

مطالعه غلظت ستونی CH₄ روی ایران: بکارگیری مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT و شبیه‌سازی‌های عددی WRF-GHG

سمیرا کرباسی^۱، حسین ملکوتی^{۲*}، مهدی رهنما^۳، مجید آزادی^۴

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران

۲- استاد، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران

۳- استادیار، گروه کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه پژوهشی هواشناسی سینوپتیکی و دینامیکی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

چکیده

متان (CH₄)، پس از CO₂، مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای انسانی است که اثر آن به ۱۸ درصد نسبت واداشت تابشی جو و به نرخ افزایش نسبت اختلاط این گازها در جو کمک می‌کند. از این رو ردیابی کمی از میزان گسیل گازهای گلخانه‌ای در مناطق با منشا انسانی و شهری، با هدف ارزیابی دقیق میزان پخش از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مقاله، به منظور درک بهتر سهم منابع مختلف متان، از مدل WRF-GHG برای مدل‌سازی بر روی منطقه خاورمیانه به عنوان دامنه اول و ایران به عنوان دامنه دوم با وضوح به ترتیب، ۳۰ و ۱۰ کیلومتر استفاده شده است. مهم‌ترین منابع گسیل متان شامل: سوختن زیست توده، گسیل مصنوعی انسانی و گسیل تالاب‌ها، پسماندها می‌باشد. فصلی بودن منابع طبیعی با مقایسه فصل گرم (خشک) و سرد (فوریه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. میدان‌های شبیه‌سازی شده متغیرهای هواشناسی با اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های همدیدی، در سال ۲۰۱۰ در مناطق شهری اصلی می‌توان دریافت که، مدل قادر است تغییرات زمانی دمای سطح، رطوبت نسبی و باد را بازتولید کند. نتایج خطای اریبی در شبیه‌سازی غلظت متان، به طور متوسط در هر دو فصل گرم و سرد به ترتیب، ۴۶.۰۵ و ۱۵.۱۶ ppb می‌باشد. مقدار غلظت متان شبیه‌سازی شده برای فوریه و اوت عموماً در مقایسه با اندازه‌گیری‌های GOSAT بیش برآورد شده است و نتایج ارزیابی نشان داد که مدل WRF-Chem در فصل سرد (ماه فوریه) با توجه به خطاهای آماری بهتر از فصل گرم (ماه اوت) عمل می‌کند. نمای کلی بودجه‌های گسیل منابع مختلف متان به صورت متوسط ماهانه برای حوزه مورد مطالعه به ترتیب، گسیل انسانی با بودجه ۶۸.۸٪ و ۶۳.۵٪ برای دو ماه اوت و فوریه، تالاب‌ها با بودجه ۲۴.۴٪ و ۳۳.۱٪ در ماه‌های اوت و فوریه و سوختن زیست توده با بودجه گسیل ۶.۵٪ و ۳.۲٪ به ترتیب در تابستان و زمستان می‌باشد. تفاوت موجود بین غلظت‌های شبیه‌سازی شده و مشاهدات XCH₄ از ماهواره GOSAT می‌تواند ناشی از دست کم گرفتن گسیل ناشی از تالاب‌ها، فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی باشد.

کلید واژه‌ها: گرمایش جهانی، گاز گلخانه‌ای، متان (CH₄)، مدل WRF-GHG، ماهواره GOSAT، منابع گسیل متان

مقدمه

یکی از پیامدهای افزایش و تجمع گازهای گلخانه‌ای در جو، گرمایش جهانی است که بدون شک از مهمترین چالش‌های محیطی در جهان، بخصوص در منطقه خاورمیانه است. با توجه به کمبود منابع آب در سال‌های اخیر، پیامدهای گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در کشورهای مختلف بسیار نگران کننده می‌باشد. کربن دی اکسید و متان دو تا از مهمترین گازهای گلخانه‌ای انسانی در جو هستند که به ترتیب، سهم ۶۴٪ و ۱۸٪ در واداشت تابشی جو بواسطه عمر طولانی (LLGHGs) دارند است (Forster et al., 2007). متان (CH₄) بعد از دی‌اکسیدکربن (CO₂) دومین گاز گلخانه‌ای مهم انسان‌زا است. از زمان انقلاب صنعتی، نسبت اختلاط متان به طور متوسط ۱۵۰ درصد افزایش یافته و به میانگین سطح جهانی ۱۷۵۱ ppb در سال ۱۹۹۹ رسیده است (Bousquet et al., 2006; Dlugokencky et al., 2003). پس از این افزایش، نسبت اختلاط متان تا سال ۲۰۰۷ ثابت باقی می‌ماند. دلیل این تغییر در رفتار، هنوز کاملاً نامشخص است (Nisbet et al., 2014; Turner et al., 2017). پس از سال ۲۰۰۷، متان مجدداً به نسبت اختلاط فعلی آن، در سطح جهانی ۱۸۶۶ ppb افزایش یافت (Rigby et al., 2008; Dlugokencky, 2019). علاوه بر سهم مستقیم در ایجاد واداشت‌های تابشی در جو، متان نقش مهمی نیز در ظرفیت اکسیداسیون جو ایفا می‌کند. فعل و انفعالات شیمیایی با متان به تولید ازن تروپوسفریک و بخار آب استراتوسفری کمک می‌کند، که به نوبه خود منجر به واداشت تابشی ثانویه می‌شود (Forster et al., 2007; Hansen and Sato, 2001). یکی دیگر از دلایل اهمیت، مطالعه و انجام اقدامات کاهش متان، طول عمر نسبتاً کوتاه CH₄ در مقایسه با CO₂ است. عمر CO₂ از ۵۰ سال تا چند صد سال متغیر است (Archer et al., 2009)، در حالی که طول عمر متان تقریباً ۹ سال است (Nisbet et al., 2016). این تفاوت آن را به یک گاز گلخانه‌ای هدف برای اعمال اقدامات کاهش تبدیل کرده است. می‌توان گفت متان تأثیرات نسبتاً کوتاه مدت بر آب و هوا دارد.

علیرغم اهمیت متان برای وضعیت فیزیکی و شیمی جوی، توزیع فضایی منابع جهانی و چاهک‌های متان به نحو مطلوب

درک نشده است. یکی از مهمترین منابع متان جو تالاب‌ها هستند. تالاب‌ها خاک‌هایی هستند که به صورت دوره‌ای یا دائمی به شکل غرق‌آب تشکیل می‌شوند. آن‌ها تقریباً ۴۰ درصد به گسیل جهانی CH₄ کمک می‌کنند (Walter and Heimann, 2000). از این ۴۰٪ تخمین زده می‌شود که ۵۰٪ را تالاب‌های گرمسیری تشکیل می‌دهند (Ringeval et al., 2014). تالاب‌های گرمسیری نه تنها برای گنجایش جهانی متان مهم هستند، بلکه تأثیر زیادی بر رفتار بین‌سالانه غلظت متان دارند. این رفتار به دلیل وابستگی این گسیل تالابی به دما و رطوبت خاک است (Christensen et al., 2003). چندین مطالعه، بازخورد مثبت قوی از گسیل CH₄ از تالاب‌ها و اثرات آن‌ها در گرم شدن زمین را نشان می‌دهد (Pandey et al., 2017; Nisbet et al., 2009; Petrenko et al., 2009). علاوه بر گسیل طبیعی تالاب‌ها، منابع مهم انسانی متان عبارتند از تولید انرژی، حیوانات نشخوارکننده پرورشی، کشاورزی برنج و سوختن زیست توده می‌باشند. مهمترین مخزن متان جوی اکسیداسیون توسط رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) است. این مخزن، حدود ۹۰ درصد از کل منابع جذب (چاهک) متان را شامل می‌شود (Kirschke et al., 2013) می‌شود. مروری بر برآورد منابع و چاهک‌های CH₄ در جدول ۱ آورده شده است.

با پرتاب ماهواره‌های اندازه‌گیری متان، دانش درباره توزیع جهانی متان در جو بسیار افزایش یافت. ماهواره طیف‌سنجی برای نقشه‌نگاری جوی (SCIAMACHY) بر روی ماهواره تحقیقاتی محیطی آژانس فضایی اروپا، (ENVISAT)، اولین ابزار فضایی تخصصی بود که نسبت اختلاط میانگین ستونی متان (XCH₄) جو را اندازه‌گیری کرد (Bovensmann et al., 1999). SCIAMACHY در مارس ۲۰۰۲ راه‌اندازی و تا مه ۲۰۱۲ فعال بود. این ابزار پوشش کامل جهانی را هر شش روز با وضوح ۳۰ در ۶۰ کیلومتر ارائه می‌داد (Frankenberg et al., 2005). پس از SCIAMACHY، ماهواره گازهای گلخانه‌ای ژاپنی (GOSAT) تنها ماهواره‌ای بود که مقادیر نسبت اختلاط ستونی از متان جو را اندازه‌گیری می‌کرد. ماهواره گوست در فوریه ۲۰۰۹ راه‌اندازی و هنوز هم (نوامبر ۲۰۲۱) به کار خود ادامه می‌دهد. این ابزار داده‌ها را با وضوح فضایی بالاتری (۱۰.۵ کیلومتر) در مقایسه

(et al., 2008). اکثر این مدل‌ها نه تنها دارای تفکیک فضایی درشت بودند، بلکه برخی از آن‌ها شامل پارامترسازی‌های هواشناسی کامل برای بازسازی درست فرایندهای لایه مرزی جوی یا همرفت نبودند (به عنوان مثال: e.g., Taguchi et al., 2011). این چالش در صورت وجود توپوگرافی پیچیده زمین با تنوع پوشش گیاهی و افزایش جمعیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. در سال‌های اخیر، مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی انتقال‌های منطقه‌ای با وضوح مکانی بالا توسعه پیدا کرده‌اند (Sarrat et al. 2009; Pillai et al. 2013; Vogel 68 et al. 2011).

شبیه‌سازی با تفکیک زمانی بالا از CH₄ در بازه‌های زمانی ساعتی بر روی زمین، با اکوسیستم متنوع، با توجه به عدم وجود اندازه‌گیری‌های مترکم فضایی و زمانی و عدم امکان اعتبارسازی‌های قابل اعتمادی برای مدل‌های شیمیایی چالش برانگیز است. علاوه بر این، غالباً تفکیک‌های مکانی و زمانی شارهای سطحی مدل‌ها، نسبت به آنچه برای نمایش واقع بینانه سایت‌های اندازه‌گیری قاره یا ساحل مورد نیاز است، درشت‌تر است. بنابراین، درک محدودیت‌های شبیه‌سازی مدل‌های انتقال رو به جلو شیمیایی از CH₄ در بازه‌های زمانی ساعتی، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است (e.g., Law et al. 2008; Patra et al., 2008e). از آنجا که عدم تطابق داده‌های مشاهده شده و مدل، یکی از عوامل اصلی درگیر در مدل‌سازی معکوس و منابع گسیل و جذب در سطح زمین است، تنظیم بهترین سیستم شبیه‌سازی غلظت پیشینی برای موفقیت یک سیستم مدل‌سازی معکوس و بلعکس بسیار حیاتی است (Tolk et al. 2011; Peylin et al. 62 2011).

کیفیت شبیه‌سازی‌های پیش رو تا حد زیادی به توانایی ما در نشان دادن ناهمگنی شارهای سطح و رفتار انتقال مدل در اطراف هر سایت بستگی دارد (Tolk et al., 2011). مطالعات اخیر با استفاده از مدل‌های شیمی منطقه‌ای محدودیت در وضوح افقی مدل را کاهش داده و ناهمگنی در شارهای سطح را در نظر گرفته و در نتیجه ساختارهای خوب در تغییر غلظت گازهای گلخانه‌ای را حل کرده است به عنوان مثال (Sarrat et al. 2009; Pillai et al. 2011; Vogel 68 et al., 2013). با این حال، قبلاً در منطقه ایران

با ماهواره SCIAMACHY، اما با پوشش فضایی کوچکتر ارائه می‌دهد. زمان بازبینی ماهواره گوست هر سه روز یک بار است (Yokota et al., 2009). اطلاعات بیشتر در مورد این ابزار را می‌توانید در بخش ۲.۳ مشاهده کنید. این اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای به ویژه برای تعیین منابع و چاه‌های متان جو در مناطقی که مشاهدات سطحی ناچیزی وجود دارد، دارای ارزش زیادی می‌باشد.

این مقاله بر گسیل و پخش جوی گاز متان در منطقه ایران تمرکز دارد. ایران یک منطقه منحصر به فرد برای انجام این مطالعه است، زیرا که اندازه‌گیری‌های GOSAT افزایش معنی‌داری از متان جو را روی ایران و مناطق اطراف (جدول ۲) از سال ۲۰۰۹ تاکنون (نوامبر ۲۰۲۱) مشاهده کرده است. بخش مهمی از فعالیت‌های کشاورزی در ایران شامل مزارع برنج است، که بیشینه آن مزارع نوار شمالی کشور را پوشش می‌دهد. در این منطقه همچنین پرورش گاو گوشتی نیز وجود دارد که در گسیل متان نقش مهمی ایفا می‌کند. منبع مهم دیگر، متان انسان ساخت، استخراج سوخت‌های فسیلی، مانند نفت، گاز طبیعی می‌باشد. این منابع در قسمت-های غرب، جنوب و جنوب غربی واقع شده‌اند. به طور کلی این گسیل انسانی در حین یک سال تقریباً ثابت هستند، بنابراین آن‌ها تغییرات فصلی مشاهده شده در متان جو منطقه‌ای را توضیح نمی‌دهند. فصلی بودن به احتمال زیاد ناشی از فصلی بودن گسیل تالاب در یک منطقه می‌باشد (Chanton and Smith, 1993). هنگامی که تالاب‌ها سیلابی می‌شوند، دسترسی به اکسیژن کاهش می‌یابد و باکتری‌های متانوژنیک شروع به تولید متان می‌کنند (Neue et al., 1997) از آنجا که سیل تولید متان را افزایش می‌دهد بیشترین میزان گسیل در فصل مرطوب مشاهده می‌شود (Mitsch et al., 2010). این چرخه فصلی در مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT، نیز مشاهده می‌شود (Frankenberg et al., 2006). منبع دیگر متان که دارای چرخه فصلی قوی است، سوختن زیست توده است. اما این منبع از استحکام کمتری برخوردار است و در مقایسه با تالاب‌ها الگوی متضادی را نشان می‌دهد، زیرا بیشترین احتراق زیست توده در فصل خشک منطقه رخ می‌دهد (Duncan et al., 2003). از دهه ۱۹۹۰، مدل‌های مختلف جهانی برای شبیه‌سازی غلظت CH₄ استفاده شده است (Law et al. 2008; Patra)

روزانه داده‌های میانگین در فصل سرد و گرم و (۳) بررسی نتایج خروجی مدل سازی در مقیاس متوسط، را در شبیه‌سازی غلظت متان کل در ایران و مقایسه با مشاهدات ماهواره‌ای GOSAT انجام می‌دهیم. در بخش بعدی، پیکربندی مدل، مواد و روش‌ها آورده شده است، به دنبال نتایج و بحث‌ها، نتیجه‌گیری در بخش ۴ آورده شده است.

شبیه‌سازی CH4 با استفاده از مدل منطقه‌ای انجام نشده است. هدف اصلی ما در مطالعه حاضر درک عملکرد مدل در رابطه با داده‌های مشاهده شده در منطقه ایران است. ما عملکرد مدل WRF-GHG را از طریق: (۱) مقایسه محصولات تولیدی هواشناسی (دما رطوبت و باد)، (۲) مقایسه تغییرات

جدول ۱- بودجه متان جهانی برآورد منابع و غرق شدن متان اتمسفر (Tg yr-1) برای سالهای ۲۰۰۰-۲۰۰۹ (Kirschke et al., 2013)

Sources		Sink	
Natural	Anthropogenic		
Wetlands	217	Agriculture and waste	200
Geological (incl. oceans)	54	Biomass burning	35
Fresh water	40	Fossil fuels	96
Termites	11		
Another	25		
Total natural	347	Total anthropogenic	331
Total sources			678
		Soils	28
		Tropospheric OH	528
		Stratospheric loss	51
		Tropospheric Cl	25
		Total sinks	63

ترکیه هم مرز است. قرارگیری ایران بین عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی، در جنوب منطقه معتدله نیمکره شمالی و همچنین در ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی واقع شده است که به تنوع آب و هوا در آن منجر شده است، به گونه‌ای که 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, 2015).

حوزه مورد نظر از دو دامنه (تو در تو) که ابعاد آنها دارای نقاط شبکه افقی ۱۷۳ × ۱۲۴ و ۲۲۲ × ۲۱۳ با فاصله ۳۰ کیلومتر برای درشت‌ترین دامنه (d01) و ۱۰ کیلومتر برای دامنه دوم (d02) می‌باشد، که به ترتیب منطقه خاورمیانه و ایران را شامل می‌شود (شکل ۱). WRF از مختصات عمودی فشار هیدرواستاتیک زیر زمین استفاده می‌کند (Skamarock et al., 200). در این مطالعه از ۳۷ تراز سیگمای قائم بالاترین سطح در ۶۰ هکتوپاسکال است. داده‌های استاتیک مربوط به پستی- بلندی (کوهساری)، کاربری زمین، نوع خاک و سپیدایی از داده‌های جهانی (Geog) بارگذاری شد. در طول این مطالعه بر روی دو دوره زمانی مختلف تمرکز شده است: فصل خشک و فصل مرطوب در منطقه مورد مطالعه، شامل بازه زمانی شبیه‌سازی شده ۱-۲۸ فوریه سال ۲۰۱۰ و ۱-۳۱ اوت سال ۲۰۱۰ می‌باشد. جزئیات کامل

مدل WRF- GHG

در این مطالعه از مدل WRF-Chem نسخه ۳.۹.۱.۱، تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا غیر هیدرواستاتیک و کاملاً مترکم شده همراه با شیمی با هسته دینامیکی ARW (Skamarock et al., 2008) استفاده شده است (Grell et al., 2005). انگیزه اصلی برای توسعه مدل WRF-GHG استفاده از آن برای انجام شبیه‌سازی‌های منطقه‌ای و انتقال ردیاب منفعل (بدون هیچ واکنش شیمیایی) با وضوح بالا، نه تنها برای گاز کربن دی‌اکسید CO2 بلکه برای متان (CH4) و مونوکسید کربن (CO) می‌باشد. اتصال مدل GHG به مدل WRF با نسخه WRFV3.1.1 آغاز شد و 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.

منطقه مورد مطالعه و پیکربندی مدل

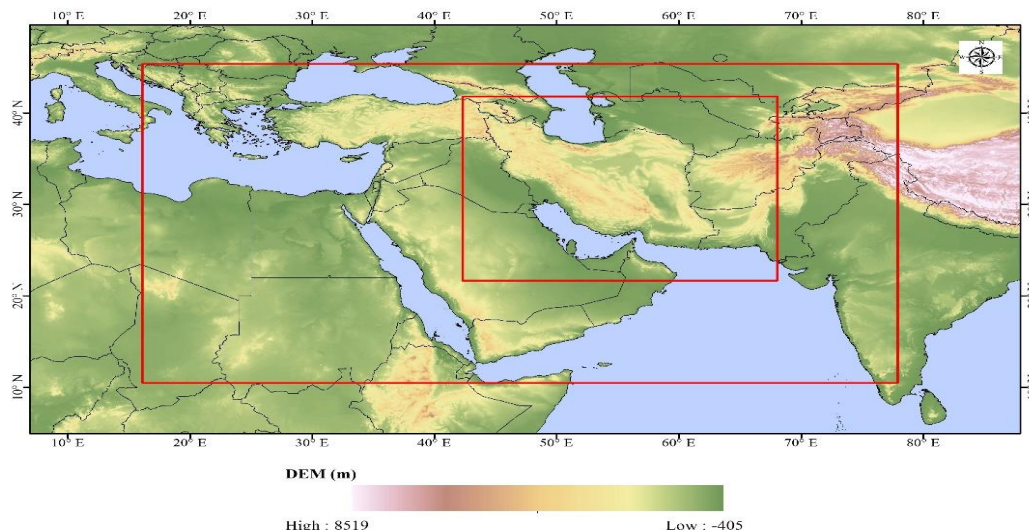
منطقه مورد مطالعه کشور ایران و بخشی از کشورهای همجوار آن می‌باشد. ایران کشوری است که در جنوب غربی آسیا واقع شده است و دارای جغرافیای بسیار متنوعی است. ایران، دومین کشور بزرگ خاورمیانه است که از شمال غرب با ارمنستان و آذربایجان، از شمال با دریای خزر، از شمال شرق با ترکمنستان، از شرق با افغانستان و پاکستان، از جنوب با خلیج فارس و دریای عمان و در غرب با عراق و

طرح‌واره‌های فیزیکی متفاوت در مدل WRF-chem وجود دارد. در جدول ۲ خلاصه گزینه‌های پیکربندی انتخاب شده WRF-GHG برای فرآیندهای مختلف جوی آورده شده است (Takigawa et al. 2007; Niwano et al., 2007). برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی میدان‌های هواشناسی از داده‌های باز تحلیل ERA5 با وضوح افقی ۰.۲۵ درجه، با ۱۳۷ لایه عمودی و وضوح زمانی ۶ ساعته استفاده شده است. از اطلاعات سرویس نظارت بر جو کوپرنیکوس (CAMS) برای شرایط مرزی شیمیایی متان استفاده گردید (Massart et al., 2014). داده‌های CAMS بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای همراه با اندازه‌گیری زمینی است (Verkaik, 2019).

مربوط به پیکربندی مدل، تعداد نقاط شبکه و تفکیک افقی و قائم برای هر دو دامنه به همراه جزئیات مربوط به شرایط شبیه‌سازی عدد در جدول ۱ آورده شده است.

تنظیمات مدل

در این مطالعه، متان در مدل WRF-Chem به عنوان یک ردیاب منفعل پیاده سازی شده است. مدل WRF-Chem شامل پارامترسازی‌های فیزیکی، دینامیکی و شیمیایی مناسب برای طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی است. پارامترسازی‌های فیزیکی موجود در مدل شامل مواردی همچون میکروفیزیک، تابش موج بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت کومولوسی را شامل می‌شوند. انتخاب‌های متعددی، برای



شکل ۱- دامنه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی WRF_Chem به همراه ارتفاع سطح زمین از تراز میانگین دریا (نوار رنگ)

جدول ۱- پیکربندی مدل WRF_Chem و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده

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

موجودی آلاینده‌ها

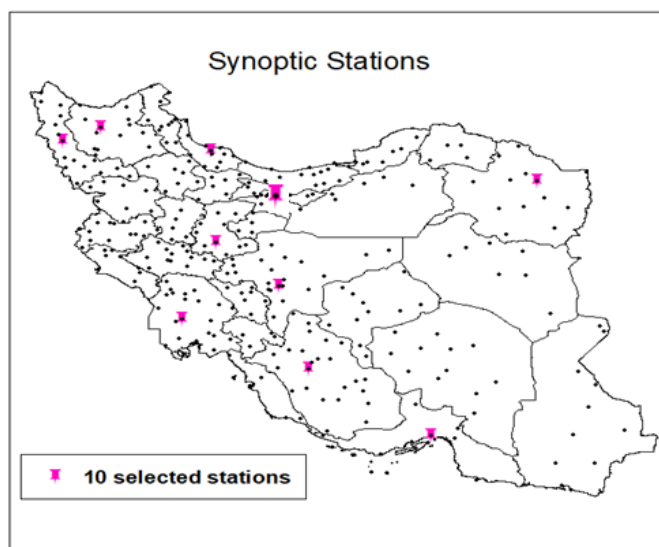
ورودی داده‌های گسیل از سه پایگاه مختلف گسیل متان در مقیاس جهانی استفاده شده است، یعنی شارها شامل: شارانتروپوژنیک (انسان ساخت)، شار فسیل‌ها (احتراق زیست توده) و شار حاصل از منابع گسیل تالاب می‌باشند. برای گسیل گازهای گلخانه‌ای انسان ساخت از بین داده‌های جهانی نشر انسان ساخت مانند REAS، RETRO، NEI، EDGAR و غیره، از موجودی جهانی گسیل EDGARv5.0، با وضوح ۰.۱ در ۰.۱ درجه استفاده شده است. گسیل گازهای ردیابی و ذرات معلق در هوا از سوختن زیست توده، روزانه با استفاده از سیاهه گسیل آتش سوزی GFAS محاسبه می‌شود. گسیل CH₄ حاصل از تالاب از مجموعه داده‌های (CMS_V01) استفاده شده است. شرایط اولیه و مرزی برای میدان شیمیایی در-WRF GHG از داده‌های سرویس نظارت جوی (CAMS data) با وضوح مکانی ۰.۸° در سطح ۱۳۷ سطح عمودی و با وضوح زمانی ۶ ساعته استفاده شده است.

داده‌ها

مشاهدات هواشناسی برای اعتبارسنجی هواشناسی

شبیه‌سازی‌ها

برای بررسی، ارزیابی و کمی‌سازی اعتبار میدان‌های هواشناسی، شبیه‌سازی شده بوسیله مدل عددی WRF-Chem، از مجموعه مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیکی استفاده می‌شود. بدین منظور دمای ۲ متر، سرعت باد تراز ۱۰ متر و رطوبت نسبی تراز ۲ متری، شبیه‌سازی شده بوسیله مدل عددی WRF-Chem، با مجموعه مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی، ۱۰ ایستگاه منتخب از ایستگاه‌های همدیدی مراکز استان با پراکنندگی مناسب، از سازمان هواشناسی اخذ شد و با استفاده از روش‌های آماری اعتبارسنجی هواشناسی مدل تحلیل گردید (شکل ۲).



شکل ۲- ایستگاه‌های سینوپتیکی منتخب

مشاهدات ماهواره‌ای

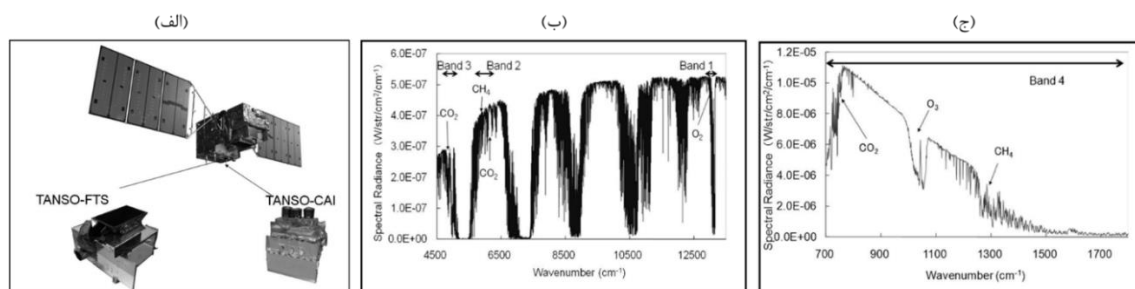
ماهواره GOSAT

ماهواره مشاهده کننده گازهای گلخانه‌ای گوست (ایبوکی) در ۲۳ فوریه ۲۰۰۹ در جزیره تانگاشیمای ژاپن به فضا پرتاب شد (Kuze et al., 2009; Yokota et al., 2009; Parker et al., 2011). پروژه گوست تلاش مشترک آژانس

اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)، وزارت محیط زیست (MOE) و انجمن ملی مطالعات محیط زیست (NIES) است (Miao et al, 2013)، (شکل ۳). هدف اصلی از اجرای پروژه گوست، برآورد تولید و جذب گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه قاره‌ای، (چند هزار کیلومتر مربع) با دقت بیشتر است و همچنین کمک به اداره محیط زیست ارزیابی تعادل

خورشید همزمان با یک زمان تقریبی عبور از استوا (۱۲:۴۸) در حال گردش است و دارای یک چرخه تکرار سه روزه است. برای هر چرخه تکرار سه روزه، تقریباً بازیابی ۹۰۰ مشاهده را دارد. ماهواره گوست تنها ماهواره‌ای که گازهای گلخانه‌ای CO₂ و CH₄ را به طور همزمان اندازه‌گیری می‌کند و مجموعه داده‌های آن از سال ۲۰۰۹ به بعد می‌باشد.

اکوسیستم زمین و ارزیابی تولید و جذب منطقه‌ای است. از طریق آنالیز داده‌های گوست، دانشمندان دانش جدیدی در توزیع جهانی و تغییرات زمانی گازها گلخانه‌ای، همچنین چرخه جهانی کربن و تاثیرات آن بر آب و هوا کسب می‌کنند. این ماهواره در ارتفاع ۶۶۶ کیلومتری سطح میانگین دریا قرار گرفته است. ماهواره گوست، در یک مدار



شکل ۳- (الف) نمای طراحی ماهواره گوست، در کره زمین مجهز به سنسور TANSO FTS-ANSO CAI، (ب) پوشش طیفی شبیه‌سازی شده از TANSO-FTS_SWIR (نوارهای ۱، ۲ و ۳) و (ج) TIR (نوار ۴) (Kuze et al., 2009).

محدوده SWIR در طول موج‌های حدود ۰.۷۶، ۱.۶ و ۲.۰ میکرومتر عمل می‌کند و حساسیت آن‌ها به جذب نزدیک سطح است و نوار چهارم حرارتی مادون قرمز بین ۵.۵ میلی‌متر و ۱۴.۳ میکرومتر می‌باشد که حساس به ناحیه تروپوسفریک می‌باشد (جدول ۲، الف و ب).

استراتژی اندازه‌گیری TANSO-FTS به منظور مشخص کردن منابع گسیل در مقیاس قاره‌ای بهینه سازی شده است. این اندازه‌گیری‌ها به صورت ذاتی شامل ۵ نقطه عمود بر مسیر حرکت است، که با فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتر از هم قرار دارند، با قطر ۱۰.۵ کیلومتر و مدت زمان ۴ ثانیه از هم قرار گرفتند (Parker et al., 2011).

این ماهواره به دو دستگاه مجهز است: (۱) سنسور حرارتی و مادون قرمز برای مشاهدات کربن که مجهز به طیف سنج فوریه (TANSO-FTS) و (۲) سیستم تصویربرداری ابر و آتروسول (TANSO-CAI) می‌باشد (شکل ۲). با اندازه‌گیری بوسیله هر دو سنسور حساس به TIR و NIR، گوست قادر است هر دو مقدار ستون و پروفیل عمودی گازهای ردیابی را مشاهده کند. برآورد توزیع جهانی CO₂ و CH₄ و همچنین تغییرات فضایی زمانی از منابع گسیل و چشمه‌های آنها را می‌توان بدست آورد (Houweling et al., 2004). ابزار TANSO-FTS شامل چهار نوار طیفی با رزولوشن طیفی بالا (۰.۳ سانتیمتر)، می‌باشد که سه نوار طیفی آن، در

جدول ۲ الف- مشخصات GOSAT TANSO-FTS (Yokota et al, 2009)

Band	Band1	Band2	Band3	Band4
Polarization	P, S	P, S	P, S	-
Spectral coverage (μm)	0.758-0.775	1.56-1.72	1.92-2.08	5.56-14.3
Spectral resolution (cm ⁻¹)	0.2	0.2	0.2	0.2
Targeted gases	O ₂	CO ₂ · CH ₄	H ₂ O · CH ₄	CO ₂ · CH ₄
FOV/FOV at nadir	IFOV: 15.8 mrad (corresponds to 10.5 km when projected on the earth's surface)			

جدول ۲ ب- مشخصات GOSAT TANSO-CAI (Yokota et al, 2009)

Band	Band1	Band2	Band3	Band4
Spectral coverage (μm)	0.370-0.390 (0.380)	0.664-0.684 (0.674)	0.860-0.880 (0.870)	1.56-1.65 (1.60)
Targeted substances	Cloud and aerosol			
Spatial resolution at nadir (km)	0.5	0.5	0.5	0.5

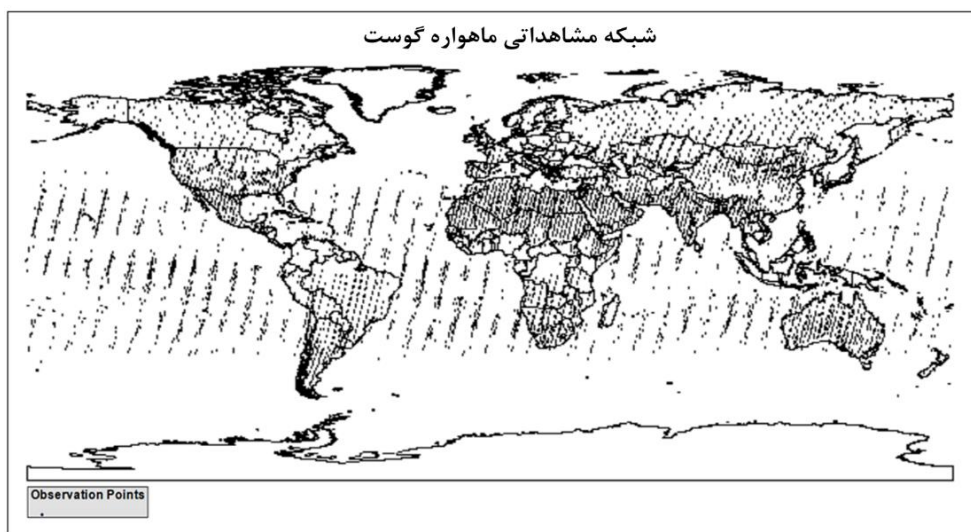
مشاهدات ماهواره‌ای برای اعتبارسنجی شیمیایی

سنجش غلظت CH₄ جوی با استفاده از ابزارهای فضایی مانند ماهواره گازهای گلخانه‌ای (GOSAT)، به مشاهدات نور خورشید انعکاس یافته از سطح زمین و جو بستگی دارد. از سال ۲۰۱۳، پنج الگوریتم عمده از گروه‌های مختلف تحقیقاتی، در سراسر جهان با تمرکز بر پردازش داده‌های ماهواره GOSAT، برای بازیابی کسر خالص متوسط ستون هوای خشک (XCH₄)، در توزیع جهانی و زمانی در وضوح مکانی-زمانی بالا ایجاد شده است. به طور خاص، برخی از الگوریتم‌های بازیابی فراوانی ستون CH₄ از مشاهدات GOSAT شامل: الگوریتم موسسه ملی مطالعات زیست محیطی ژاپن (NIES) (Yokota et al., 2009)، محصولات تحقیقاتی از دانشگاه فیزیک کامل لستر (RemoTec)، (Butz et al., 2009)، الگوریتم برای مدل‌سازی چرخه کربن (SRON)، توسط موسسه تحقیقات هلندی و موسسه فناوری کارلسروهه (KIT) و الگوریتم تابع چگالی احتمال طول مسیر فوتون (PPDF-D)، که در موسسه NIES توسعه یافته است می‌باشد (Frankenberg et al., 2013; Oshchepkov et al., 2013). هر الگوریتم به طور مستقل روش‌های مختلفی را برای پیش پردازش و پس از پردازش داده‌های ماهواره GOSAT بکار می‌گیرد تا خطاها را در مناطق آلوده به نور پراکنده خورشید را فیلتر کند. الگوریتم عملیاتی NIES، که برای پردازش منظم طیف تابش GOSAT استفاده می‌شود، در انستیتوی ملی مطالعات

زیست محیطی ژاپن توسعه یافته است. خطای ارزیابی‌های انجام شده بر روی محصولات الگوریتم NIES به نسبت مشاهدات کمتر از یک درصد است و جزئیات کامل اجرای این الگوریتم توسط Yoshida و همکاران توصیف شده است (Yoshida et al., 2011).

با توجه به ارزیابی اخیر عملکرد الگوریتم‌های NIES، ACOS و Remo Tec با مشاهدات 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)، در این مطالعه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها و بررسی آماری غلظت ستونی CH₄ WRF_Chem، در نقاطی که شامل داده‌های سنجش از دور (داده‌های سنجنده گوست) می‌باشد، از مجموعه محصولات سطح ۲ تولید شده، توسط الگوریتم NIES، استفاده می‌شود. این ارزیابی در بازه زمانی ا تا ۲۸ فوریه ۲۰۱۰ و ا تا ۳۱ اوت ۲۰۱۰ انجام می‌شود (شکل ۴).

زمان گذر محلی ماهواره گوست ۱۳:۰۰-۹:۰۰ است، بنابراین غلظت شبیه‌سازی شده WRF برای این زمان در تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود. برای در نظر گرفتن زمان (آموزش) اسپین آپ، ۱۵ روز اول شبیه‌سازی حذف می‌شود. از آنجا که GOSAT_XCH₄ را به عنوان میانگین ستون نسبت‌های اختلاط اندازه‌گیری می‌کند، مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده WRF نیز به میانگین ستونی تبدیل می‌شود و در مدت زمان شبیه‌سازی یک ماه به طور متوسط بدست می‌آید.



شکل ۴- نمونه نقاط رصد ماهواره گوست

شاخص‌های آماری

در حال حاضر 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 فصل خشک و مرطوب 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.

در ارائه روابط مربوط، مقدار خطای میانگین بایاس، ضریب همبستگی پیرسون، اطلاعات مربوط به بیش از حد / دست کم گرفتن هر متغیر را توسط مدل فراهم می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Mean\ BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (M_i^* - O_i) \quad (1)$$

در معادله (۱-۳)، جمع بندی‌ها بر روی تعداد کل مقادیر نقاط مشاهداتی و مدل (N) انجام می‌شود. در حالی که (O_i) و (M_i) مقادیر i ام، به ترتیب مشاهده شده و مدل شده را نشان می‌دهند.

ضریب همبستگی پیرسون (r)، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (2)$$

در معادله (۲) پارامترهای \bar{O} و \bar{M} نشانگر مقادیر متوسط در مقادیر مشاهده و مدل هستند.

هر دو d و r^2 کمیت آماری بدون بعد هستند و مقادیر آنها بین ۰ (عدم توافق بین مدل و مشاهدات) و ۱ (توافق کامل) متفاوت است

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (F_i^* - F_i)^2} \quad (3)$$

RMSE به نوعی، میانگین خطای تولید شده در شبیه‌سازی را بیان می‌کند اما منابع یا انواع خطاها را روشن نمی‌کند. در این زمینه ارزیابی مولفه‌های خطای سیستماتیک و غیر سیستماتیک مفید است که به شکل زیر محاسبه می‌شود، به گونه‌ای که

$$RMSE_{tot}^2 = RMSE_s^2 + RMSE_u^2 \quad (4)$$

و مولفه خطای غیر سیستماتیک از رابطه زیر محاسبه می‌شود. در این معادله R^2 و σ^2 نشان دهنده ضریب تعیین همبستگی و واریانس می‌باشند. ابتدا مولفه خطای سیستماتیک با استفاده از این معادله محاسبه می‌شود و سپس مولفه خطای سیستماتیک از رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$RMSE_u = \sqrt{(1 - r)^2 \times \sigma_m^2} \quad (5)$$

بحث و بررسی

ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی میدان‌های

هواشناسی

بخشی از خطاها در شبیه‌سازی غلظت CH4 مربوط به خطا در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی جوی می‌باشد، از طرفی به دلیل تاثیر پذیری پخش جوی از میدان باد و تلاطم جوی و همچنین، وجود بعضی از پارامترسازی‌های گسیل در شبیه‌سازی که تابعی از متغیرهای هواشناسی می‌باشند، برای درک نقش هواشناسی در شبیه‌سازی اتمسفر CH4، سه پارامتر مهم هواشناسی در نظر گرفته می‌شود، یعنی دمای هوا (AT)، رطوبت نسبی (RH) و سرعت باد (WS)، که در ۱۰ ایستگاه مشاهداتی در دسترس هستند. نتایج پارامترهای ارزیابی ذکر شده در بخش ۲.۴.۳، از قیاس متغیرهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در جدول ۳ برای دو فصل، یعنی تابستان (اوت) و زمستان (فوریه) ارائه شده است. پارامترهای آماری نشان می‌دهد که میدان‌های جوی و تغییرات روزانه آن‌ها به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند.

از ارزیابی‌ها دریافتیم که دمای دو متری، بهترین مقادیر r^2 برای هر دو فصل، 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 ۰.۷۰ تا ۰.۸۹ به ترتیب در تابستان و زمستان متغیر است، و مقادیر خطای RMSE (در فصل گرم و سرد به طور میانگین ۲.۳۷ و ۳.۸۶ می‌باشد) پایینی نسبت به دیگر پارامترها دارد. میزان میانگین خطای بایاس در فصل گرم و سرد به طور متوسط ۰.۳- و ۰.۹- است. پس از دما، رطوبت نسبی، بهترین مقادیر r^2 را دارد. اگر از ایستگاه‌های ارومیه، مشهد و اراک و تهران، در فصل سرد چشم‌پوشی کنیم، r^2 در طول هر دو فصل از ۰.۵۰

مقایسه و تحلیل کرد. این فرایند برای داده‌های فصل خشک و مرطوب انجام می‌شود.

قسمت اول این بخش، بررسی و مقایسه شبیه‌سازی‌های WRF_Chem با اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ماهواره OSAT در برآورد غلظت CH₄ می‌باشد. سپس، تجزیه و تحلیل و معرفی نواحی توزیع غلظت گاز گلخانه‌ای متان و پیدا کردن مهمترین منابع، توزیع گسیل متان و توزیع آن در هر دو فصل گرم و سرد انجام می‌شود.

جدول ۴، ارزیابی‌های آماری در عملکرد مدل WRF-Chem، به همراه مکانیزم در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده بوسیله ماهواره گوست، و برآورد غلظت متوسط ماهانه در دو ماه فوریه و اوت نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که MAE، RMSE_s، RMSE_u، BIAS و R به ترتیب (۴۲.۹۲، ۶۶.۰۵، ۷.۸۲، ۴۴.۶۰، ۲۴.۹۹- و ۰.۶۳) و (۱۲.۰۱، ۱۳.۹۴، ۱۱.۶۸، ۷.۰۹، ۷.۵۰، ۰.۷۶) برای هر دو ماه گرم و سرد می‌باشد. از بررسی نتایج می‌توان دریافت که مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی متان در فصل سرد بهتر از فصل گرم عمل می‌کند، بنابراین نتیجه می‌گیرد که WRF-Chem غلظت CH₄ را در شرایط فصل مرطوب (فوریه) در مقایسه با شرایط فصل خشک (اوت) در منطقه مورد مطالعه بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

دلایل متعددی منجر به اختلاف، در نسبت اختلاط متان حاصل از شبیه‌سازی عددی و مشاهدات وجود دارد که یکی از آنها شامل فقدان میزان گسیل دقیق آلاینده‌ها به عنوان نشر ورودی به مدل در حوزه مطالعه می‌باشد. یکی دیگر از دلایل وجود خطاها در میزان مقادیر شبیه‌سازی شده متان توسط مدل، مقادیر پس زمینه است که توسط داده‌های CAMS ایجاد می‌شوند که منجر به افزایش نسبت اختلاط CH₄ در مقایسه با داده‌های مشاهداتی گوست در حوزه مطالعاتی مورد نظر می‌شود.

تا ۰.۸۸ متغیر است. همچنین، مقادیر r در تابستان برای بسیار بیشتر از زمستان است. میانگین خطای بایاس برای رطوبت نسبی با صرف نظر کردن از ایستگاه و تهران در تابستان و بندرعباس در زمستان، به ترتیب ۲.۶- و ۴.۲- می‌باشد.

هر چند مقادیر r در سرعت باد ده متری، کمتر از رطوبت نسبی است ولی RMSE آن نیز مقادیر پایین تری (به طور متوسط در هر دو فصل گرم و سرد به ترتیب ۲.۸۹ و ۲.۹۱ می‌باشد) دارد که تفاوت چندانی با مقادیر آن برای دمای دو متری ندارد. مقادیر میانگین بایاس نیز به طور متوسط ۱.۲۸ و ۱.۱۹ در دو فصل گرم و سرد می‌باشد.

مدل قادر بوده است تغییرات زمانی دمای سطح، رطوبت نسبی و سرعت باد را با خطاهای آماری محاسبه شده برای همه اندازه‌گیری‌ها تا حدی به درستی محاسبه کند (جدول ۳ و شکل ۵). همان طور که در شکل ۵ مشخص است،

شیمی فاز گازی GHG، را در شبیه‌سازی غلظت متان تمایل کلی مدل برای دست کم گرفتن دما و رطوبت نسبی مشاهده شده برای دوره زمانی انتخابی مشاهده می‌شود. به طور کلی مقادیر محاسبه شده در مدل، تمایل به دست کم گرفتن میانگین دمای قبل از ظهر و برآورد بیشتر از مشاهدات برای دمای بعد از ظهر وجود دارد.

شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که در هر دو فصل گرم و سرد در اکثر قسمت‌ها، رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده دست کم گرفته شده است و به طور کلی از بررسی تمام سی روز در دو ماه مقادیر مدل به مشاهدات در فصل تابستان نزدیک تر است.

مقادیر تغییرات، پیش بینی سرعت باد در اکثر اوقات با مقادیر سرعت باد حاصل از اندازه‌گیری‌ها سازگار است. شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که در اکثر قسمت‌ها سرعت باد بیش از حد برآورد می‌شود.

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی غلظت متان و

داده‌های ماهواره‌ای (GOSAT - WRF_Chem)

در حال حاضر هر دو مجموعه اطلاعات (شبیه‌سازی و ماهواره) دارای مکان و زمان اندازه‌گیری واحد هستند، و می‌توان آنها را با استفاده از پارامترهای آماری مختلف

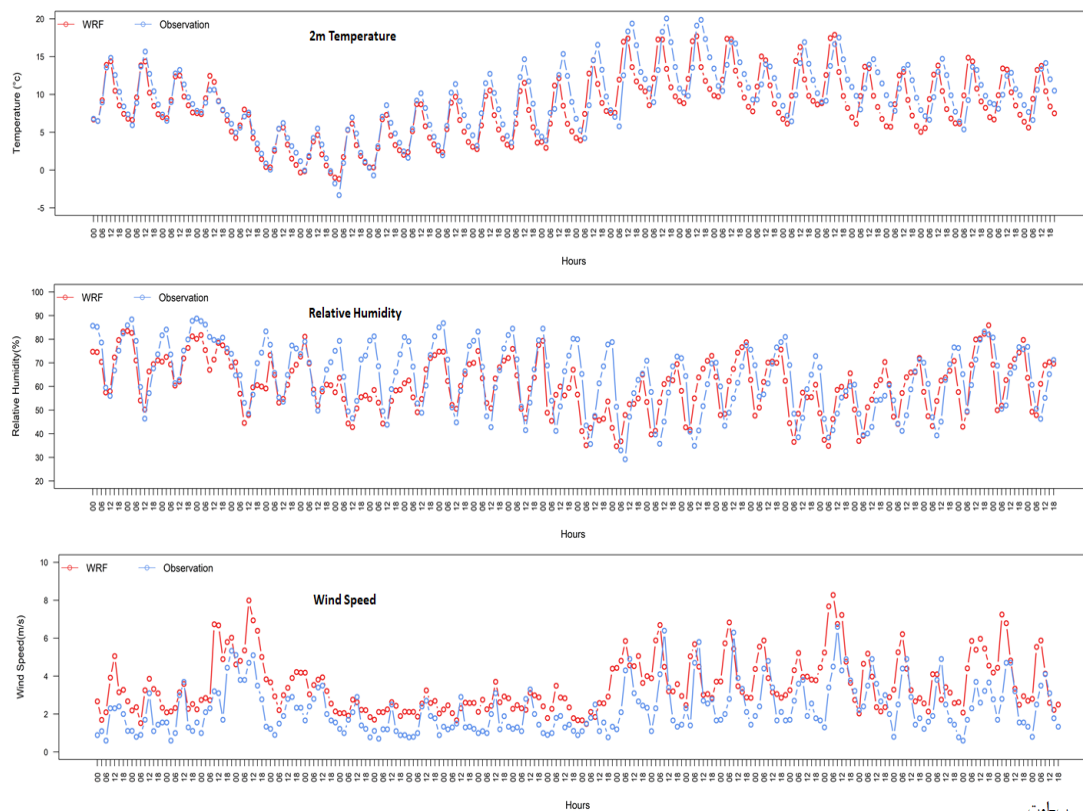
جدول ۳- پارامترهای ارزیابی، بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی، میانگین ماهانه (اوت-فوریه)

نام ایستگاه	تابستان (اوت)						زمستان (فوریه)
	RH	AT	WS	RH	AT	WS	
Correlation(r)	اهواز	۰.۸۳۲	۰.۹۵۷	۰.۳۸۹	۰.۷۵۹	۰.۸۲۲	ش
	اراک	۰.۸۳۰	۰.۹۱۹	۰.۵۱۸	۰.۷۳۱	۰.۷۹۴	۰.۵۸۱
	ارومیه	۰.۸۰۹	۰.۹۳۵	۰.۲۲۶	۰.۴۳۴	۰.۸۰۸	۰.۳۷۸
	اصفهان	۰.۸۰۷	۰.۸۵۹	۰.۴۳۲	۰.۵۰۸	۰.۷۰۸	۰.۴۰۰
	بندرعباس	۰.۷۳۲	۰.۹۰۳	۰.۶۵۱	۰.۷۳۸	۰.۷۴۶	۰.۳۱۰
	تبریز	۰.۸۶۱	۰.۹۴۶	۰.۴۲۳	۰.۵۶۶	۰.۸۶۹	۰.۴۴۰
	تهران	۰.۸۸۱	۰.۹۶۳	۰.۴۵۸	۰.۴۲۹	۰.۸۹۳	۰.۱۷۹
	رشت	۰.۷۹۵	۰.۹۳۹	۰.۶۸۶	۰.۶۰۳	۰.۸۰۸	۰.۴۷۷
	شیراز	۰.۶۶۴	۰.۹۱۲	۰.۲۹۵	۰.۶۲۳	۰.۷۴۵	۰.۴۶۱
مشهد	۰.۸۴۲	۰.۹۶۶	۰.۶۶۶	۰.۲۵۴	۰.۴۱۷	۰.۲۳۳	
Bias error	اهواز	-۳۸۰.۶	۰.۱۶۵	۱.۰۴۰	-۷.۲۱۹	-۰.۵۵۰	۱.۱۵۶
	اراک	۰.۷۳۲	-۱.۱۹۷	۲.۲۵۲	-۳.۳۷۰	-۱.۰۷۶	۴.۰۷۱
	ارومیه	-۳.۵۰۵	۱.۲۶۳	۰.۹۲۱	-۲.۶۹۴	-۰.۲۴۴	۰.۴۳۷
	اصفهان	-۰.۳۴۲	-۲.۵۸۱	۲.۲۳۳	۰.۴۶۸	-۳.۲۶۵	۱.۵۵۲
	بندرعباس	-۱۱.۵۴۱	-۰.۳۶۴	۰.۶۶۹	-۲.۶۸۷	-۱.۰۸۹	۰.۳۸۷
	تبریز	۲.۹۵۷	-۱.۶۹۹	۱.۷۹۶	-۴.۷۴۲	۱.۱۵۹	۰.۵۳۸
	تهران	-۴.۷۶	-۰.۷۷۲	۰.۴۷۷	۱۰.۰۰۰	-۲.۹۰۹	۰.۳۰۲
	رشت	-۹.۸۱۰	۲.۰۳۹	۱.۶۰۱	-۳.۵۴۸	۱.۰۰۵	۱.۰۵۰
	شیراز	-۶.۲۵۴	-۰.۵۸۱	۱.۸۷۵	-۸.۷۶۸	-۰.۲۴۹	۲.۸۶
مشهد	۰.۴۷۴	-۰.۱۲۶	۰.۰۳۱	-۵.۵۹۸	-۰.۰۰۴	۰.۴۸۶	
RMSE error	اهواز	۱۳.۲۳۰	۲.۰۷۳	۲.۰۸۰	۱۵.۲۶۳	۳.۲۳۵	۲.۱۵۴
	اراک	۵.۱۶۵	۲.۵۳۴	۲.۵۷۳	۲۱.۷۰۴	۳.۹۹۹	۵.۳۴۲
	ارومیه	۱۲.۴۷۵	۲.۸۱۱	۱.۸۹۷	۱۸.۶۵۳	۳.۱۵۷	۱.۹۱۸
	اصفهان	۵.۵۲۹	۳.۹۹۶	۲.۹۵۹	۱۹.۷۹۳	۵.۴۴۰	۳.۷۰۶
	بندرعباس	۲۰.۸۲۹	۲.۱۲۹	۱.۵۶۷	۱۵.۳۹۴	۲.۹۵۹	۲.۱۵۶
	تبریز	۹.۳۴۲	۲.۳۹۶	۳.۳۴۱	۱۴.۸۴۲	۲.۶۳۰	۲.۴۰۶
	تهران	۶.۰۰۶	۱.۳۱۸	۱.۸۷۸	۲۰.۲۱۶	۳.۵۹۰	۲.۹۲۵
	رشت	۱۵.۱۵۸	۲.۶۹۷	۱.۹۷۴	۱۵.۱۲۱	۳.۱۱۸	۲.۲۳۷
	شیراز	۱۱.۷۰۴	۲.۲۹۲	۳.۰۲۰	۱۹.۴۱۳	۳.۶۶۸	۳.۳۸۳
مشهد	۵.۱۴۳	۱.۴۷۵	۱.۶۹۰	۲۳.۳۰۹	۶.۸۹۱	۲.۹۵۰	

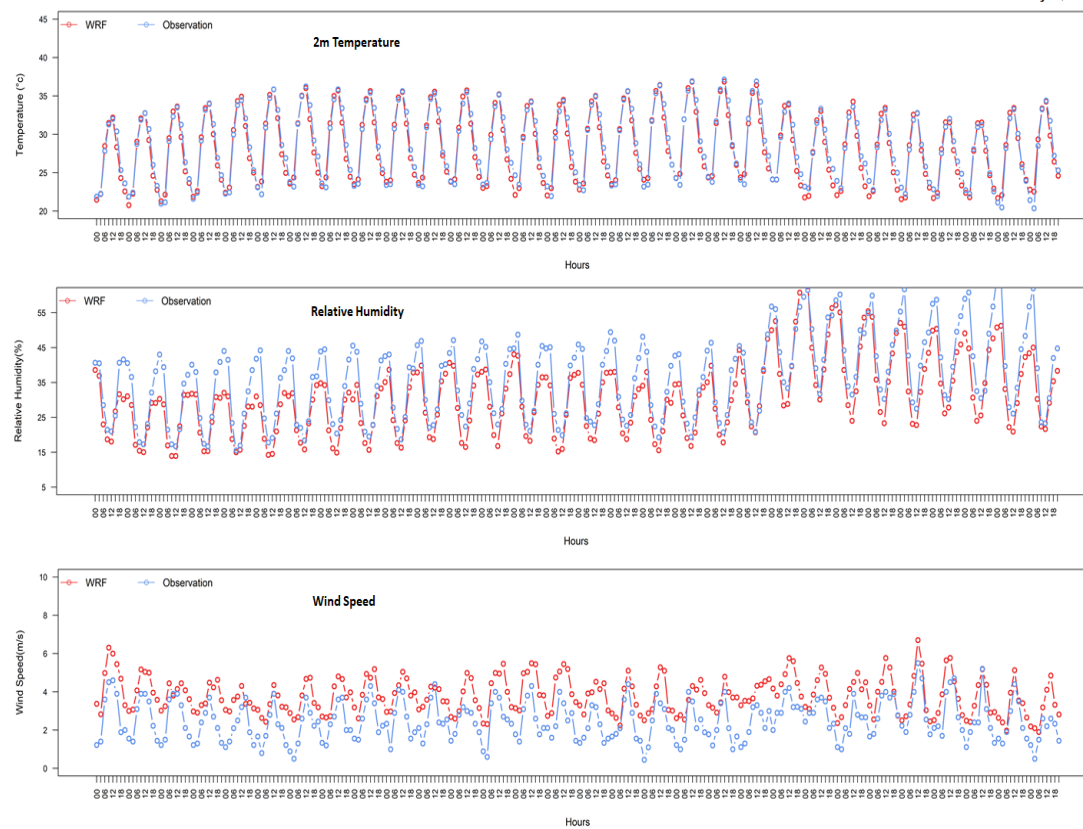
جدول ۴- اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده CH₄ با استفاده از طرحواره گازهای گلخانه‌ای و مقادیر مشاهداتی ماهواره GOSAT

(CH ₄)_Error(ppb)	تابستان (اوت)	زمستان (فوریه)
MAE Error	۴۲.۹۲	۱۲.۰۱
RMSE Error	۴۶.۰۵	۱۳.۹۴
RMSE _u Error	۷.۸۲	۷.۰۹
RMSE _s Error	۴۴.۶۰	۱۱.۶۸
RMSE _{tot} Error	۵۲.۹۹	۱۷.۹
Mean Bias Error	-۲۴.۹۹	۷.۵۰
R	۰.۶۳	۰.۷۶

الف- ژانویه



ب- اوت



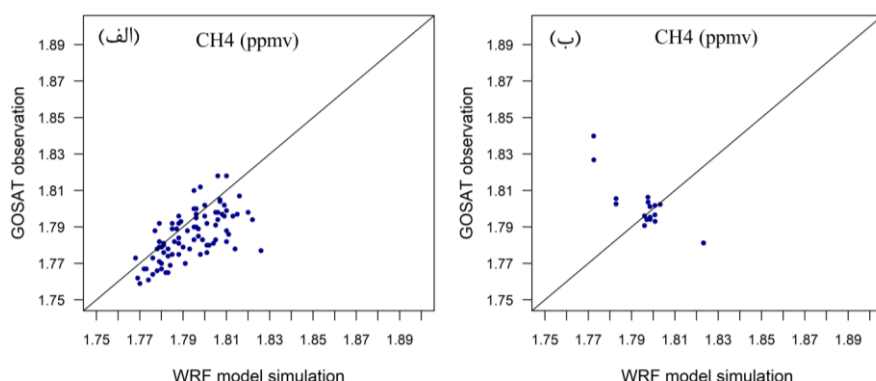
شکل ۵- مقایسه سری‌های زمانی ۶ ساعته، متغیرهای هواشناسی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بوسیله مدل WRF-Chem دما (°C)، رطوبت نسبی (%) و سرعت باد (m/s) در تمام ایستگاه‌های همدیدی برای ماه فوریه (الف) و اوت (ب)

مقایسه میانگین اندازه‌گیری ماهانه توسط GOSAT و شبیه‌سازی WRF این است که نسبت اختلاط غلظت متان از شبیه‌سازی WRF در فصل گرم، حداقل و حداکثر در حدود (۱.۹۹-۱.۷۷) ppmv است، در حالی که ماهواره گوست نسبت ستونی متان را به طور متوسط (۱.۸۳-۱.۷۷) ppmv اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر حداقل و حداکثر در فصل سرد از شبیه‌سازی مدل WRF (۱.۸۹-۱.۷۶) و در ماهواره گوست (۱.۷۵-۱.۸۱) ppmv است. همان گونه که از نتایج خطای بایاس و شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقدار غلظت متان شبیه‌سازی شده برای فوریه و اوت عموماً در مقایسه با اندازه‌گیری‌های GOSAT بیش‌برآورد شده است و اندازه‌گیری ثبت شده توسط ماهواره گوست، مقادیر کمتری را نشان می‌دهد.

علاوه بر این یکی دیگر از دلایل اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر متناظر آن در مشاهدات، ممکن است به دلیل جانبداری در جهت شبیه‌سازی شده باد توسط مدل و الگوی انتخابی گسیل ساعتی باشد. با این حال، دست کم گرفتن یا برآورد بیش از حد ممکن است به دلیل سایر متغیرهای هواشناسی مانند سرعت و دمای باد باشد زیرا مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق متغیرهای هواشناسی نیست. بنابراین، تکنیک‌های داده‌گواری در شبیه‌سازی‌ها، می‌تواند در نتایج شبیه‌سازی‌ها در برآورد بیش از حد یا کم برآورد کردن متغیرها را بهبود بخشد.

شکل ۶ مقایسه میانگین غلظت CH₄ را در قالب نمودار پراکنندگی برای تمام نقاط موجود از ماهواره گوست روی محدوده مورد نظر نشان می‌دهد. نمودار پراکنش احتمالاً ساده‌ترین ابزار ارزیابی می‌باشد. خط ۴۵ درجه معمولاً برای تسهیل تفسیر نمودار پراکنندگی کشیده می‌شود. شکل ۶ نمونه‌ای از نمودار پراکنندگی برای مقایسه پیش‌بینی غلظت ستونی متان حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل و مشاهدات ماهواره‌ای گوست در هر دو ماه فوریه (الف) و اوت (ب) را نشان می‌دهد. هر دو مشاهدات و پیش‌بینی‌ها با یک نقطه بیان می‌شوند و هر "x" حداقل یک مورد، از یک، جفت مشاهده و پیش‌بینی خاص را نشان می‌دهد. به دلیل پوشش بسیار پایین مجموعه داده‌های GOSAT، ما متأسفانه ارزیابی آماری را در نقاطی محدودی بررسی می‌کنیم. تعداد داده‌های موجود از ماهواره گوست در فصل گرم پوشش بسیار پایین تری از فصل سرد را دارا می‌باشد. حجم نمونه داده در فصل گرم و سرد به ترتیب ۹۳ و ۱۷ می‌باشد.

یک نگاه سریع به نمودار بلافاصله برخی از ویژگی‌ها را آشکار می‌کند: مقادیر تغییرات غلظت متان به طور متوسط در هر دو فصل گرم و سرد، بین ۱.۷۷ تا ۱.۸۵ می‌باشد. اگر نقاط در نمودار پراکنندگی، در امتداد خط ۴۵ درجه جمع و منطبق شوند، کیفیت نسبی پیش‌بینی‌ها را نشان می‌دهد و پیش‌بینی‌ها از قابلیت اطمینان کامل‌تری برخوردار هستند. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حداکثر نقاط، زیر خط نیمساز ۴۵ درجه واقع شده‌اند. یک از ویژگی‌های



شکل ۶- مقایسه بین غلظت متان حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های ماهواره‌ای (ppmv) در کل دوره مطالعه ماهانه (الف) فوریه، (ب) اوت

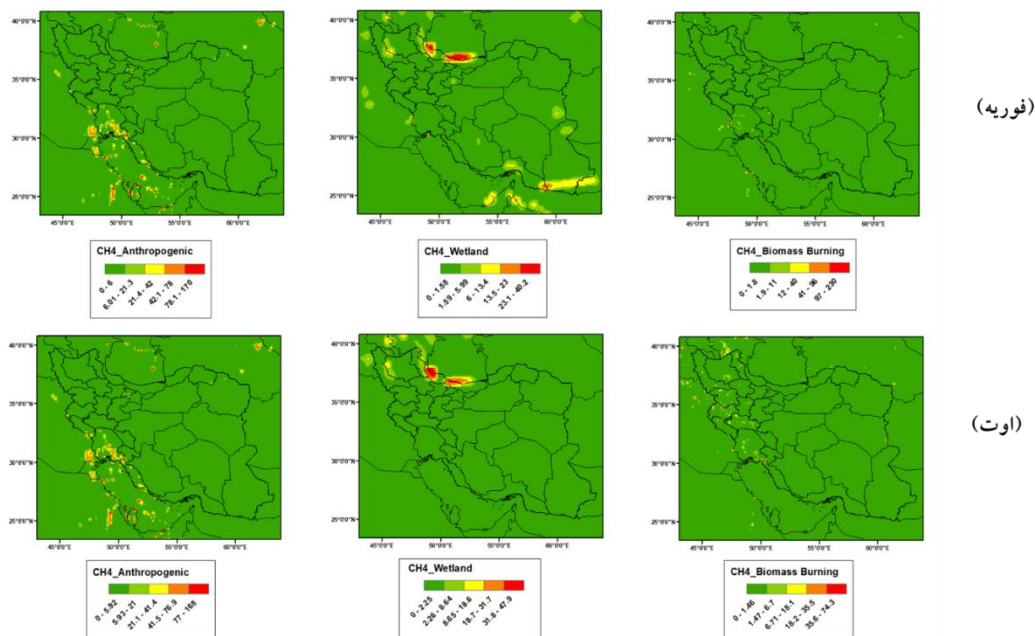
CH₄ توزیع شده در مکان را برای میانگین ماهانه در هر دو فصل گرم و سرد به خوبی نشان دهد. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود CH₄ در قسمت‌های مختلف در طول مطالعه از لحاظ مکانی بسیار خوب توزیع شده است و میانگین تغییرات توزیع متان در فصل گرم در ماه اوت و بالاتر از ماه فوریه در فصل سرد می‌باشد. در هر دو ماه فوریه و اوت، بالاترین نسبت اختلاط متان را در نواحی شمال غرب و غرب کشور می‌باشد. نواحی قسمت‌های شرقی، مرکزی و تا حدودی حوزه جنوبی، تقریباً هیچ منبع گسیلی برای متان نشان نمی‌دهد، بنابراین نسبت‌های اختلاط مشاهده شده در این مناطق را می‌توان به عنوان مقادیر پس زمینه در نظر گرفت.

جدول ۵ نمای کلی بودجه‌های گسیل منابع مختلف متان را به صورت متوسط ماهانه، برای حوزه مورد مطالعه، نشان می‌دهد. سوختن زیست توده دارای کوچکترین بودجه گسیل ۶.۵٪ و ۳.۲٪ به ترتیب در تابستان و زمستان، در مطالعه است. همانطور که انتظار می‌رفت بودجه گسیل انسانی در حال حاضر بزرگترین منبع گسیل CH₄ است و به طور متوسط ۶۸.۸٪ و ۶۳.۵٪ برای دو ماه اوت و فوریه می‌باشد، پس از گسیل منابع انسانی، بزرگترین منبع گسیل CH₄ تالاب‌ها با بودجه ۲۴.۴٪ و ۳۳.۱٪ در ماه‌های اوت و فوریه می‌باشد. مجموع این گسیل‌ها به عنوان ورودی برای شبیه‌سازی در WRF-Chem استفاده می‌شود (شکل ۷).

توزیع مکانی میانگین غلظت شبیه‌سازی شده CH₄ ارائه در شکل ۸ نشان می‌دهد که مدل WRF-Chem قادر است

جدول ۵- بودجه منابع گسیل CH₄، مورد استفاده در حوزه مطالعاتی WRF-Chem

منابع گسیل (mol/km ² hr)	تابستان (%)	زمستان (%)
Anthropogenic	۶۸.۸	۶۳.۵
Biomass Burning	۶.۵	۳.۲
Wet land	۲۴.۴	۳۳.۱



شکل ۷- بودجه گسیل منابع مختلف متان (گسیل انسانی، گسیل تالاب و گسیل احتراق زیست توده) (mol/km²hr) را به صورت متوسط ماهانه، برای حوزه مورد مطالعه (الف) فوریه، (ب) اوت

غالب است، وجود داشته باشد و بتوان گسیل گازهای CH₄ تالاب را به عنوان تابعی از ویژگی‌هایی مانند بارش و رطوبت خاک که بر میزان گسیل تأثیر می‌گذارد (Walter and Heimann, 2000) شناخت. هنگام پیاده سازی چنین مدلی باید به آن توجه کرد که از نظر محاسباتی، ممکن است عدم تطابق خاصی بین گسیل CH₄ تالاب از این سیاهه گسیل و شرایط آبرفتگی وجود داشته باشد. به ویژه در مناطقی که شرایط طغیان بالا در تالاب‌ها وجود دارد. بنابراین برای تحقیقات آینده مقایسه گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شده با دیگر موجودی‌های گسیل CH₄ تالاب، توصیه می‌شود.

توضیحات متعدد احتمالی برای پیشرفت گسیل متان در منطقه ایران وجود دارد که یکی از این احتمالات، نقش گسیل متان در اثر سوختن زیست توده است (آتش‌سوزی). خشک شدن بیش از حد هوا به همراه گرمی شدید، باعث افزایش آتش‌سوزی جنگل‌ها و در نتیجه گسیل بیشتر متان شود. با این حال، به دلیل سهم نسبی کم آتش‌گرفتن زیست توده در بودجه کل گسیل (جدول ۵)، بعید به نظر می‌رسد که افزایش بزرگ مشاهده شده در XCH₄ اوت در نواحی غربی کشور، ناشی از افزایش آتش‌سوزی زیست توده در مقایسه با شرایط معمولی برای این منطقه باشد.

یک منبع متفاوت که ممکن است توزیع متان مشاهده شده در این منطقه را توضیح دهد، گسیل انسانی با استخراج سوخت‌های فسیلی است. نواحی غرب و جنوب غرب کشور به دلیل بهره‌برداری از منابع معدنی مانند، نفت و گاز طبیعی، که منابع شناخته شده متان هستند (شکل ۷)، که گسیل ناشی از استخراج سوخت‌های فسیلی در پایگاه داده گسیل EDGAR گنجانده شده است، اما به احتمال زیاد این موارد دست کم گرفته می‌شوند.

گسیل متان سوخت فسیلی از EDGAR، موجودی گسیل متان بر روی منطقه مورد نظر به عنوان گسیل انسانی داده‌گوارای شده به مدل است که بر اساس فهرست گسیل منتشر شده از هر کشور به کنوانسیون چارچوب تغییر آب و هوا سازمان ملل متحد (UNFCCC) در سال ۲۰۱۰، است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با گسیل گازهای گلخانه‌ای توسط اسکارپلی و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که ارتقای

با توجه به نسبت اختلاط در نواحی شرقی کشور، علاوه بر مقادیر ناشی از غلظت پس‌زمینه در این نواحی، همچنین به نقش مهم انتقال، که توسط بادهای شدید موجود در این منطقه منعکس می‌شود باید اشاره کرد، که این بادهای عامل مهم انتقال CH₄ گسیل شده را در جهت شرق کشور می‌باشند. یک الگوی جالب دیگر که با این شبیه‌سازی قابل مشاهده است، نقش اوروگرافی است. نقش اوروگرافی بسیار قوی است و به نظر می‌رسد که کوهها مانع از انتقال متان به سمت نواحی اطراف می‌شوند و باعث تجمع متان در همان ناحیه می‌شود.

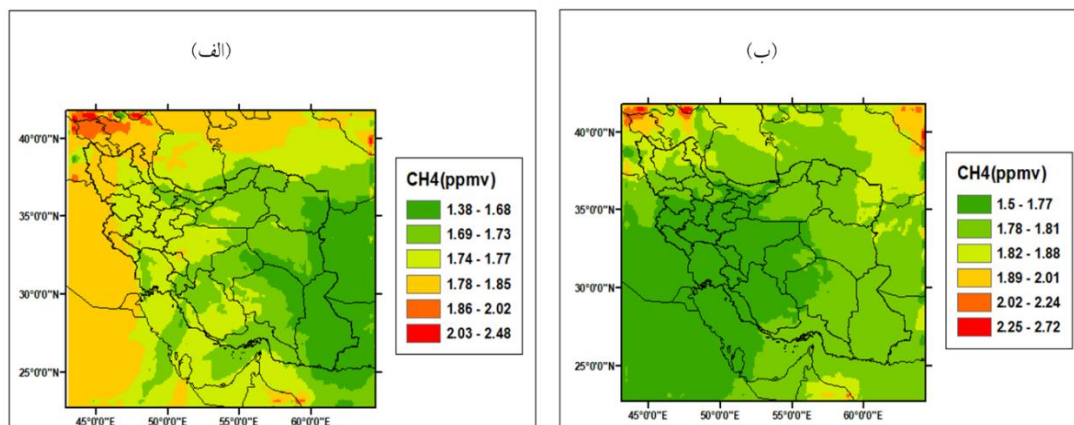
منطقه وسیعی از ناحیه شمالی کشور پوشیده از شالیزارهای برنج می‌باشد، که این مناطق، به عنوان منابع CH₄ حاصل از کشاورزی، به حساب می‌آید و منبع ثابتی برای گسیل متان از نواحی مرطوب هستند. از آنجا که مناطق جنوب شرق ایران و منطقه خوزستان و غرب کشور تالاب‌هایی قرار دارند، همچنین ممکن است که این تالاب‌ها در واقع علت اصلی ارتقاء CH₄ مشاهده شده در این نواحی باشند.

مطالعه میچ و همکاران در سال ۲۰۱۰، نشان داد که وقتی خاک‌ها بیش از حد مرطوب هستند، متان کمتری از خود گسیل می‌کنند، بنابراین با دلالت بر برخی شرایط مطلوب رطوبتی برای خاک، گسیل CH₄ رخ می‌دهد. این عامل ممکن است تفاوت مشاهده شده در XCH₄ بین فوریه و اوت که شبیه‌سازی شده است را برای مناطقی که XCH₄ اندازه‌گیری شده در اوت بیشتر از فوریه می‌باشد، را توضیح دهد. در طول فصل مرطوب در فوریه، آب زیادی در خاک تالاب وجود داشته باشد، که گسیل گاز متان را محدود تر می‌کند. در طول فصل خشک در ماه اوت، زمانی که خاک خشک تر است، اما هنوز به اندازه کافی مرطوب است تا تولید متان را آغاز کند، و مقادیر قابل توجهی متان در مقایسه با فوریه گسیل می‌کنند.

سیاهه گسیل تالاب مورد استفاده در این پژوهش، که برای شبیه‌سازی استفاده شده است، براساس میانگین ماهانه میزان گسیل در سال ۲۰۱۰ است. با این حال، ثابت شده است که به نظر می‌رسد ناسازگاری‌هایی در مورد تضادهای فصلی اندازه‌گیری شده از CH₄، بین مشاهدات ماهواره گوست و WRF_Chem شبیه‌سازی شده در مناطقی که گسیل تالاب

باشد. این فرضیه با چندین مطالعه دیگر مطابقت دارد، که همچنین نشان می‌دهد گسیل متان ناشی از استخراج سوخت‌های فسیلی توسط EDGAR دست کم گرفته شده است (Miller et al., 2013; Maasakkers et al., 2013). یکی دیگر از معایب پایگاه داده گسیل EDGAR این است که این داده‌ها به طور متوسط سالانه ارائه می‌شوند برای تحقیقات آینده که شامل گسیل گازهای متان می‌شود، توصیه می‌کنیم نه تنها به پایگاه داده EDGAR تکیه کنید، بلکه از سایر موجودی‌های گسیل گازهای آلاینده تولید شده استفاده از سوخت نیز استفاده کنید.

گسیل حاصل از سوخت‌های فسیلی نها تا حدی، برخی از تفاوت‌های مشاهده شده بین شبیه‌سازی و مشاهدات را کاهش می‌دهد. سیاهه گسیل CH₄ انسانی شبیه‌سازی شده در این مطالعه، تنها با استفاده از پایگاه داده EDGAR v5، به عنوان ورودی شار CH₄ انسان ساخت، استفاده شده است و نمی‌تواند به طور کامل نسبت‌های مخلوط XCH₄ مشاهده شده توسط GOSAT را به خوبی در هر دو فصل خشک و مرطوب بازتولید کند. ما انتظار داریم که تفاوت در XCH₄ بین شبیه‌سازی‌های WRF و GOSAT تا حدی ناشی از دست کم گرفتن گسیل CH₄ توسط بهره برداری از سوخت در EDGAR



شکل ۸- توزیع فضایی مدل WRF-Chem شبیه‌سازی غلظت CH₄(ppmv) متوسط دوره ماهانه (الف) فوریه، (ب) اوت

بیش برآورد و در فصل گرم کم برآورد می‌کند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که مدل در فصل سرد (ماه فوریه) با توجه به خطاهای آماری بهتر از فصل گرم (ماه اوت) عمل می‌کند. خطاهای شبیه‌سازی متان را می‌توان به اشتباهات در شبیه‌سازی اجزای مختلف ورودی سیاهه گسیل متان نسبت داد. بهبود شبیه‌سازی برای پارامترهای مختلف داده‌گواری شده به مدل به عنوان گسیل اولیه متان، می‌تواند به طور کلی به بهبود شبیه‌سازی متان کمک کند.

منابع احتمالی خطاها در اجزای متان، پیش‌بینی شده شامل عدم قطعیت در گسیل انسانی، بیوژنیک، مقادیر غلظت پس زمینه به عنوان شرایط اولیه و مرزی میدان‌های شیمیایی آلاینده‌ها و مقادیر پس زمینه میدان‌های هواشناسی، که به پیش‌بینی‌های هواشناسی بستگی دارد، می‌شود. عدم قطعیت در گسیل شیمیایی مدل، در مکان‌های مختلف (به عنوان

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از مدل WRF-Chem برای شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌های هوا (گاز گلخانه‌ای متان) در منطقه خاورمیانه-ایران در دوره مطالعاتی دو ماه فوریه و اوت در سال ۲۰۱۰، استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن حساسیت مدل با استفاده از طرحواره شیمی فاز گازی GHG انجام شده است.

یافته‌های اصلی بدست آمده از این پژوهش عبارتند از: این مدل قادر است تغییرات زمانی دمای سطح، رطوبت نسبی و باد را باز تولید کند. این مدل در منطقه مورد مطالعه (ایران) دمای هوا و رطوبت نسبی را کم برآورد می‌کند. در شبیه‌سازی غلظت متان، و بررسی نتایج حاصل از مدل در مقایسه با داده‌های ماهواره گوست، مدل WRF-Chem، غلظت متان را نسبت به مشاهدات ماهواره‌ای در فصل سرد

منابع

- Ahmadov, R., C. Gerbig, R. Kretschmer, S. Körner, C. Rödenbeck, P. Bousquet, and M. Ramonet, 2009: Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO₂ transport models with coastal tower measurements of CO₂. *Biogeosciences*, 6, 807–817.
 - Ahmadov, R., C. Gerbig, R. Kretschmer, S. Körner, C. Rödenbeck, P. Bousquet, and M. Ramonet. "Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO₂ transport models with coastal tower measurements of CO₂." *Biogeosciences* 6, no. 5 (2009): 807-817.
 - Alijani, Behloul, Tulabi Nejad, and Karbalaei Dari. "Behavior measurement of the effect of global warming on subtropical high pressure." *Natural Geography Research* 51, no. 1 (2019): 33-50.
 - Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., et al. (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annual review of earth and planetary sciences*, 37:117–134.
 - Ballav, Srabanti, Prabir K. Patra, Masayuki Takigawa, Sarbari Ghosh, Utpal K. De, Shamil Maksyutov, Shohei Murayama, Hitoshi Mukai, and Shigeru Hashimoto. "Simulation of CO₂ concentration over East Asia using the regional transport model WRF-CO₂." *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II 90, no. 6 (2012): 959-976.
 - Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E.-G., Carouge, C., Langenfelds, R. L., Lathière, J., Papa, F., Ramonet, M.,
- مثال، روستایی، شهری، حومه)، عوامل هواشناسی که می‌توانند بر غلظت‌ها تأثیر بگذارند، همچنین نیاز به بهبود پیش‌بینی‌های هواشناسی به ویژه خطاهای بزرگ در پیش‌بینی سرعت باد وجود دارد.
- باد عامل مهمی در انتقال حمل و نقل آلاینده‌ها است و همچنین روی فرآیندهای دیگر مانند رسوب خشک تأثیر می‌گذارد. اشتباه در سرعت باد و جهت باد می‌تواند منجر به نمایش ضعیف انتقال و اختلاط شود. تشکیل ابرها بر میزان بارش تأثیر می‌گذارد، که مستقیماً بر پاک‌سازی مرطوب آلاینده‌ها توسط قطرات ابر باران و رسوب مرطوب بعدی تأثیر می‌گذارد.
- تغییرات هواشناسی می‌تواند به نوبه خود به واکنش‌های فتولیتیک منجر شود. یکی از راه‌های بهبود چنین شبیه‌سازی‌ها استفاده از گنجاندن میزان گسیل بهتر CH₄ اولیه و میدان‌های اولیه پیش‌زمینه CH₄ و همچنین تکنیک‌های گنجاندن جذب داده است. مقادیر گسیل، دقیق نیز برای بهبود کیفیت شبیه‌سازی هوا ضروری است. حالت ایده‌آل ورود گسیل مستمر در زمان واقعی به مدل‌ها است، با این حال، ممکن است این شرایط همیشه امکان پذیر نباشد. ممکن است خطاهایی در برآورد گسیل انسانی و بیوژنیک ایجاد شود که باید به حداقل برسد.

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 XCH₄، نسخه ۲.۹۵، گزارش شده در این مقاله در بخش 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) تشکر می‌کنیم. داده‌های NIES XCH₄، نسخه ۲.۹۵، از طریق سرویس بایگانی داده GOSAT (GDAS) در: <https://data2.gosat.nies.go.jp/> بدست آمده است.

13. Dlugokencky, E. J., S. Houweling, L. Bruhwiler, K. A. Masarie, P. M. Lang, J. B. Miller, and Tans, P. P. (2003). Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state?, *Geophysical Research Letters*, 30, no. 19.
14. Duncan, B. N., Martin, R. V., Staudt, A. C., Yevich, R., and Logan, J. A. (2003). Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2): ACH-1.
15. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., and Van Dorland, R. (2007). *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
16. Frankenberg, C., D. Wunch, G. Toon, Camille Risi, R. Scheepmaker, J-E. Lee, P. Wennberg, and J. Worden. "Water vapor isotopologue retrievals from high-resolution GOSAT shortwave infrared spectra." *Atmospheric Measurement Techniques* 6, no. 2 (2013): 263-274.
17. Frankenberg, C., Meirink, J. F., van Weele, M., Platt, U., and Wagner, T. (2005). Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, 308(5724):1010-1014
18. Grell, Georg A., Steven E. Peckham, Rainer Schmitz, Stuart A. McKeen, Gregory Frost, William C. Skamarock, and Brian Eder. "Fully coupled "online" chemistry within the WRF model." *Atmospheric Environment* 39, no. 37 (2005): 6957-6975.
- Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C., and White, J. (2006). Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, 443(7110): 439-443.
7. Bovensmann, H., Burrows, J., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V., Chance, K., and Goede, A. (1999). Sciamachy: Mission objectives and measurement modes. *Journal of the atmospheric sciences*, 56(2):127-150.
8. Butz, André, Otto P. Hasekamp, Christian Frankenberg, and Ilse Aben. "Retrievals of atmospheric CO₂ from simulated space-borne measurements of backscattered near-infrared sunlight: accounting for aerosol effects." *Applied optics* 48, no. 18 (2009): 3322-3336.
9. Chanton, J. P. and Smith, L. K. (1993). Seasonal variations in the isotopic composition of methane associated with aquatic macrophytes. In *Biogeochemistry of Global Change*, pages 619-632. Springer.
10. Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B. H., Nykänen, H., Martikainen, P. J., and Oskarsson, H. (2003). Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*, 30(7).
11. Corbin, K. D., A. S. Denning, E. Y. Lokupitiya, A. E. Schuh, N. L. Miles, K. J. Davis, S. Richardson, and I. T. Baker, 2010: Assessing the impact of crops on regional CO₂ fluxes and atmospheric concentrations. *Tellus B*, 62, 521-532.
12. Dlugokencky, E. J. (2019). Trends in Atmospheric Methane (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/). NOAA/ESRL.

23. Law, R. M., P. J. Rayner, and et al., 1996: Variations in modelled atmospheric transport of carbon dioxide and the consequences for CO₂ inversions. *Global Biogeochem. Cyc.* 16, GB1053, doi: 10.1029/96GB01892.
24. Law, R. M., W. Peters, and et al., 2008: TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Experimental overview and diurnal cycle results for 2002. *Global Biogeochem. Cyc.*, 22, GB3009, doi:10.1029/2007GB003050.
25. Maasakkers, J. D., Jacob, D. J., Sulprizio, M. P., Scarpelli, T. R., Nesser, H., Sheng, J.-X., Zhang, Y., Hersher, M., Bloom, A. A., Bowman, K. W., et al. (2019). Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010–2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(11):7859–7881.
26. Massart, S., Agusti-Panareda, A., Aben, I., Butz, A., Chevallier, F., Crevoisier, C., Engelen, R., Frankenberg, C., and Hasekamp, O. (2014). Assimilation of atmospheric methane products in the macc-ii system: from sciamachy to tanso and iasi. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1
27. Miao, Ru, Ning Lu, Ling Yao, Yunqiang Zhu, Juanle Wang, and Jiulin Sun. "Multi-year comparison of carbon dioxide from satellite data with ground-based FTS measurements (2003–2011)." *Remote Sensing* 5, no. 7 (2013): 3431-3456.
28. Miller, S. M., Wofsy, S. C., Michalak, A. M., Kort, E. A., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Dlugokencky, E. J., Eluszkiewicz, J., Fischer, M. L., Janssens-Maenhout, G., et al. (2013). Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proceedings*
19. Hansen, J. E. and Sato, M. (2001). Trends of measured climate forcing agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(26):14778–14783.
20. Houweling, S., F-M. Breon, I. Aben, C. Rödenbeck, M. Gloor, M. Heimann, and Ph Ciais. "Inverse modeling of CO₂ 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, no. 2 (2004): 523-538.
21. Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunoy, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D. R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E. L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P. J., Krummel, P. B., Lamarque, J.-F., Langenfelds, R. L., Le Quééré, C., Naik, V., O'Doherty, S., Palmer, P. I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R. G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D. T., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, L. P., Strode, S. A., Sudo, K., Szopa, S., van der Werf, G. R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R. F., Williams, J. E., and Zeng, G. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6(10):813–823.
22. Kuze, Akihiko, Hiroshi Suto, Masakatsu Nakajima, and Takashi Hamazaki. "Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring." *Applied optics* 48, no. 35 (2009): 6716-6733.

- Chem using Lidar-observed data. SOLA, 3, 133–136, doi:10.2151/sola.2007-034
36. Oshchepkov, Sergey, Andrey Bril, Tatsuya Yokota, Paul O. Wennberg, Nicholas M. Deutscher, Debra Wunch, Geoffrey C. Toon et al. "Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO₂ retrievals over TCCON sites." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, no. 3 (2013): 1493-1512.
37. Pandey, S., Houweling, S., Krol, M., Aben, I., Monteil, G., Nechita-Banda, N., Dlugokencky, E. J., Detmers, R., Hasekamp, O., Xu, X., Riley, W. J., Poulter, B., Zhang, Z., McDonald, K. C., White, J. W. C., Bousquet, P., and Röckmann, T. (2017). Enhanced methane emissions from tropical wetlands during the 2011 La Niña. *Scientific Reports*, 7(1): 45759.
38. Parker, R. "Boesch h, Cogan A, Fraser A, Feng L, Palmer Pi, et al. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: comparison to groundbased TCCON data and model calculations." *Geophys Res Lett* 38 (2011): 15.
39. Patra, P. K., R. M. Law, W. Peters, et al., 2008: TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Analysis of synoptic-scale variations for the period 2002–2003. *Global Biogeochem. Cyc.*, 22, GB4013, doi:10.1029/2007GB00381
40. Petrenko, V. V., Smith, A. M., Brook, E. J., Lowe, D., Riedel, K., Brailsford, G., Hua, Q., Schaefer, H., Reeh, N., Weiss, R. F., et al. (2009). 14CH₄ measurements in Greenland ice: investigating last glacial of the National Academy of Sciences, 110(50):20018–20022.
29. Mitsch, W. J., Nahlik, A., Wolski, P., Bernal, B., Zhang, L., and Ramberg, L. (2010). Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands ecology and management*, 18(5):573–586.
30. Mitsch, William J., Amanda Nahlik, Piotr Wolski, Blanca Bernal, Li Zhang, and Lars Ramberg. "Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions." *Wetlands ecology and management* 18, no. 5 (2010): 573-586.
31. Neue, H., Gaunt, J., Wang, Z., Becker-Heidmann, P., and Quijano, C. (1997). Carbon in tropical wetlands. *Geoderma*, 79(1-4):163–185
32. Nisbet, E. and Chappellaz, J. (2009). Shifting gear, quickly. *Science*, 324(5926):477–478.
33. Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., and Bousquet, P. (2014). Methane on the rise—again. *Science*, 343(6170):493–495.
34. Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., Manning, M. R., Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Michel, S. E., Miller, J. B., White, J. W. C., Vaughn, B., Bousquet, P., Pyle, J. A., Warwick, N. J., Cain, M., Brownlow, R., Zazzeri, G., Lanoisellé, M., Manning, A. C., Gloor, E., Worthy, D. E. J., Brunke, E.-G., Labuschagne, C., Wolff, E. W., and Ganesan, A. L. (2016). Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9):1356–1370
35. Niwano, M., M. Takigawa, M. Takahashi, H. Akimoto, M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai, and Y. Mano, 2007: Evaluation of vertical ozone profiles simulated by WRF/

- of CO₂ Greenhouse Gas Estimation Algorithms Based on GOSAT Satellite Data and Ground-based Observation Stations, Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, 12(3), 23-36. magiran.com/p2251001.
47. Sarrat, C., J. Noilhan, A. J. Dolman, C. Gerbig, R. Ahmadov, L. F. Tolk, A. G. C. A Meesters, R. W. A. Hutjes, H. W. Ter Maat, G. Perez-Landa, and S. Donier, 2007: Atmospheric CO₂ modelling at the regional scale: an intercomparison of 5 meso-scale atmospheric models. *Biogeoscience*, 4, 1115–1126
48. Scarpelli, T., Jacob, D., Maasackers, J., Sheng, J. X., Rose, K., Payer Sulprizio, M., and Worden, J. (2018). A Global Gridded Inventory of Methane Emissions from Fuel Exploitation including Oil, Gas, and Coal. AGU Fall Meeting Abstracts.
49. Skamarock, William C. "A Description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR technical note, NCAR/TN-468+STR." http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf (2005).
50. Skamarock, William C., Joseph B. Klemp, Jimmy Dudhia, David O. Gill, Dale M. Barker, Michael G. Duda, Xiang-Yu Huang, Wei Wang, and Jordan G. Powers. "A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR." National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA 125 (2008).
51. Taguchi, S., R. M. Law, C. Rödenbeck, P. K. Patra, S. Maksyutov, W. Zahorowski, H. Sartorius, and I. Levin, 2011: TransCom continuous experiment: comparison of 222Rn transport at hourly time scales at three stations in Germany. *Atmos. Chem. termination CH₄ sources. Science*, 324(5926): 506–508.
41. Peylin, Philippe, Sander Houweling, Maarten C. Krol, Ute Karstens, Christian Rödenbeck, Camilla Geels, Alex Vermeulen et al. "Importance of fossil fuel emission uncertainties over Europe for CO₂ modeling: model intercomparison." *Atmospheric chemistry and physics* 11, no. 13 (2011): 6607-6622.
42. Rigby, M., Montzka, S. A., Prinn, R. G., White, J. W., Young, D., O'Doherty, S., Lunt, M. F., Ganesan, A. L., Manning, A. J., Simmonds, P. G., et al. (2017). Role of atmospheric oxidation in recent methane growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(21):5373–5377.
43. Rigby, M., Prinn, R. G., Fraser, P. J., Simmonds, P. G., Langenfelds, R. L., Huang, J., Cunnold, D. M., Steele, L. P., Krummel, P. B., Weiss, R. F., O'Doherty, S., Salameh, P. K., Wang, H. J., Harth, C. M., Mühle, J., and Porter, L. W. (2008). Renewed growth of atmospheric methane. *Geophysical Research Letters*, 35(22):L22805.
44. Ringeval, B., Houweling, S., Van Bodegom, P. M., Spahni, R., Van Beek, R., Joos, F., and Röckmann, T. (2014). Methane emissions from floodplains in the Amazon Basin: Challenges in developing a process-based model for global applications. *Biogeosciences*, 11(6):1519–1558.
45. 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.
46. Samira Karbasi, Hossein Malakooti, Mehdi Rahnama, Majid Azadi, (2021). Evaluation

- derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): 745–765.
59. Walter, Bernadette P., and Martin Heimann. "A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate." *Global Biogeochemical Cycles* 14, no. 3 (2000): 745-765.
 60. Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov. "Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results." *Sola* 5 (2009): 160-163.
 61. Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S. (2009). Global concentrations of co₂ and ch₄ retrieved from gosat: First preliminary results. *Sola*, 5:160–163.
 62. Yoshida, Y., Y. Ota, N. Eguchi, N. Kikuchi, K. Nobuta, H. Tran, I. Morino, and T. Yokota. "Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite." *Atmospheric Measurement Techniques* 4, no. 4 (2011): 717-734.
 - Phys., 11, 10071–10084, doi:10.5194/acp-11-10071-2011.
 52. Takigawa, M., M. Niwano, H. Akimoto, and M. Takahashi, 2007: Development of one way nested global-regional air quality forecasting model. *SOLA*, 3, 81–84.
 53. Tolk, L. F., A. G. C. A. Meesters, A. J. Dolman, and W. Peters. "Modelling representation errors of atmospheric CO₂ mixing ratios at a regional scale." *Atmospheric chemistry and physics* 8, no. 22 (2008): 6587-6596.
 54. Tolk, L. F., A. J. Dolman, A. G. C. A. Meesters, and Wouter Peters. "A comparison of different inverse carbon flux estimation approaches for application on a regional domain." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, no. 20 (2011): 10349-10365.
 55. Turner, A. J., Frankenberg, C., Wennberg, P. O., and Jacob, D. J. (2017). Ambiguity in the causes for decadal trends in atmospheric methane and hydroxyl. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(21):5367–5372.
 56. Verkaik, Joost, and Laurens GANZVELD. *Evaluation of Colombian Methane Emissions Combining WRF-Chem and TROPOMI*. 2019.
 57. Vogel, Felix R., Balendra Thiruchittampalam, Jochen Theloke, Roberto Kretschmer, Christoph Gerbig, Samuel Hammer, and Ingeborg Levin. "Can we evaluate a fine-grained emission model using high-resolution atmospheric transport modelling and regional fossil fuel CO₂ observations?" *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 65, no. 1 (2013): 18681.
 58. Walter, B. P. and Heimann, M. (2000). A process-based, climate-sensitive model to