منطقه‌ای، محدودیت در وضوح افقی مدل را کاهش داده و ناهمگنی شارهای سطح را لحاظ کرده است؛ در نتیجه ساختارهای مؤثر در تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای را شناسایی کرده است (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

تا پیش از این مقاله، در منطقه ایران شبیه‌سازی  $CO_2$  با استفاده از مدل منطقه‌ای انجام نشده بود. این پژوهش بر شبیه‌سازی گسیل و پخش جوّی گاز کربن‌دی‌اکسید در منطقه ایران تمرکز دارد. هدف اصلی در مطالعه حاضر، درک عملکرد مدل در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده در منطقه ایران است. برای این منظور عملکرد مدل-WRF-GHG با سه روش ارزیابی می‌شود: (۱) مقایسه با متغیرهای هواشناسی (دما، رطوبت و باد) اندازه‌گیری‌شده از شبکه پایش ایستگاه‌های دیده‌بانی همدیدی؛ (۲) مقایسه تغییرات روزانه داده‌های میانگین در ماه‌های سرد و گرم؛ (۳) بررسی نتایج خروجی شبیه‌سازی مدل منطقه‌ای WRF-GHG و مدل جهانی TM3 در شبیه‌سازی غلظت کربن‌دی‌اکسید کل در ایران و مقایسه با مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT. در ادامه مقاله، پیکربندی مدل، مواد و روش‌ها در بخش ۲، نتایج و بحث‌ها در بخش ۳ و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه می‌شود.

## ۲ مواد و روش‌ها

در ابتدا با در نظر گرفتن بهترین شرایط اولیه و تنظیم پیکربندی مدل با استفاده از طرح‌واره‌های منتخب مربوط به پارامترهای مورد نظر، شبیه‌سازی گاز آلاینده در بازه زمانی دو ماهه فوریه و اوت (در فصل‌های زمستان و تابستان) تنظیم شد. در این ماه‌ها شرایط آب‌وهوایی خشک و تا حدودی مرطوب است. ارزیابی‌ها نیز در بازه زمانی ۱ تا ۲۸

شیمیایی جوّی است که از داده‌های هواشناسی و داده‌های اولیه مربوط به گاز  $CO_2$  برای نشان دادن فعالیت‌های جوّی و شناسایی سناریوهای گسیل مختلف استفاده می‌کنند.

از شبیه‌سازی عددی انتقال (transport) شیمیایی به گونه‌ای گسترده برای مطالعه و پیش‌بینی کربن‌دی‌اکسید در مقیاس جهانی و منطقه‌ای و همچنین مقایسه با مشاهدات استفاده می‌شود (شیم و همکاران، ۲۰۱۳ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این با ترکیب مدل‌های شیمیایی جوّ و مشاهدات اندازه‌گیری‌شده از غلظت کربن‌دی‌اکسید در شبیه‌سازی، می‌توان شبیه‌سازی را رویکردی مستقیم و مؤثر برای شناسایی منابع و مخازن کربن دانست (پترز و همکاران، ۲۰۰۷؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۵ و تیان و همکاران، ۲۰۱۴). از آنجا که نتیجه مدل، تخمینی از دنیای واقعی است، عملکرد مدل به دقت میدان شار ورودی و سازوکار انتقال مدل محدود می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۸).

از دهه ۱۹۹۰ برای شبیه‌سازی غلظت کربن‌دی‌اکسید از مدل‌های مختلف جهانی استفاده شده است (پاترا و همکاران، ۲۰۰۸). اکثر این مدل‌ها نه تنها تفکیک مکانی خوبی نداشتند، بلکه برخی از آنها پارامترسازی‌های کامل هواشناسی را نیز برای بازسازی درست فرایندهای لایه مرزی جوّی یا همرفت نداشتند (برای مثال، تاگوجی و همکاران، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر، مدل‌های مختلفی از شبیه‌سازی انتقال‌های منطقه‌ای ترکیبات جوّی با وضوح مکانی زیاد توسعه پیدا کرده است (وگل و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل WRF Greenhouse Gas (WRF-GHG) برای شبیه‌سازی انتقال ردیاب‌های غیرفعال  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $CO$  توسعه داده شده است (بک و همکاران، ۲۰۱۱). جهت برآورد شار گسیل و نشست  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $CO$  از چندین مدل شار و سامانه گسیل استفاده می‌شود.

وضوح افقی ۰/۲۵ درجه در ۱۳۷ لایه عمودی و وضوح زمانی شش ساعته استفاده شده است. همچنین اطلاعات سرویس نظارت بر جو کوپرنیکوس (CAMS) برای شرایط اولیه و مرزی میدانهای شیمیایی کربن دی اکسید در WRF-GHG به کار رفته است (ماسارت و همکاران، ۲۰۱۴). اساس داده‌های CAMS، مشاهدات ماهواره‌ای همراه با اندازه‌گیری زمینی است (ورکایک، ۲۰۱۹). CAMS نسبت‌های آمیختگی کربن دی اکسید را با وضوح فضایی ۰/۸° در ۱۳۷ سطح عمودی و وضوح زمانی شش ساعته ارائه می‌کند (در وبگاه <https://atmosphere.copernicus.eu>).

اطلاعات مربوط به ورودی کربن دی اکسید به مدل از چهار چشمه اصلی مختلف در مقیاس جهانی دریافت و مطالعه شده است. منابع مختلف گازهای گلخانه‌ای عبارت‌اند از: گسیل انسان ساخت (anthropogenic emission)؛ گسیل زیست توده (biogenic emission)؛ احتراق زیست توده (biomass burning emission)؛ تبادلات با اقیانوس (ocean emission). در این بخش توضیح مختصری درباره مدل‌های مختلف و موجودی گسیل‌های استفاده شده برای محاسبه شار کربن دی اکسید داده شده به مدل WRF-GHG بیان می‌شود.

برای گسیل گازهای گلخانه‌ای انسان ساخت از بین داده‌های جهانی مانند RETRO، REAS، EDGAR، NEI و غیره، موجودی جهانی گسیل EDGARv5.0 انتخاب شد. این مجموعه که سه گاز اصلی گلخانه‌ای (CO<sub>2</sub>، CH<sub>4</sub> و N<sub>2</sub>O) را در بخش گسیل انسان ساخت و کشور پوشش می‌دهد، با وضوح ۰/۱ در ۰/۱ درجه و در سطح جهانی برای گازهای گلخانه‌ای و گازهای ردیابی برای سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۷۰ به صورت سالانه در دسترس است.

برای معرفی گسیل کربن دی اکسید زیست کره (مبادله خالص زیست کره و جو)، از مجموعه داده‌های NEE.ANN.CRUNCPEv6 با تفکیک مکانی ۰/۵ در

فوریه سال ۲۰۱۰ و ۱ تا ۳۱ اوت سال ۲۰۱۰ انجام می‌شود. سپس با استفاده از سنج‌های آماری، نتایج شبیه‌سازی عددی (WRF-GHG و TM3) غلظت آلاینده CO<sub>2</sub> ارزیابی و میزان سازگاری آن با تصاویر ماهواره‌ای بررسی می‌شود.

## ۲-۱ معرفی مدل عددی جوئی- شیمی (WRF-GHG) و منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه از مدل WRF-Chem نسخه ۳.۹.۱.۱ برای تحقیق و پیش‌بینی آب‌وهوای غیرهیدرواستاتیک و کاملاً متراکم همراه با شیمی با هسته دینامیکی ARW (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸) استفاده شده است (گرل و همکاران، ۲۰۰۵). انگیزه اصلی برای توسعه مدل WRF-GHG استفاده از آن برای شبیه‌سازی‌های منطقه‌ای و انتقال ردیاب منفعل (بدون هیچ واکنش شیمیایی) با وضوح زیاد، نه تنها برای گاز کربن دی اکسید بلکه برای متان (CH<sub>4</sub>) و کربن مونوکسید (CO) است. اتصال مدل GHG به مدل WRF با نسخه WRFV3.1.1 آغاز شد. اصلاحات اخیر مورد نیاز برای توزیع کد WRF-GHG در نسخه رسمی WRF-Chem از نسخه ۳.۴ به بعد، از پیش تعریف شده است.

حوزه مورد نظر از دو دامنه (تودرتو) تشکیل شده است که تعداد نقاط شبکه افقی آنها برابر ۱۷۳×۱۲۴ و ۲۲۲×۲۱۳ است. فاصله نقاط، ۳۰ کیلومتر برای دامنه درشت‌تر (d01) و ۱۰ کیلومتر برای دامنه دوم (d02) است که به ترتیب، منطقه خاورمیانه و ایران را شامل می‌شود (شکل ۱). جزئیات کامل مربوط به پیکربندی مدل، تعداد نقاط شبکه و تفکیک افقی و قائم برای هر دو دامنه به همراه جزئیات مربوط به شرایط شبیه‌سازی عددی در جدول ۱ آورده شده است.

در این مطالعه، ۳۷ تراز سیگمای قائم با بالاترین سطح در ۶۵ هکتوپاسکال در نظر گرفته شد. برای تأمین شرایط اولیه و مرزی میدان‌های هواشناسی از داده‌های بازتحلیل ERA5 با

ارومیه)، ساحلی (بندرعباس، رشت) و هموار (اراک، شیراز، اصفهان، اهواز) با پراکندگی مناسب از مجموعه مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی انتخاب شدند (شکل ۳). نتایج پارامترهای ارزیابی ذکر شده با استفاده از مقایسه متغیرهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (جدول ۵) در بازه زمانی ۱ فوریه تا ۲۸ فوریه و ۱ اوت تا ۳۱ اوت سال ۲۰۱۰ تحلیل شد.

### ۲-۲ معرفی مدل عددی جوئی - شیمی (TM3)

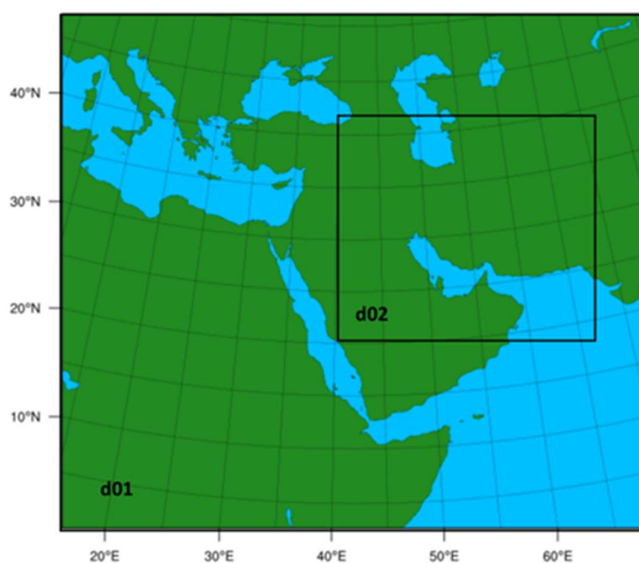
مدل دیگر مورد استفاده در این مطالعه، مدل جهانی TM3 (The atmospheric tracer model) (ردنیک و همکاران، ۲۰۰۳) با وضوح افقی  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  است. این مدل ۱۹ سطح عمودی از سطح زمین تا وردایست (تروپوپاز) دارد و از داده‌های NCEP/NCAR\_V6 برای ورودی هواشناسی استفاده می‌کند. وضوح زمانی خروجی مدل جهانی غلظت کربن‌دی‌اکسید سه ساعت است. هدف از افزودن این مدل جهت مقایسه با مشاهدات ماهواره گوست، بررسی بهبود شبیه‌سازی تغییرپذیری کربن‌دی‌اکسید ناشی از افزایش وضوح است.

۰/۵ درجه در بازه زمانی روزانه استفاده شده است (ترامونتانا و همکاران، ۲۰۱۶).

با استفاده از سامانه گسیل آتش‌سوزی (Global Fire Assimilation System, GFAS)، گسیل گازهای ردیاب و ذرات معلق در هوا ناشی از سوختن زیست‌توده محاسبه شد. پوشش داده‌های موجود، جهانی است. وضوح مکانی داده‌ها ۰/۱ درجه و وضوح زمانی آن روزانه است (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/gl-obal-fire-assimilation-system>).

مجموعه داده‌های شار کربن‌دی‌اکسید اقیانوسی از شبکه پایش Carboscope (<https://www.bgc-jena.mpg.de/CarboScope/>) با وضوح مکانی  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  و وضوح زمانی روزانه بارگیری شده است (تاکاهاشی و همکاران، ۲۰۰۹).

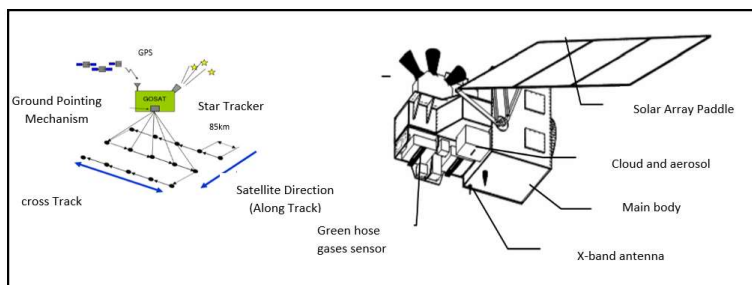
سه متغیر کلیدی هواشناسی شامل دمای هوا (Air Temperature, AT)، رطوبت نسبی (Relative Humidity, RH) و سرعت باد (Wind Speed, WS) مربوط به ده ایستگاه منتخب از مناطق کوهستانی (تهران، مشهد، تبریز،



شکل ۱. حوزه مطالعاتی استفاده شده در شبیه‌سازی WRF-GHG.

جدول ۱. پیکربندی مدل WRF-GHG شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده (بالا، ۲۰۱۲).

WSM 3-class (هونگ و همکاران، ۲۰۰۴)	میکروفیزیک
Long Wave: RRTM (ملاور و همکاران، ۱۹۹۹)	تابش
Short Wave: Dudhia scheme (دودهیا، ۱۹۸۹)	
Mellor-Yamada-Janjic (یانجک، ۱۹۹۴)	لایه مرزی
Noah Land Surface Model (چن و دودهیا، ۲۰۰۱)	مدل سطح
Monin-Obukhov (Janjic) scheme (منین و اباخوف، ۱۹۵۴)	لایه سطح
Grell-Freitas ensemble scheme (گرل و دونی، ۲۰۰۲)	فیزیک ابر
Greenhouse Gas tracer emissions	شیمی
CAMS (0.8)-ERA5 (0.25)	شرایط اولیه و مرزی
۲۰۱۰-۰۲-۲۸_۰۰:۰۰ تا ۲۰۱۰-۰۲-۰۱_۰۰:۰۰ و ۲۰۱۰-۰۸-۳۱_۰۰:۰۰ تا ۰۱-۰۸-۲۰۱۰_۰۰:۰۰	دوره زمانی
d01: ۳۰km (۱۷۳×۱۲۴) d02: ۱۰km (۲۲۲×۲۱۳)	تفکیک افقی (نقاط شبکه)



شکل ۲. اجزای تشکیل‌دهنده سنجنده گوست در مدار (برگرفته از یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۲-۳ ماهواره GOSAT

جذب منطقه‌ای است. با تحلیل داده‌های گوست، دانشمندان اطلاعات جدیدی درباره توزیع جهانی و تغییرات زمانی گازهای گلخانه‌ای و چرخه جهانی کربن و تأثیر آن بر آب‌وهوا کسب می‌کنند. از این یافته‌های جدید برای پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی آینده و ارزیابی آثار آن استفاده خواهد شد. داده‌های تولیدشده از داده‌های خام ماهواره گوست با الگوریتم NIES تولید می‌شوند و تبدیل آنها به داده‌های غلظت گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید و متان از وبگاه داده‌های گوست برداشت شده است (<https://data2.gosat.nies.go.jp/GosatDataArchiveS>). در این وبگاه داده‌ها به صورت رایگان و در بازه‌های زمانی روزانه و میانگین در دسترس عموم قرار دارد (شکل ۲).

در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ آژانس فضایی ژاپن ماهواره گوست را با موفقیت پرتاب کرد. این ماهواره که اولین ماهواره‌ای است که به‌طور خاص برای نظارت هم‌زمان بر غلظت  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}_2$  از فضا استفاده می‌شود، در ارتفاع ۶۶۶ کیلومتری از زمین در مدار قرار دارد. گوست می‌تواند طیف جذب گاز نور بازتاب‌شده را در ناحیه فروسرخ موج کوتاه (SWIR) (۰/۷۶، ۱/۶ و ۲/۰ میکرومتر) و باند حرارتی فروسرخ (TIR) (۵/۵ تا ۱۴/۳ میکرومتر) تشخیص دهد (کوز و همکاران، ۲۰۰۹ و یوکوتا و همکاران، ۲۰۰۹). هدف اصلی از اجرای پروژه گوست، برآورد تولید و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه‌قاره‌ای (چند هزار کیلومتر مربع) با دقت بیشتر و همچنین کمک به اداره محیط زیست جهت ارزیابی تعادل بوم‌سازگان زمین و ارزیابی تولید و

## ۲-۴ معرفی مدل عددی جوّی- شیمی (WRF-

## GHG) و منطقه مورد مطالعه

ارزیابی اخیر عملکرد الگوریتم‌های بازایی NIES، ACOS و Remo Tec برای مشاهدات پایه ماهواره گوست روی منطقه عرض میانه (بین عرض‌های جغرافیایی ۰ و ۷۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۱۷۰ درجه شرقی و ۱۲۰ درجه غربی)، نشان از برتری کیفی الگوریتم‌های بازایی NIES دارد (کرباسی و همکاران، ۲۰۲۲). بر همین اساس، در این مطالعه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های WRF-GHG و بررسی آماری غلظت ستونی گازهای گلخانه‌ای مدنظر (CO<sub>2</sub>) در نقاطی که داده‌های سنجش از دور (داده‌های سنجنده گوست) وجود دارد، از مجموعه محصولات سطح دو تولیدشده با الگوریتم NIES استفاده شد. در این پژوهش، از مجموعه داده‌های سطح دو (کسر

مولی هوای خشک از مقادیر متوسط میانگین ستونی

جدول ۲. سنجش‌های ارزیابی مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی.

شاخص ارزیابی	معادله	بهترین مقدار
خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i^* - O_i)^2}$	۰
ارایی میانگین (MBE)	$BIAS = (M_i^* - O_i)$	۰
ضریب همبستگی (R)	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(M_i^* - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i^* - \bar{M})^2}}$	۱
خطای میانگین مطلق (MAE)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n  M_i - O_i }{N}$	۰

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده متغیرهای هواشناسی برحسب میانگین ماهانه (اوت- فوریه).

میانگین ایستگاه‌ها	زمستان (فوریه)			تابستان (اوت)		
	RH (%)	AT(°C)	WS(m/s)	RH (%)	AT(°C)	WS(m/s)
همبستگی (R)	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۸۶	۰/۶۷
خطای اریبی	-۳/۵۹	-۰/۳۸	۱/۲۹	-۲/۶۰	-۰/۵۴	۰/۸۲
خطای RMSE	۱۰/۴	۲/۳۷	۲/۲۹	۱۱/۳۷	۳/۸۶	۲/۹۰

[XCO<sub>2</sub>] تولیدشده با الگوریتم NIES به‌عنوان مقادیر واقعی برای ارزیابی مقادیر ستونی شبیه‌سازی‌شده با مدل منطقه‌ای WRF-GHG و جهانی TM3 استفاده می‌شود. وبگاه حاوی

داده‌ها [https://data2.gosat.nies.go.jp/index\\_en.html](https://data2.gosat.nies.go.jp/index_en.html) است.

در حال حاضر، مقادیر متناظر زمانی و مکانی شبیه‌سازی متغیرهای جوّی و شیمیایی استخراج می‌شوند و می‌توان آنها را با استفاده از روش‌های آماری مختلف مقایسه کرد. این فرایند برای داده‌های فصل خشک و مرطوب انجام می‌شود. معیارهای آماری مختلفی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی و کمی‌سازی خطاها در متغیرهای هواشناسی و شیمیایی لحاظ می‌شود؛ برای نمونه می‌توان از خطای میانگین اریبی (MBE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) نام برد (جدول ۲).



## ۳ نتایج و بحث

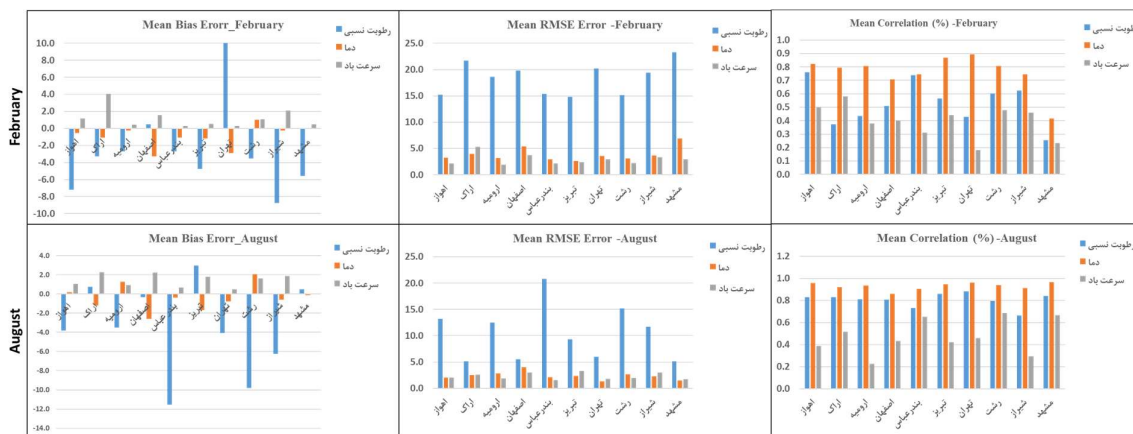
## ۳-۱ ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی WRF-

## GHG میدان‌های هواشناسی

ارزیابی و کمی‌سازی اعتبار میدان‌های هواشناسی شبیه‌سازی شده با مدل عددی WRF-GHG از دمای دو متری، سرعت باد تراز ده متر و رطوبت نسبی تراز دو متری با استفاده از پارامترهای اعتبارسنجی انجام شده است (جدول ۳). از ارزیابی‌ها می‌توان دریافت دمای دو متری، بهترین مقادیر R را برای هر دو ماه در همه ایستگاه‌های مشاهداتی دارد. اگر از ایستگاه مشهد در زمستان چشم‌پوشی شود، مقادیر همبستگی دمای دو متری بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۶ و ۰/۷ تا ۰/۸۹ به ترتیب در زمستان و تابستان متغیر است و مقادیر خطای RMSE نسبت به دیگر پارامترها کمتر است (در ماه سرد و گرم به‌طور میانگین ۲/۳۷ و ۳/۸۶ است). میزان میانگین خطای اریبی در ماه‌های سرد و گرم به ترتیب ۰/۳۸- و ۰/۵۴- است. پس از دما، بهترین مقادیر R را رطوبت نسبی دارد. اگر از ایستگاه‌های ارومیه، مشهد، اراک و تهران در ماه سرد چشم‌پوشی شود، R در طول هر دو ماه از ۰/۷۲ تا ۰/۸۸ متغیر است. میانگین خطای اریبی برای رطوبت نسبی با صرف نظر کردن از ایستگاه تهران در زمستان و بندرعباس در تابستان، برابر ۲/۶- و ۳/۵۹- در

تابستان و زمستان است. مقادیر R در سرعت باد ده متری، کمتر از مقادیر آن برای رطوبت نسبی است، البته RMSE آن نیز مقادیر کمتری دارد (به‌طور متوسط در دو ماه سرد و گرم به ترتیب ۲/۲۹ و ۲/۹۰) که تفاوت چندانی با مقادیر آن برای دمای دو متری ندارد. مقادیر میانگین خطای اریبی در دو ماه سرد و گرم به‌طور متوسط ۱/۲۹ و ۰/۸۲ است.

مدل توانسته است تغییرات زمانی دمای سطح، رطوبت نسبی و سرعت باد را با خطاهای آماری محاسبه‌شده برای همه اندازه‌گیری‌ها تا حد درستی محاسبه کند (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، تمایل کلی مدل، فروتخمین دما و رطوبت نسبی مشاهده‌شده برای دوره زمانی انتخابی است. به‌طور کلی در مقایسه با مشاهدات، میانگین محاسبه‌شده دمای قبل از ظهر، فروتخمین و میانگین محاسبه‌شده دمای بعد از ظهر فراتخمین است. شکل ۳ همچنین نشان می‌دهد در هر دو ماه گرم و سرد در بیشتر قسمت‌ها، رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده فروتخمین است. بررسی تمام سی روز در دو ماه نشان می‌دهد در فصل تابستان مقادیر مدل به مشاهدات نزدیک‌تر است. بازه تغییرات سرعت باد پیش‌بینی شده در بیشتر اوقات با مقادیر سرعت باد حاصل از اندازه‌گیری سازگار است. بر اساس شکل ۳ در اکثر قسمت‌ها سرعت باد فراتخمین است.



شکل ۳. مقایسه سری ماهانه متغیرهای هواشناسی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده با مدل WRF-GHG شامل دما (°C)، رطوبت نسبی (%). و سرعت باد (m/s) در تمام ایستگاه‌های همدیدی برای ماه‌های فوریه و اوت.

### ۲-۳ ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی غلظت $CO_2$ (WRF-GHG و TM3) و داده‌های ماهواره‌ای (GOSAT)

در بخش‌های پیشین تأثیر احتمالی خطاهای تخمین زده شده در پارامترهای هواشناسی بر شبیه‌سازی غلظت گونه‌های شیمیایی به صورت کیفی و جداگانه برای هر پارامتر بررسی شد. در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای تعیین کمیت خطاها در شبیه‌سازی‌های شیمی با ترکیب خطاها در پارامترهای هواشناسی ارائه می‌شود.

در جدول ۴ با استفاده از میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب همبستگی پیرسون (R)، نتایج ارزیابی آماری عملکرد مدل WRF-GHG در دامنه دوم (ایران) به همراه سازوکار شیمی فاز گازی GHG و مدل جهانی TM3 در شبیه‌سازی غلظت کربن دی‌اکسید در برابر

مقادیر اندازه‌گیری شده با ماهواره گوست در دو ماه فوریه و اوت نشان داده شده است.

از بررسی نتایج در جدول ۲ می‌توان دریافت با توجه به سنجش‌های MBE و RMSE، مدل WRF-GHG در شبیه‌سازی کربن دی‌اکسید در ماه سرد بهتر از ماه گرم عمل می‌کند. رابطه بین مقادیر بازیابی شده از ماهواره GOSAT و مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده در ستون هوا حاکی از وجود همبستگی (R) بسیار قوی (با شاخص توافق بیشتر از ۰/۸۷ در تابستان) بین GOSAT و مقادیر شبیه‌سازی شده در دو ماه فوریه و اوت است. گفتنی است مقادیر خطاها در مدل WRF-GHG کمتر از مدل جهانی TM3 است که با توجه به قدرت تفکیک مدل جهانی و درونیابی داده‌های مدل جهانی در نقاط مشاهداتی ماهواره گوست دور از انتظار نیست.

جدول ۴. اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده  $CO_2$  (با مدل‌های WRF-GHG و TM3) و مقادیر مشاهداتی ماهواره گوست

سنجش‌های آماری	ماه	مدل عددی	MAE	RMSE	MBE	R
$CO_2$ (PPMV)	فوریه	WRF-GHG	۱/۴۳	۱/۶۳	-۰/۷۹	۰/۷۱
	اوت		۱/۸۱	۱/۹۶	۰/۴۵	۰/۸۷
	فوریه	TM3	۱/۵۶	۱/۹۱	-۰/۸۵	۰/۲۴
	اوت		۱/۹۸	۲/۰۱	۱/۱۲	۰/۳۴

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تغییرات فصلی در غلظت گازها در ایران به خوبی با مدل شبیه‌سازی شده است. مقادیر میانگین ماهانه غلظت ستونی برحسب واحد PPMV است. تغییرات مکانی و زمانی توزیع غلظت که با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده مدل به دست آمده است، مشابه تغییراتی است که در داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود. نتایج مدل و بازیابی GOSAT نشان می‌دهد غلظت به طور کلی از تابستان به زمستان افزایش می‌یابد.

بررسی نقشه‌ها در ماه اوت، غلظت زیاد گازهای گلخانه‌ای را در نواحی جنوبی و مرکزی نشان می‌دهد. این

در شکل ۴ توزیع مکانی غلظت گازهای گلخانه‌ای ( $CO_2$ ) بازیابی شده از مشاهدات ماهواره گوست و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های منطقه‌ای و جهانی (WRF-GHG و TM3) در طول زمستان (فوریه) و تابستان (اوت) سال ۲۰۱۰ به صورت جمع ستونی نشان داده شده است. به دلیل پوشش ضعیف مجموعه داده‌های GOSAT و داده‌های مدل جهانی، پهنه‌بندی توزیع غلظت برای ترسیم در تمام نقاط دامنه مورد نظر درونیابی شده است. گفتنی است در این مطالعه داده‌های موجود از ماهواره گوست در ماه گرم نسبت به ماه سرد پوشش بسیار ضعیف‌تری دارد.

و مقادیر پس‌زمینه است که با داده‌های CAMS ایجاد و سبب افزایش نسبت اختلاط گازهای آلاینده مورد نظر در مقایسه با داده‌های مشاهداتی گوست در حوزه مطالعاتی می‌شود. دلیل دیگر اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر متناظر آن در مشاهدات، ممکن است سوگیری در جهت شبیه‌سازی شده باد و الگوی انتخابی گسیل ساعتی باشد؛ با این حال، مقادیر فروتخمین یا فراتخمین ممکن است ناشی از سایر متغیرهای هواشناسی مانند سرعت و دمای باد باشد؛ زیرا مدل قادر به شبیه‌سازی کاملاً دقیق متغیرهای هواشناسی نیست.

عدم قطعیت در گسیل شیمیایی مدل در مکان‌های مختلف (برای مثال، مناطق روستایی، شهری یا حومه) و عوامل هواشناسی مؤثر بر غلظت‌ها سبب نیاز به بهبود پیش‌بینی‌های هواشناسی به‌ویژه خطاهای بزرگ در پیش‌بینی سرعت باد می‌شود. باد عامل مهمی در انتقال آلاینده‌ها است و بر فرایندهای دیگر مانند رسوب خشک (dry deposition) تأثیر می‌گذارد. اشتباه در تعیین سرعت باد و جهت باد می‌تواند به نمایش ضعیف انتقال و اختلاط منجر شود. تغییرات هواشناسی می‌تواند به نوبه خود سبب واکنش‌های فتولیتیک شود. یکی از راه‌های بهبود چنین شبیه‌سازی‌هایی گنجاندن میزان گسیل بهتر کربن‌دی‌اکسید اولیه و میدان‌های اولیه پیش‌زمینه (background) کربن‌دی‌اکسید و همچنین روش‌های گنجاندن جذب داده است. مقادیر گسیل دقیق نیز برای بهبود کیفیت شبیه‌سازی هوا ضروری است. حالت ایدئال، ورود گسیل مستمر در زمان واقعی (continuous real-time emission) به مدل‌ها است؛ با وجود این ممکن است این شرایط همیشه امکان‌پذیر نباشد و خطاهایی در برآورد گسیل انسانی و زیست‌توده ایجاد شود که باید به حداقل برسد.

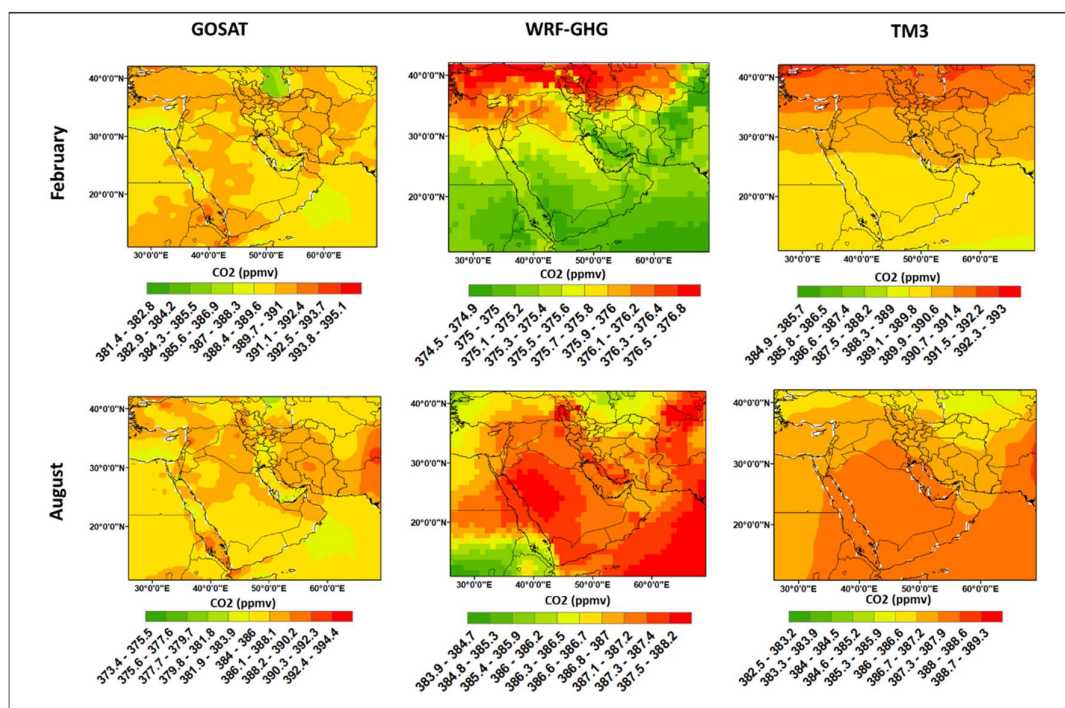
با توجه به توزیع مکانی منابع گسیل در شکل ۴، گسیل‌های انسانی گازهای گلخانه‌ای در فصول گرم و سرد سال، مناطق غرب خلیج فارس را در حوزه شبیه‌سازی این

نواحی در ماه اوت تحت تأثیر برهم‌کنش کم‌فشار حرارتی و مونسون هند، رودباد تراز پایین ۱۲۰ روزه شمالی سیستان در شرق کشور و برهم‌کنش کم‌فشار حرارتی و پرفشار عربستان، رودباد تابستانه شمال روی غرب و رشته‌کوه زاگرس هستند. در این مناطق فرونشست‌های مربوط به گردش عمومی جو، به ماندگاری و بازگردش کربن‌دی‌اکسید در گردش‌های منطقه‌ای و محلی منجر می‌شود. مناطقی که درگیر فرونشست هوا هستند، نسبت به مناطقی که صعود هوا را تجربه می‌کنند، پتانسیل بیشتری برای غلظت‌های بیشتر ستونی کربن‌دی‌اکسید دارند.

با بررسی ماه فوریه مشاهده می‌شود در ماه سرد، عرض‌های شمالی دریای خزر غلظت بیشتری دارند. در این ماه عمده باد غالب در غرب آسیا در منطقه مورد نظر، بادهای غربی هستند و منابع آلودگی اصلی طبق نقشه‌های مدل جهانی، به‌طور میانگین در عرض‌های بالاتر از دریای خزر و نواحی شمال شرقی هستند. شرایط همدیدی ایران در ماه‌های ژانویه و فوریه متأثر از نفوذ جت قطبی به عرض‌های میانی و عبور سامانه‌های کم‌فشار غربی است. صعود منطقه‌ای هوا با عبور سامانه کم‌فشار دینامیکی مدیترانه‌ای همراه است. در این شرایط، نواحی صعود و نزول هوا به‌ویژه در جنوب ایران قدرت زیادی دارند که از توپوگرافی منطقه متأثر است. این شرایط ناشی از بالا رفتن حجم استفاده از وسایل گرمایشی و مصارف خانگی در فصل سرد و جذب زیاد کربن‌دی‌اکسید در فصل رشد (growing season) درختان است؛ با این حال، برخی اختلافات بین توزیع مکانی شبیه‌سازی شده و داده‌های بازیابی شده گوست را در هر دو فصل می‌توان تشخیص داد. اختلاف بین نسبت اختلاط کربن‌دی‌اکسید حاصل از شبیه‌سازی عددی و مشاهدات دلایل متعددی دارد که یکی از آنها ندانستن میزان دقیق گسیل آلاینده‌ها به‌عنوان گسیل ورودی به مدل در حوزه مطالعه است. یکی دیگر از دلایل، وجود خطا در مقادیر شبیه‌سازی شده کربن‌دی‌اکسید با مدل

نشان می‌دهند. منابع گسیل زیست کره شامل دو بخش اصلی جذب و گسیل می‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود، سهم جذب در زمستان کمتر از تابستان است.

پژوهش پوشش می‌دهند. گسیل انسانی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و سوخت فسیلی است. برای آلاینده کربن‌دی‌اکسید، منابع گسیل انسان‌زا چرخه فصلی متمایزی را با بیشترین مقدار در زمستان و کمترین مقدار در تابستان



شکل ۴. توزیع مکانی غلظت گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> حاصل از شبیه‌سازی عددی با مدل‌های WRF-GHG و TM3. ردیف اول، ماه فوریه و ردیف دوم، ماه اوت سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد.

گلخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه، یافته‌های مهم این پژوهش عبارت‌اند از:

(۱) این مدل قادر است تغییرات زمانی دمای سطح، رطوبت نسبی و باد را بازتولید کند. مقایسه داده‌های ماهواره گوست با نتایج مدل WRF-GHG و خروجی شبیه‌سازی جهانی مدل TM3 نشان می‌دهد هر دو مدل نسبت به مشاهدات ماهواره‌ای، غلظت کربن‌دی‌اکسید را در ماه سرد، کمتر و در ماه گرم، بیشتر تخمین زده‌اند؛

(۲) با توجه به خطاهای آماری RMSE و MAE، نتایج ارزیابی حاکیست مدل در فصل سرد (ماه فوریه) بهتر از

#### ۴ نتیجه‌گیری

گسیل انسانی گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در هوا به دلیل رشد سریع در اقتصاد، صنایع، حمل‌ونقل و شهرنشینی به‌طور چشمگیری در منطقه آسیا افزایش یافته است (بیگ و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعه حاضر جهت درک منطقه‌ای از گسیل گازهای گلخانه‌ای و با هدف شبیه‌سازی گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید با استفاده از یک مدل تحقیقاتی جدید پیش‌بینی برخط آب‌وهوا که با شیمی (WRF-GHG) توسعه یافته است، برای منطقه خاورمیانه انجام شده است. با توجه به بررسی توزیع و تغییرپذیری گازهای

## منابع

- Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Körner, S., Rödenbeck, C., Bousquet, P., and Ramonet, M., 2009, Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO<sub>2</sub> transport models with coastal tower measurements of CO<sub>2</sub>: *Biogeosciences*, **6**(5), 807–817.
- Bovensmann, H., Burrows, J. P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V. V., Chance, K. V., and Goede, A. P. H., 1999, SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 127-150.
- Buchwitz, M., Rozanov, V. V., and Burrows, J. P., 2000, A near-infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub>O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**, 15231-15245.
- Chédin, A., Hollingsworth, A., Scott, N. A., Serrar, S., Crevoisier, C., and Armante, R., 2002, Annual and seasonal variations of atmospheric CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CO concentrations retrieved from NOAA/TOVS satellite observations: *Geophysical Research Letters*, **29**, 110-1-110-4.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity: *Monthly Weather Review*, **129**(4), 569-585.
- Diao, Y. W., Huang, J. P., Liu, C., Cui, J., and Liu, S. D., 2015, A modeling study of CO<sub>2</sub> flux and concentrations over the Yangtze River Delta using the WRF-GHG model: *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, **39**, 849–860.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter Monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **46**, 3077-3107, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2).
- Fischer, M. L., Parazoo, N., Brophy, K., et al., 2017, Simulating estimation of California fossil fuel and biosphere carbon dioxide exchanges combining in-situ tower and satellite column observations: *Journal of Geophysical Research*, **122**, 3653–3671.
- Grell, G. A., and Devenyi, D., 2002, A generalized approach to parameterizing convection
- فصل گرم (ماه اوت) عمل می کند؛
- ۳) از مقایسه سنج‌های آماری می‌توان دریافت دقت مدل WRF-GHG بیشتر از دقت مدل جهانی TM3 است. این موضوع نشان می‌دهد افزایش وضوح باعث بهبود شبیه‌سازی تغییرپذیری کربن‌دی‌اکسید می‌شود؛
- ۴) خطاهای شبیه‌سازی کربن‌دی‌اکسید را می‌توان به عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی اجزای مختلف ورودی سامانه گسیل کربن‌دی‌اکسید نسبت داد. بدیهی است بهبود شبیه‌سازی پارامترهای مختلف داده‌گواری شده به مدل به‌عنوان گسیل اولیه کربن‌دی‌اکسید می‌تواند سبب بهبود شبیه‌سازی کربن‌دی‌اکسید شود؛
- ۵) منابع احتمالی خطا در اجزای کربن‌دی‌اکسید پیش-بینی شده شامل عدم قطعیت در گسیل انسانی و زیست‌توده، مقادیر غلظت پس‌زمینه به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی میدان‌های شیمیایی آلاینده‌ها و مقادیر پس‌زمینه میدان‌های هواشناسی وابسته به پیش‌بینی‌های هواشناسی است.
- تشکر و قدردانی**
- نگارندگان کمال تشکر را از سازمان هواشناسی کشور برای همکاری سازنده و در اختیار قرار دادن داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی منتخب دارند. این تحقیق با حمایت مالی بنیاد ملی علوم ایران (INSF)، تهران، ایران (شماره کمک‌هزینه: ۹۸۰۱۲۷۵۲) به انجام رسیده است. داده‌های NIES XCO<sub>2</sub>، نسخه ۲.۹۵ گزارش شده در این مقاله در بخش ۲ برگرفته از داده‌های GOSAT است. این داده‌ها از سرویس بایگانی داده GOSAT (GDAS) در <https://data2.gosat.nies.go.jp> استخراج شده است. نویسندگان از اعضای آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن (JAXA)، مؤسسه ملی مطالعات محیط زیست ژاپن (NIES) و وزارت محیط زیست ژاپن (MOE) تشکر می‌کنند.

- combining ensemble and data assimilation techniques: *Geophysical Research Letters*, **29**, 1693, <http://dx.doi.org/10.1029/2002gl015311>.
- Hakkarainen, J., Jalongo, I., and Tamminen, J., 2016, Direct space-based observations of anthropogenic CO<sub>2</sub> emission areas from OCO-2: *Geophysical Research Letters*, **43**, 11400–11406.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., and Chen, S. H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation: *Monthly Weather Review*, **132**, 103-120, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2).
- Houweling, S., Breon, F. M., Aben, I. Rödenbeck, C., Gloor, M., Heimann, M., and Ciais, P., 2004, Inverse modeling of CO<sub>2</sub> sources and sinks using satellite data: a synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **4**(2), 523-538.
- Jain, N., Bhatia, A., Pathak, H., Gupta, N., Sharma, D. K., and Kaushik, R., 2015, Greenhouse gas emissions and global warming: Introduction to Environmental Sciences (TERI Press).
- Janjic, Z. I., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes: *Monthly Weather Review*, **122**, 927-945, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2).
- Jiang, X., Ruzmaikin, A., Olsen, E., Nguyen, H., and Pagano, T., 2012, Correlations of the seasonal variability of AIRS mid-tropospheric CO<sub>2</sub> with MODIS derived Gross Primary Productivity (GPP): Pasadena, CA, Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration.
- Kadygrov, N., Maksyutov, S., Eguchi, N., Aoki, T., Nakazawa, T., Yokota, T., and Inoue, G., 2009, Role of simulated GOSAT total column CO<sub>2</sub> observations in surface CO<sub>2</sub> flux uncertainty reduction: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**(D21).
- Karbasi, S., Malakooti, H., Rahnama, M., and Azadi, M., 2022, Study of mid-latitude retrieval XCO<sub>2</sub> greenhouse gas: Validation of satellite-based shortwave infrared spectroscopy with ground-based TCCON observations: *Science of the Total Environment*, **836**, 155513.
- Karlsson, K. G., and Dybbroe, A., 2010, Evaluation of Arctic cloud products from the EUMETSAT Climate Monitoring Satellite Application Facility based on CALIPSO-CALIOP observations: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**, 1789-1807.
- 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.
- Liu, Y., Yue, T., Zhang, L., Zhao, N., Zhao, M., and Liu, Y., 2018, Simulation and analysis of XCO<sub>2</sub> in North China based on high accuracy surface modeling: *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(27), 27378-27392.
- 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.
- Mlawer, E. J., Steven, J., Taubman, P., Brown, D., Iacono, M. J., and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: *Journal of Geophysical Research*, **102**, 16663–16682.
- Monin, A. S., and Obukhov, A. M., 1954, Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere: *Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences, USSR*, **24**, 163-187.
- Morino, I., Matsuzaki, T., and Shishime, A., 2014, TCCON data from Tsukuba (JP), 125HR, Release GGG2014R0, TCCON data archive, hosted by the Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. DOI: [10.14291/tcon.ggg2014.tsukuba02.R0/1149301](https://doi.org/10.14291/tcon.ggg2014.tsukuba02.R0/1149301).
- Neue, H. U., Gaunt, J. L., Wang, Z. P., Becker-Heidmann, P., and Quijano, C., 1997, Carbon in tropical wetlands: *Geoderma*, **79**, 163-185.
- Olsen, F. O., 2011, Laser cutting from CO<sub>2</sub> laser to disc or fiber laser—possibilities and challenges: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 6-15, Laser Institute of America.
- Peng, Z., Zhang, M., Kou, X., Tian, X., and Ma, X., 2015, A regional carbon data assimilation system and its preliminary evaluation in East Asia: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 1087–1104.

- Peters, W., Jacobson, A. R., Sweeney, C., et al., 2007, An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker: Proceeding of National Academy Sciences, USA/PNAS, **104**, 18925–18930.
- Reuter, S., Gupta, S. C., Chaturvedi, M. M., and Aggarwal, B. B., 2010, Oxidative stress, inflammation, and cancer: how are they linked?: Free Radical Biology and Medicine, **49**, 1603-1616.
- Riese, M., Ploeger, F., Rap, A., Vogel, B., Konopka, P., Dameris, M., and Forster, P., 2012, Impact of uncertainties in atmospheric mixing on simulated UTLS composition and related radiative effects: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **117**(D16).
- Shim, C., Lee, J., and Wang, Y. X., 2013, Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia: Atmospheric Environment, **79**(7), 853–860.
- Stocker, T., Dahe, Q., and WGITSU Team, 2013, Highlights of the new IPCC report: Climate Change.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., et al., 2009, Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea–air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans: Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, **56**, 554-577.
- Tian, X., Xie, Z., Liu, Y., Cai, Z., Fu, Y., Zhang, H., and Feng, L., 2014, A joint data assimilation system (Tan-Tracker) to simultaneously estimate surface CO<sub>2</sub> fluxes and 3-D atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations from observations: Atmospheric Chemistry and Physics, **14**, 13281–13293.
- Toon, G., Blavier, J. F., Washenfelder, R., et al., 2009, Total column carbon observing network (TCCON): Fourier Transform Spectroscopy, JMA3, Optical Society of America.
- Tramontana, G., Jung, M., Schwalm, C. R., et al., 2016, Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms: Biogeosciences, **13**, 4291-4313.
- Turner, A. J., Jacob, D. J., Wecht, K. J., et al., 2015, Estimating global and North American methane emissions with high spatial resolution using GOSAT satellite data: Atmospheric Chemistry and Physics, **15**, 4495–4536.
- Verma, S., Kim, B., Jhong, H., Ma, S., and Kenis, P. J. A., 2016, A gross-margin model for defining technoeconomic benchmarks in the electroreduction of CO<sub>2</sub>: ChemSusChem, **9**, 1972-1979.
- Wang, K., Jiang, H., Zhang, X. Y., and Zhou, G. M., 2011, Analysis of spatial and temporal variations of carbon dioxide over China using SCIAMACHY satellite observations during 2003-2005: International Journal of Remote Sensing, **32**, 815–832.
- Wang, Y. A., Lu, D. R., Li, Q., Duan, M. Z., Hu, F., and Hu, S. X., 2014, Observed and simulated features of the CO<sub>2</sub> diurnal cycle in the boundary layer at Beijing and Hefei, China: Chinese Science Bulletin, **59**, 1529–1535.
- Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S., 2009, Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results: Sola, **5**, 160-163.
- Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., et al., 2011, Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite: Atmospheric Measurement Techniques, **4**(4), 717-734.
- Yue, T. X., Zhao, N., Ramsey, D., Wang, C. L., Fan, Z. M., Chen, C. F., Lu, Y. M., and Li, B. L., 2013, Climate change trend in China, with improved accuracy: Climate Change, **120**(1-2), 137–151.

## Evaluation of CO<sub>2</sub> column concentration of WRF-GHG and TM3 models with GOSAT satellite data over Iran

Samira Karbasi<sup>1</sup>, Hossein Malakooti<sup>2\*</sup> and Amin Fazl Kazemi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. of Meteorology, Department of Marine and Atmospheric Science (non-Biologic), University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Marine and Atmospheric Science (non-Biologic), University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. Student of Meteorology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 15 February 2023, Accepted: 26 September 2023)

### Summary

In the context of global warming and climate change, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is known as one of the most important greenhouse gases that has significant effects on the global warming. It is considered as one of the consequences of the accumulation of greenhouse gases. It is very important to control the amount of CO<sub>2</sub> emissions and reduce the effects of human activity on climate warming and understanding the spatial and temporal distribution of atmospheric CO<sub>2</sub>. Due to the coarse horizontal resolution of global transport models, simulation of CO<sub>2</sub> concentration in hourly/weekly time intervals and with a good vertical resolution in continental or coastal sites is one of the most important environmental challenges especially in the Middle East.

While compiling information on CO<sub>2</sub> emission from different sources, regional numerical simulation with spatial resolution of 30 and 10 km of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration was carried out using the Weather Research and Forecasting-Chemistry (WRF-GHG) model. XCO<sub>2</sub> information retrieved from GOSAT satellite observations was used as accuracy control information and evaluation of simulated results in CO<sub>2</sub> column concentration in hot (August) and cold (February) seasons compared to the output results of TM3 global model.

The performance of simulations in predicting the concentration of greenhouse gas carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) for the study period of February and August in 2010 showed that the spatial and temporal variability of meteorological variables have been simulated well with the correlation coefficients of 86-92%, 75-67% and 76-82% for temperature, wind and relative humidity, respectively. The evaluation results showed that the WRF-GHG model performs better than the TM3 global model in terms of statistical errors. On average, the skewness error values in both hot and cold seasons are -0.79 and 0.45 (-0.85 and 1.12) in the regional (global) model, respectively. The evaluation results showed that the difference between the simulated concentrations and XCO<sub>2</sub> observations from the GOSAT satellite could be caused by the underestimation of emissions produced by human activities, oceanic emissions, and exploitation of fossil fuels. This study showed that the WRF-GHG model is able to simulate well many important features of the atmospheric variables fields in Southwest Asia (Middle East-Iran region); then its application for future studies in this region is assured.

**Keywords:** Global warming, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), WRF-GHG model, GOSAT satellite, TM3 model, Iran

---

\*Corresponding author:

malakooti@hormozgan.ac.ir