

## Evaluation of CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Estimation Algorithms Based on GOSAT Satellite Data and Ground-based Observation Stations

Samira Karbasi.<sup>1</sup>, Hossein Malakooti.<sup>2\*</sup>, Mehdi Rahnama.<sup>3</sup>, Majid Azadi.<sup>4</sup>

1. Ph.D. of Meteorology Student, School of Marine Science and Technology, Hormozgan university, Hormozgan, Iran
2. Prof. of Dep. of Atmospheric Biological Sciences, Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University, Hormozgan, Iran
3. Prof. of Dep. of Remote Sensing, Tehran Meteorological Institute, Tehran, Iran
4. Prof. of Dep. of Dynamic Meteorology, Tehran Meteorological Institute, Tehran, Iran

### Abstract

Increasing greenhouse gas concentrations, as a result of global warming and climate change, are recognized as one of the most important challenges of the 21st century. In this report, we compare data products from three different algorithms with the reference data obtained by ground-based high-resolution Fourier Transform Spectrometers (g-b FTSS) in the Total Carbon Column Observing Network (TCCON), with the 8 selected sites in five years (2011-2015). The algorithms evaluated are NIES, ACOS and SRFP algorithms. These algorithms are focused on retrieving the column abundance of the CO<sub>2</sub> to take advantage of the molecular amounts of dry air carbon dioxide (XCO<sub>2</sub>). To evaluate the products of each algorithm with its equivalent ground observations, statistical indices such as Bias error, root mean square error (RMSE), absolute error (MAE), standard deviation (SD), and Pearson correlation coefficient (CR) were used. By examining the values presented by each algorithm and comparing it with the ground observation values, it can be concluded that the NIES, ACOS, and RemoTeC (SRFP) algorithms have the lowest RMSE, Bias and MAE error respectively. The best agreements with TCCON measurements in the most stations were detected for NIES 02.xx. The SRFP algorithm has a significant difference in estimating CO<sub>2</sub> retrieving rates compared to the other two algorithms. So that the lowest correlation values belong to the SRFP algorithm and the highest correlation, values belong to the NIES algorithm.

**Keywords:** GOSAT Satellite, Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), Greenhouse Gas, Retrieving Algorithm.

\* Correspondence Address: Faculty of Marine Science and Technology, No. 3995, University of Hormozgan, Five Km from Minab Road, Bandar Abbas, Hormozgan, Postal Code: 7916193145. Tel: (+98 76) 33711000-11  
Email: malakooti@hormozgan.ac.ir  
<https://doi.org/10.52547/gisj.12.3.23>



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۹  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 3, Autumn 2020

۳۴-۲۳  
مقاله پژوهشی

## بررسی عملکرد الگوریتم‌های تخمین غلظت گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub>، براساس داده‌های ماهواره گوست (GOSAT) و ایستگاه‌های زمینی

سمیرا کرباسی<sup>۱</sup>، حسین ملکوتی<sup>۲\*</sup>، مهدی رهنما<sup>۳</sup>، مجید آزادی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران
۲. دانشیار گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران
۳. دانشیار سنجش از راه دور، گروه کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران
۴. دانشیار گروه پژوهشی هواشناسی سینوپتیکی و دینامیکی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

### چکیده

افزایش سطح غلظت گازهای گلخانه‌ای و به تبع آن، گرم‌شدن کره زمین و تغییرات آب‌وهوایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم شناخته شده است. این پژوهش عملکرد الگوریتم‌های موجود در بازیابی غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن را، براساس داده‌های مشاهداتی ماهواره نظارت بر گازهای گلخانه‌ای گوست (GOSAT)، در مقایسه با داده‌های مرجع به‌دست‌آمده از شبکه سطحی (TCCON)، در هشت سایت منتخب در دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۱ بررسی می‌کند. الگوریتم‌های مورد ارزیابی عبارتند از الگوریتم NIES، ACOS و RemoTeC (SRFP). این الگوریتم‌ها بر بازیابی فراوانی ستونی از گازهای مورد نظر متمرکز شده‌اند تا از مقادیر مولکولی هوای خشک اتم دی‌اکسید کربن (XCO<sub>2</sub>) بهره بگیرند. برای ارزیابی محصولات هر الگوریتم با مقدار معادل مشاهداتی زمینی آن، از شاخص‌های آماری اریبی (Bias)، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE)، خطای مطلق (MAE)، انحراف معیار (SD) و ضریب همبستگی پی‌یرسون (CR) در هر ایستگاه استفاده شده است. نتایج بررسی مقادیر داده‌شده نشان می‌دهد که، در بیشتر ایستگاه‌های زمینی مورد نظر، به ترتیب الگوریتم‌های NIES، ACOS، RemoTeC (SRFP) دارای کمترین خطای MAE، RMSE و کمترین خطای اریبی بوده‌اند. همچنین، کمترین مقادیر همبستگی (بین هر الگوریتم و شبکه سطحی) متعلق به الگوریتم (SRFP) و بیشترین مقادیر آن، درمورد بیشتر ایستگاه‌ها، متعلق به الگوریتم NIES در یک میانگین پنج‌ساله (۲۰۱۱-۲۰۱۵) است.

**کلیدواژه‌ها:** ماهواره گوست، دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>)، گازهای گلخانه‌ای، الگوریتم بازیابی.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: هرمزگان، بندرعباس، کیلومتر پنج جاده میناب، دانشگاه هرمزگان، دانشکده علوم و فنون دریایی، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی.

تلفن: ۰۷۶-۳۳۷۱۱۰۰۰-۱۱

## ۱- مقدمه

بیست و سوم ژانویه ۲۰۰۹ در مدار قرار گرفته، مشاهدات طیفی بسیاری با وضوح بالا، انعکاس یافته از نور خورشید، به دست مؤسسه ملی مطالعات زیست محیطی (NIES)<sup>۲</sup> تهیه شده و موجود است.

الگوریتم‌هایی در گروه‌های گوناگون، در سراسر جهان، برای پردازش داده‌های گوست وجود دارد که توزیع‌های جهانی و زمانی مقادیر گازهای گلخانه‌ای را بازیابی سیستماتیک می‌کند. این الگوریتم‌ها بر بازیابی فراوانی ستونی از گازهای مورد نظر متمرکز شده‌اند تا از مقادیر مولکولی هوای خشک اتم دی‌اکسید کربن ( $XCO_2$ ) به همراه متان ( $XCH_4$ ) بهره بگیرند. تیم‌های تحقیقاتی NIES، ACOS<sup>۳</sup> و RemoTeC<sup>۴</sup>، به صورت ویژه و به کمک الگوریتم‌های عملیاتی مخصوص به خود، محصولات استاندارد و منظمی از داده‌های ماهواره GOSAT تولید و عرضه کرده‌اند. الگوریتم‌های NIES و ACOS، به ترتیب، در برخی مقالات (Yoshida et al., 2011a; O'Dell et al., 2012; Crisp et al., 2011) شرح داده شده است. الگوریتم مربوط به مؤسسه تحقیقات فضایی هلند و مؤسسه تکنولوژی کارلسروهه (کیت)، و الگوریتم RemoTeC نیز در مقالات (Butz et al., 2009-2010)، تشریح شده است. تفاوت الگوریتم‌های موجود در بازیابی گازهای مورد نظر، با استفاده از داده‌های ماهواره گوست، در استفاده از روش‌های پایه‌ای متفاوت، مدل‌های آیروسل و ابر و پیش‌فرض‌های اولیه برای کاهش آثار پراکندگی و تولید محصولات با خطای کمتر است.

امروزه پرداختن به میزان افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای از سوی مجامع بین‌المللی، به علت نقش کلیدی این گازها در تغییر اقلیم، به خصوص فرایند گرمایش جهانی، بسیار مهم تلقی می‌شود و تعیین منابع گسیل و جذب این گازها و تعیین روند تغییرات گذشته، حال و آینده آنها اهمیت فراوانی دارد.

برای این منظور، به اندازه‌گیری‌های توزیع جهانی از غلظت دی‌اکسید کربن و متان جوئی، با دقت و صحت بالا، نیاز است. معمولاً دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) با استفاده از نمونه‌گیری‌های به دست آمده از شبکه‌های سطحی و یا کشتی‌ها، هواپیماها و بالن‌ها سنجیده می‌شود.

اندازه‌گیری و به دست آوردن توزیع جهانی منابع گسیل کربن، به دلیل تعداد اندک ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی گازهای گلخانه‌ای و توزیع پراکنده آنها در سطح کره زمین، مشکل است. مشکل دیگر دستیابی مؤثر به توزیع جهانی دی‌اکسید کربن و متان با تفکیک فضایی و زمانی بالاست که از دیرباز وجود داشته است.

در این زمینه، توجه بیشتری به کاربرد مشاهدات سنجش از دور در تخمین جریان‌های  $CO_2$  و  $CH_4$  اختصاص یافته است. به ویژه، افزایش قدرت تفکیک فضایی و دقت اندازه‌گیری ابزارهای ماهواره‌ای سنجش از دور را به ابزار عملی برای نظارت بر انتشار  $CO_2$  و  $CH_4$  در مقیاس‌های منطقه‌ای تبدیل می‌کند؛ بنابراین، درک ما از فرایندهای پویایی که سبب افزایش غلظت این دو گاز در جو زمین می‌شود افزایش می‌یابد. در حال حاضر، ماهواره گوست (GOSAT)<sup>۱</sup> تنها ماهواره‌ای است که هم‌زمان گازهای گلخانه‌ای متان و دی‌اکسید کربن را اندازه می‌گیرد و دقت اندازه‌گیری آن کمتر از یک درصد است (Yoshida et al., 2011). با راه‌اندازی ماهواره پایش گازهای گلخانه‌ای گوست که از

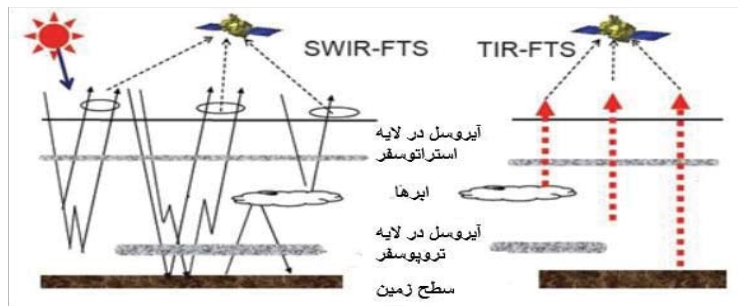
1. Greenhouse Gases Observing Satellite
2. National Institute for Environmental Studies
3. Atmospheric CO2 Observations from Space
4. Remote sensing of greenhouse gases for carbon cycle modeling by the Netherlands Institute for Space Research the Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

## ۲- داده‌ها

### ۲-۱- ماهواره گوست

ماهواره مشاهداتی گازهای گلخانه‌ای گوست (ایبوکی)<sup>۳</sup> را آژانس فضایی ژاپن در بیست‌وسوم ژانویه ۲۰۰۹ راه‌اندازی کرد (Kuze et al., 2009) و نخستین ماهواره در جهان است که غلظت CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> را از فضای اتمسفر می‌سنجد. این ماهواره، هر سه روز یکبار، اندازه‌گیری کل ستون CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> را، در محدوده طول موج SWIR، با پوشش جهانی فراهم می‌کند. پروژه گوست حاصل تلاش مشترک وزارت محیط‌زیست (MOE)<sup>۴</sup> و مؤسسه ملی مطالعات زیست‌محیطی و آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA)<sup>۵</sup> محسوب می‌شود. این ماهواره به دو دستگاه مجهز است: ۱- سنسور حرارتی و فرسرخ برای مشاهدات کربن که مجهز به طیف‌سنج فوریه (TANSO-FTS)<sup>۶</sup> است و ۲- سیستم تصویربرداری ابر و آبروسل (TANSO-CAI)<sup>۷</sup> (شکل ۱).

یکی از مهم‌ترین راه‌های اعتبارسنجی در بازیابی محصولات ماهواره گوست استفاده از اندازه‌گیری‌های اسپکترومتر تبدیل فوریه با وضوح بالا (FTS)<sup>۱</sup> شبکه مشاهداتی کل ستون کربن (TCCON)<sup>۲</sup> است (Washenfelter et al., 2006; Wunch et al., 2010). مطالعات متعددی در زمینه مقایسه محصولات الگوریتم‌های متفاوت، برای بازیابی گازهای آلاینده از مشاهدات ماهواره گوست، انجام شده است (Butz et al., 2010; Parker et al., 2011; Cogan et al., 2012; Oshchepkov et al., 2012). طی مقایسه‌های آماری در دوره‌های متفاوت زمانی، بیشتر مطالعات نتایج دلگرم‌کننده‌ای مبنی بر سازگاری بالای مشاهدات ماهواره گوست با مقادیر TCCON نشان داده‌اند. در این مقاله، تحلیلی مقایسه‌ای بین سه الگوریتم RemoTeC و ACOS، NIES براساس مشاهدات ماهواره گوست، با استفاده از پارامترهای آماری طی یک دوره زمانی شصت‌ماهه (۲۰۱۵-۲۰۱۱) در هشت ایستگاه اندازه‌گیری شبکه سطحی (TCCON)، صورت می‌گیرد.



شکل ۱. انتقال‌های تابشی SWIR-TIR در جو زمین

منبع: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/gosat>

1. Ground-based high-resolution Fourier transform spectrometer
2. Total Carbon Column Observing Network
3. IBUKI
4. Ministry of Environment
5. Japan Aerospace exploration Agency
6. Thermal and Near. infrared Sensor for carbon Observations Fourier Transform Spectrometer
7. Thermal and Near. infrared Sensor for carbon Observations Cloud and Aerosol Imager

## ۲-۳-۲- حوزه محاسباتی و داده‌های مورد استفاده

## ۲-۳-۱- داده‌های ایستگاه‌های زمینی

در این مطالعه، برای بررسی کیفیت عملکرد الگوریتم‌های موجود در منطقه، از داده‌های سه الگوریتم NIES، ACOS و RemoTeC<sup>۲</sup> استفاده شده که از مشاهدات ماهواره گوست طی دوره زمانی شصت‌ماهه‌ای (۲۰۱۵-۲۰۱۱)، در هشت ایستگاه اندازه‌گیری شبکه سطحی TCCON، به دست آمده است. ایستگاه‌های زمینی مورد نظر بین عرض‌های جغرافیایی ۰ و ۷۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۷۰ و ۱۲۰ درجه، به ترتیب، شرقی و غربی در نظر گرفته شده است (شکل ۲). فهرست سایت‌های منتخب مورد استفاده در منطقه در جدول ۱ آمده است. ایستگاه‌ها شامل ایستگاه گارمیش و کارلسروهه (آلمان)، ایزانیا (اسپانیا)، اورلئان (فرانسه)، پارک فالز و لامونت (آمریکا)، تسوکوبا و سگا (ژاپن) می‌شوند.

## ۲-۳-۲- داده‌های حاصل از ماهواره گوست

در این مطالعه، برای اعتبارسنجی محصول داده‌های الگوریتم بازیابی گوناگون (SWIR L2)، در برابر مقادیر مشاهدات زمینی TCCON-XCO<sub>2</sub>، از محصولات بازیابی NIES-XCO<sub>2</sub>، نسخه V02.72 استفاده شده و مجموعه این داده‌ها، از داده‌های دریافت شده با سنسور TANSO-FTS، منتشر شده است. مجموعه داده‌های الگوریتم SRFP با توجه به داده‌های ستونی، فیزیک کامل CO<sub>2</sub> فراهم شده که از طریق نسخه V8.3.2 الگوریتم (RemoTeC) CO<sub>2</sub>\_GOS\_SRFP، محصول انستیتوی تحقیقات فضایی هلند (SRON) و مؤسسه فناوری کارلسروهه (KIT)، تهیه شده است.

ابزار TANSO-FTS شامل چهار نوار طیفی با رزولوشن طیفی بالا (۰.۲ بر سانتی‌متر) است که سه نوار طیفی آن در محدوده SWIR، در طول موج‌های حدود ۰.۷۶، ۱.۶ و ۲.۰ میکرومتر، عمل می‌کند و حساسیت آنها به جذب نزدیک سطح است. نوار چهارم حرارتی فروسرخ بین ۵.۵ و ۱۴.۳ میلی‌متر است که در برابر ناحیه تروپوسفریک حساس است.

استراتژی اندازه‌گیری TANSO-FTS براساس مشخص کردن منابع گسیل در مقیاس قاره‌ای بهینه‌سازی شده است. این اندازه‌گیری‌ها، در اصل، شامل پنج نقطه عمود بر مسیر حرکت می‌شود که با فاصله حدود یکصد کیلومتر از هم قرار دارند و با قطر ۱۰.۵ کیلومتر و مدت زمان چهار ثانیه از هم قرار گرفته‌اند (Parker et al., 2011).

## ۲-۲- شبکه مشاهداتی کل ستون کربن (TCCON)

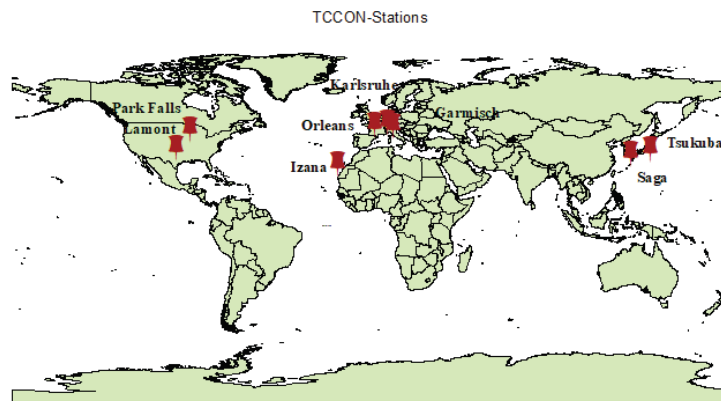
TCCON شبکه‌ای جهانی از طیف‌سنجی تبدیل فوریه با وضوح بالای ضبط مستقیم طیف خورشیدی مستقیم در منطقه طیفی نزدیک فروسرخ است (Wunch et al., 2010). عمر این مرکز پایش گازهای گلخانه‌ای بیش از یک دهه است و نخستین ابزار اختصاصی آن، واقع در شهرهای پارک فالز، در ماه مه ۲۰۰۴ نصب شد. ایستگاه‌های این مرکز پایش گازهای گلخانه‌ای تا کنون به ۲۳ سایت عملیاتی در دنیا گسترش یافته است (Parker et al., 2011). اهداف کلی آن شامل بهبود درک چرخه کربن و اعتبارسنجی بازیابی ماهواره‌ها با ارائه مشاهدات دقیق از مقادیر XCO<sub>2</sub> و XCH<sub>4</sub> برای تعدادی از نقاط است. میزان فقدان اطمینان در مورد مقادیر XCO<sub>2</sub> و XCH<sub>4</sub> حاصل از TCCON، در مقایسه با بسیاری از پروفایل‌های هواپیمایی گوناگون، طی بیست اندازه‌گیری، به اندازه ۰.۸ ppm و ۴ ppb است (Wunch et al., 2010).

1. Park falls, WI, USA  
2. SRFP (the proxy and full-physics ... SRON/KIT's RemoTec algorithm)

جدول ۱. سایت‌های منتخب TCCON

نام سایت (Site Name)	مکان سایت (Site Location)	مختصات جغرافیایی (Lon, Lat, Alt-km)	تاریخ شروع ثبت داده (Start Date)
کارلسروهه (Karlsruhe)	آلمان	49.1°N, 8.44°E 0.11	۲۰۱۰/۰۴/۱۹
گارمیش (Garmisch)	آلمان	47.97°N, 2.11°E 0.13	۲۰۰۷/۰۷/۰۶
ایزانا (Izana)	اسپانیا	47.48°N, 11.06°E 0.75	۲۰۰۷/۰۵/۱۸
اورلن (Orleans)	فرانسه	45.94°N, 90.27°W 0.45	۲۰۰۹/۰۸/۲۹
لامونت (Lamont)	آمریکا	36.6°N, 97.49°W 0.32	۲۰۰۸/۰۷/۰۶
پارفالز (Park Falls)	آمریکا	36.05°N, 140.12°E 0.03	۲۰۰۴/۰۵/۲۶
تسوکوبا (Tsukuba)	ژاپن	33.24°N, 130.29°E 0.01	۲۰۰۱/۰۸/۰۴
سگا (Saga)	ژاپن	28.3°N, 16.48°W 2.37	۲۰۱۱/۰۷/۲۸

منبع: (Wunch et al,2010-a, GGG2014)



شکل ۲. ایستگاه‌های منتخب شبکه مشاهداتی کل ستون کربن (TCCON)

(شکل ۳). بازه زمانی مورد مطالعه سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ است. در این مطالعه، برای بیان قابلیت‌های گوناگون هریک از الگوریتم‌ها در برآورد غلظت گاز دی‌اکسید کربن، از شاخص‌های آماری اریبی (Bias)، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE)<sup>۱</sup>، خطای مطلق (MAE)<sup>۲</sup>، انحراف معیار (SD)<sup>۳</sup> و ضریب همبستگی پی‌یرسون (CR)<sup>۴</sup> استفاده شده است (معادلات ۱ تا ۵).

1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Error
3. Standard Deviation
4. Pearson's correlation coefficient

برای گردآوری مجموعه داده‌های SWIR L2 نیز، از مجموعه داده‌های ACOS، از نسخه ACOS GOSAT-FTS TANSO سطح ۲ (V3.7) استفاده شده است.

### ۳- روش کار

در این مرحله، کیفیت عملکرد الگوریتم‌های NIES، ACOS و SRFP طی تولید داده‌های سطح ۲ ماهواره گوست، در بازیابی XCO<sub>2</sub> از مشاهدات این ماهواره، در مقابل اندازه‌گیری‌های شبکه سطحی TCCON ایستگاه‌های ذکرشده در جدول ۱ بررسی می‌شود

$$\text{Bias} = (XCO2_{\text{satellite}} - XCO2_{\text{TCCON}}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (XCO2_{(\text{satellite})i} - XCO2_{(\text{TCCON})i})^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |XCO2_{(\text{satellite})i} - XCO2_{(\text{TCCON})i}| \quad \text{رابطه (۳)}$$

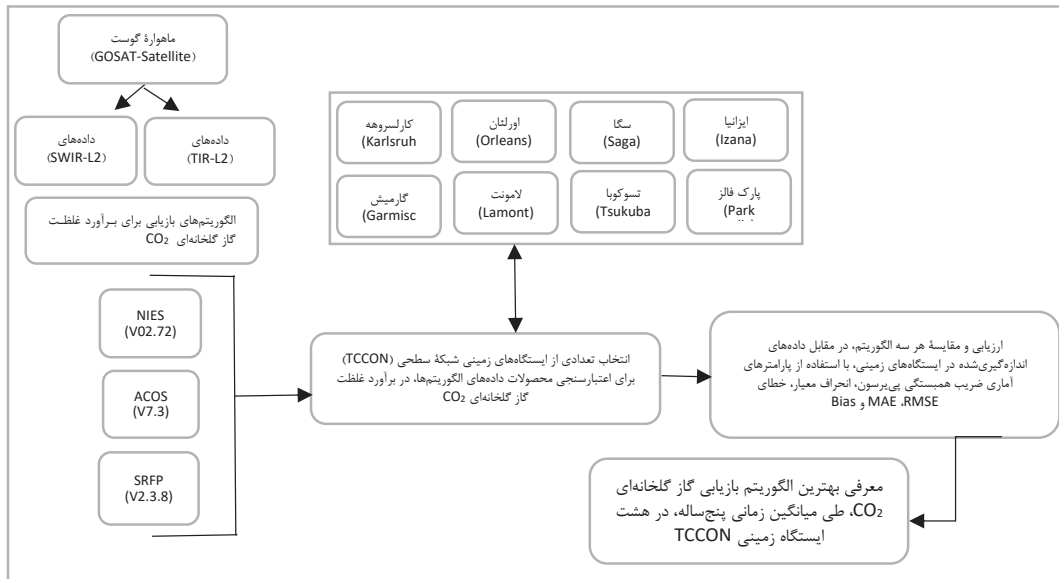
$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (XCO2_{(\text{satellite})i} - \bar{XCO2}_{(\text{satellite})})^2}{N}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$R_{\text{satellite, TCCON}} = \frac{\sum_{i=1}^n (XCO2_{(\text{satellite})i} - \bar{XCO2}_{(\text{satellite})})(XCO2_{(\text{TCCON})i} - \bar{XCO2}_{(\text{TCCON})})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (XCO2_{(\text{satellite})i} - \bar{XCO2}_{(\text{satellite})})^2 \sum_{i=1}^n (XCO2_{(\text{TCCON})i} - \bar{XCO2}_{(\text{TCCON})})^2}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

تغییرات عملکرد هریک، به منظور اصلاح آن، استفاده کرد. بررسی آماری انجام شده با نمودار تیلور در شکل ۴ ارائه شده است. در ترسیم نمودار تیلور سه الگوریتم، هریک از رنگ‌ها نشان‌دهنده یکی از الگوریتم‌های بازیابی است (الگوریتم NIES به رنگ قرمز، الگوریتم ACOS به رنگ آبی و الگوریتم SRFP به رنگ سبز) و شماره‌ها به سال داده‌های بازیابی شده اشاره دارند. با توجه به رنگ‌ها و شماره‌ها، می‌توان مقایسه‌ای کلی از رفتار هر الگوریتم داشت. در این نمودار، میزان ضریب همبستگی با قوس روی محور راست و میزان انحراف معیار هر الگوریتم به نسبت مقادیر مشاهداتی روی محور چپ نمودار نشان داده شده است. در دیاگرام شکل ۳، خلاصه مراحل روش کار آمده است.

در این معادلات، پارامتر N نشان‌دهنده تعداد مشاهدات اندازه‌گیری،  $XCO_2$  نشان‌دهنده مقدار غلظت دی‌اکسید کربن بازیابی شده با استفاده از الگوریتم مورد نظر از سنجنده گوست و پایگاه داده زمینی TCCON است.

در ادامه، از نمودار تیلور نیز برای مقایسه بهتر نتایج استفاده می‌کنیم. با استفاده از نمودار تیلور، می‌توان میزان تطابق محصولات تولیدشده با هر الگوریتم را، با مقادیر مشاهدات متناظر با آن، ارائه کرد. ترسیم نمودار تیلور به کمک پارامترهای آماری ضریب همبستگی و نسبت انحراف معیارها صورت می‌گیرد (Taylor, 2001). از این نمودار، می‌توان برای بررسی مهارت نسبی گروهی از الگوریتم‌های متفاوت در برابر یکدیگر و یا ردیابی



شکل ۳. دیاگرام روش کار

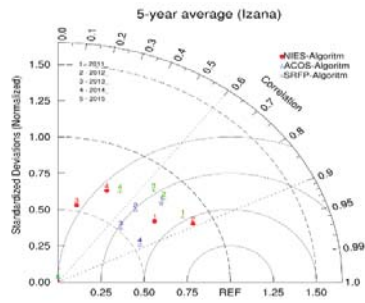
#### ۴- نتایج

۴-۱- ارزیابی آماری الگوریتم‌های بازبایی دی‌اکسید کربن، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی TCCON با توجه به نمودار به‌هنجارشده تیلور در شکل ۴، که می‌تواند به‌خوبی مهارت‌های بازبایی هر الگوریتم را مشخص نماید، مشاهده می‌شود که کمترین مقادیر همبستگی مربوط به الگوریتم SRFP و بیشترین مقادیر همبستگی برای تمامی ایستگاه‌ها مربوط به الگوریتم NIES، در میانگینی پنج‌ساله (۲۰۱۵-۲۰۱۱)، است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، هر دو الگوریتم NIES و ACOS، با اختلاف بسیار کمی، رفتارهای مشابهی در مقادیر ضریب همبستگی و مقادیر انحراف معیار دارند. مقادیر برآوردشده در میزان تغییرات ضریب همبستگی پی‌یرسون، در الگوریتم NIES، به‌طور متوسط و طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵، بین مقادیر ۰.۶۰-۰.۹۲ متغیر است. همچنین، تغییرات مقادیر محاسبه‌شده در پارامتر آماری انحراف استاندارد، به‌طور

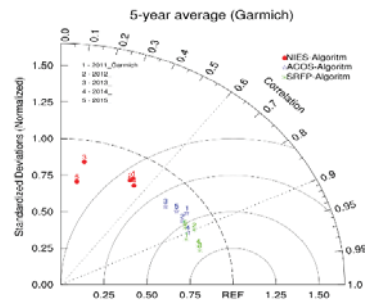
متوسط، در تمامی ایستگاه‌ها ۰.۸۵-۰.۶۵ است. طبق محاسبه مقادیر ذکرشده برای الگوریتم ACOS، تغییرات ضریب همبستگی و انحراف معیار، به‌ترتیب، ۰.۵۳-۰.۸۷ و ۰.۸۷-۰.۳۵ است. کمترین مقادیر ضریب همبستگی به‌دست‌آمده در مورد الگوریتم SRFP محاسبه شده که مقادیر آن، بین ۰.۷۰-۰.۱۵، متغیر است. دامنه تغییرپذیری مقادیر انحراف معیار برای این الگوریتم نیز ۰.۸۰-۰.۵۰ است. به‌طور کلی، با مقایسه الگوریتم‌ها می‌توان بیان کرد که الگوریتم NIES، در مقادیر ضریب همبستگی پی‌یرسون، دارای نتایجی بهتر از دو الگوریتم دیگر است؛ به‌گونه‌ای که بیشترین مقادیر همبستگی متعلق به الگوریتم NIES است (البته به‌جز در ایستگاه‌های تسوکوبا و ایرانیا، که می‌توان از مقدار اختلاف آن با الگوریتم‌های دیگر چشم‌پوشی کرد). کمترین مقادیر ضریب همبستگی در همه ایستگاه‌ها، به‌جز ایستگاه تسوکوبا، به الگوریتم SRFP تعلق دارد.



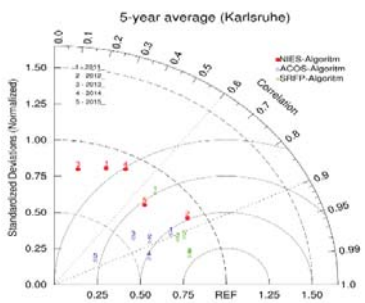
سمیرا کرباسی و همکاران



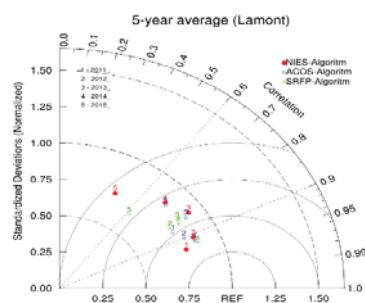
(ب)



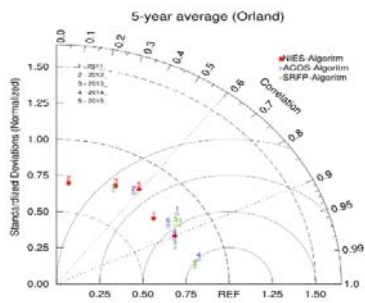
(الف)



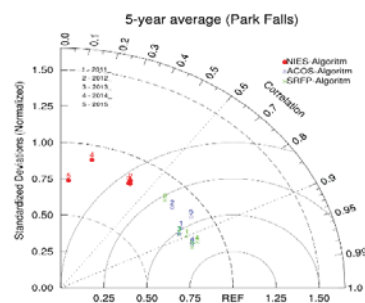
(د)



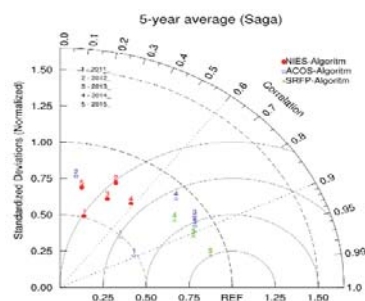
(ج)



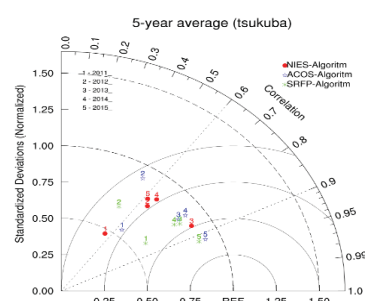
(و)



(ه)



(ح)

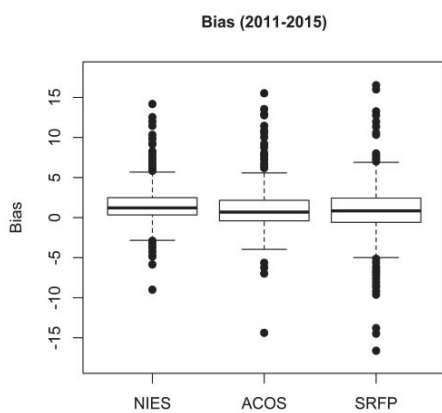


(ز)

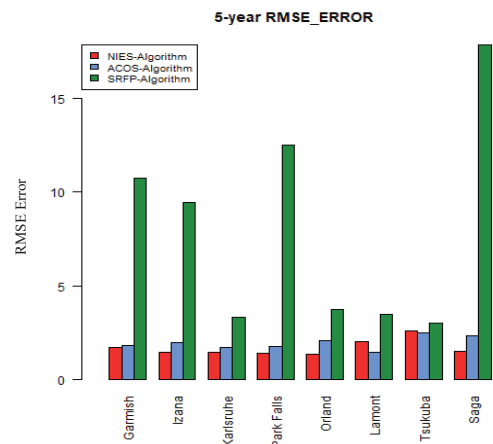
شکل ۴. نمودارهای به‌هنجارشده تیلور برای ارزیابی برآورد غلظت گاز دی‌اکسید کربن در ایستگاه‌های زمینی گارمیش (الف)، ایزانا (ب)، لامونت (ج)، کارلسروهه (د)، پارک فالز (و)، اورلئان (ه)، تسوکوبا (ز) و سگا (ح)

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کمترین میزان خطای RMSE و MAE محاسبه شده برای NIES طبق مقایسه با مقدار معادل زمینی آن، به ترتیب، در ایستگاه‌های اورلنن و کارلسروهه با مقادیر ۱.۳۵ ppm و ۰.۹۰ ppm به دست آمده و بیشترین مقدار خطای RMSE و MAE، برای این الگوریتم در ایستگاه تسوکوبا، به ترتیب، ۲.۶۰ ppm و ۲.۱۷ ppm حاصل شده است.

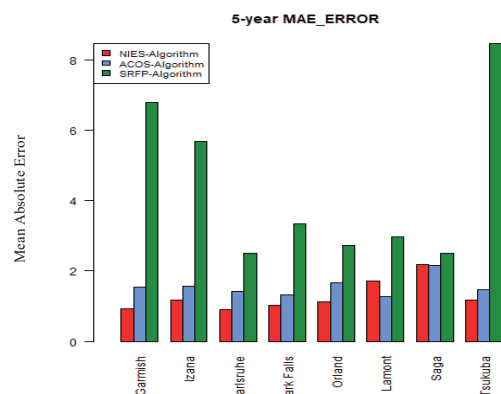
۲-۴- مقایسه الگوریتم‌ها در میانگین پنج‌ساله، با استفاده از پارامترهای MAE، Bias، RMSE برای تشخیص هر چه بیشتر سطح قابلیت و شیوه عملکرد هر الگوریتم در هر ایستگاه، مقادیر خطاهای MAE، RMSE و اریبی به صورت میانگین پنج‌ساله در همه ایستگاه‌ها محاسبه شده است (شکل ۵). نتایج مقایسه مقادیر خطای RMSE و MAE در هر ایستگاه، به صورت جداگانه، نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر خطاها طی میانگینی شصت‌ماهه به الگوریتم SRFP و کمترین مقدار خطا به الگوریتم NIES بازمی‌گردد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵. مقادیر میانگین پنج‌ساله خطاهای RMSE (الف)، Bias (ب) و MAE (ج) در هر الگوریتم، برای برآورد غلظت گاز دی‌اکسید کربن، در مقابل مقادیر ایستگاه‌های زمینی

02.XX، ACOS B2.9 و RemoTeC معرفی کرده‌ایم. این الگوریتم‌ها برای پردازش طیف تابش گوشت در یک دوره زمانی پنج‌ساله (۲۰۱۵-۲۰۱۱) به کار رفتند. برای ارزیابی هر الگوریتم در پردازش و تولید داده‌های  $XCO_2$  طبق مشاهدات گوشت، بر روی ایستگاه‌های TCCON متمرکز شده‌ایم که، در آن، اندازه‌گیری‌های سنجش از راه دور مبتنی بر زمین با استفاده از طیف‌سنج‌های تبدیل فوریه انجام می‌شود و مرجعی مورد اعتماد برای مقادیر کسر مولی هوای خشک متوسط ستون دی‌اکسید کربن اتمی فراهم می‌کند. محصولات داده  $XCO_2$  از هر الگوریتم، در برابر اندازه‌گیری‌های TCCON با توجه به جذر میانگین مربع خطاها، خطای مطلق، انحراف معیار، ضریب همبستگی پی‌یرسون و میزان مقادیر اریبی، از نظر آماری و ایستگاه‌به‌ایستگاه، و نیز از لحاظ تعداد مشاهدات تصادفی، مقایسه شدند. برای هر الگوریتم در این مقایسه، اسکن‌های میانگین داده‌های ماهیانه در مدت پنج سال (شصت ماه)، در ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی شبکه سطحی TCCON (گرمیش، ایزانیا، کارلسروهه، پارک فالز، اورلن، لامونت، تسوکوبا و سگا) در نیمکره شمالی، فراهم شده است. در مجموع، با استفاده از ارزیابی کلی الگوریتم‌های بازیابی موجود و طبق مجموعه داده‌های ماهواره گوشت، در مقابل داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی در دوره زمانی پنج‌ساله، می‌توان دریافت که برون‌داد هر الگوریتم، در بازیابی گاز دی‌اکسید کربن، نتایج قابل قبولی دارد. با مقایسه بین الگوریتم‌ها نیز، می‌توان نتیجه گرفت که، در بین الگوریتم‌های مذکور، الگوریتم SRFP بیشترین خطا را دارد و به نسبت دو الگوریتم دیگر، نتایج متفاوتی ارائه می‌دهد. نتایج خطاهای محاسبه‌شده نشان می‌دهد که، به‌طور میانگین، الگوریتم NIES خطایی کمتر از دو الگوریتم ACOS و SRFP دارد. در بیشتر ایستگاه‌های زمینی مورد نظر، به ترتیب، الگوریتم‌های NIES، ACOS، SRFP دارای بالاترین مقدار ضریب همبستگی پی‌یرسون، کمترین خطای RMSE و MAE، و کمترین خطای اریبی بوده‌اند. به‌منظور معرفی بهترین الگوریتم در

کمترین میزان خطای RMSE و MAE برای الگوریتم ACOS، به ترتیب، در ایستگاه‌های لامونت و پارک فالز با مقادیر ۱.۴۶ ppm و ۱.۲۶ ppm محاسبه شده است. بیشترین میزان خطای RMSE و MAE در الگوریتم ACOS، به ترتیب، در ایستگاه تسوکوبا با مقادیر ۲.۴۶ ppm و ۲.۱۵ ppm مشاهده شده که نتایج آن بسیار شبیه به الگوریتم NIES است. بیشترین میزان خطای RMSE و MAE در الگوریتم SRFP نیز در ایستگاه سگا با مقادیر، به ترتیب، ۱۷.۹ ppm و ۸.۴۷ ppm است و کمترین مقدار خطای RMSE و MAE برای این الگوریتم در ایستگاه تسوکوبا، به ترتیب، ۲.۹۹ ppm و ۲.۵۰ ppm به‌دست آمده است.

برای نمایش معیار تمرکز و پراکندگی مقادیر خطای اریبی هر الگوریتم به صورت هم‌زمان، در مقایسه با مقادیر مشاهدات، از نمودار جعبه‌ای استفاده شده است (شکل ۵-ب). با نگاه کلی به نمودار جعبه‌ای و مقایسه الگوریتم‌ها، می‌توان دریافت که هر سه الگوریتم NIES، ACOS و SRFP در تمامی ایستگاه‌ها تقریباً مشابه یکدیگر رفتار می‌کنند و بدین ترتیب، هر سه دارای مقادیر فرورد و فرابرد (اریبی منفی و مثبت) نزدیک به صفر هستند. مقایسه پراکندگی مقادیر اریبی، در هر الگوریتم، نشان می‌دهد تعداد مقادیر پراکنده در الگوریتم SRFP، به نسبت دو الگوریتم دیگر، بیشتر است. مقادیر میانه اریبی در الگوریتم ACOS، با فاصله بسیار اندکی، از دو الگوریتم NIES و SRFP کوچک‌تر است. ماکزیمم مقدار اریبی (مثبت و منفی) به الگوریتم SRFP متعلق است. دامنه تغییرات ۷۵٪ از مقادیر اریبی محاسبه‌شده در سه الگوریتم NIES، ACOS و SRFP، به ترتیب، برابر با (۹-، ۵+)، (۱۵-، ۵+) و (۱۷-، ۷+) است. ماکزیمم مقادیر اریبی، به ترتیب، به الگوریتم SRFP، ACOS و NIES با مقادیر (۱۷+، ۱۵-)، (۱۱+، ۹-) و (۱۱+، ۹-) متعلق است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیلی مقایسه‌ای برای بازیابی غلظت گاز دی‌اکسید کربن ( $XCO_2$ )، از سه الگوریتم جهانی NIES

Crisp, D., Bosch, H., Brown, L., Castano, R., Christi, M., Connor, B., Frankenberg, C., McDuffie, J., Miller, C., Natraj, V., 2010. **OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis**. Internet: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2\\_L2\\_FP\\_ATBD\\_v1\\_rev4\\_Nov10.Pdf](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2_L2_FP_ATBD_v1_rev4_Nov10.Pdf).

Crisp, D., et al., 2012. **The ACOS XCO<sub>2</sub> Retrieval Algorithm, Part II: Global XCO<sub>2</sub> Data Characterization**, Atmos. Meas. Tech., 5, 1–60, [www.atmosmeas-tech-discuss.net/5/1/2012/](http://www.atmosmeas-tech-discuss.net/5/1/2012/) doi:10.5194/amtd-5-1-2012.

Hase, F., Blumenstock, T., Dohe, S., Groß, J., Kiel, M., 2014. **Karlsruhe010.11 TCCON Data From Karlsruhe, Germany, Release GGG2014R1**. 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.karlsruhe01.R1/1182416

Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., Hamazaki, T., 2009. **Thermal And Near Infrared Sensor For Carbon Observation Fourier-Transform Spectrometer On The Greenhouse Gases Observing Satellite For Greenhouse Gases Monitoring** Appl. Optics, 48, 6716–6733, doi:10.1364/AO.48.006716.

Morino, I., Matsuzaki, T., Shishime, A., 2014. **Tsukuba020.03 TCCON Data From Tsukuba, Ibaraki, Japan, 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

هر هشت ایستگاه، طی میانگین پنج سال، می‌توان بیان کرد که الگوریتم NIES بهترین عملکرد را در ایستگاه‌های کارلسروهه و اورلثان، الگوریتم ACOS بهترین عملکرد را در ایستگاه‌های لامونت و الگوریتم SRFP بهترین عملکرد را در ایستگاه تسوکوبا داشته‌اند.

#### ۶- سپاسگزاری

این تحقیق، با حمایت مالی بنیاد ملی علوم ایران (INSF)، تهران، ایران (شماره کمک هزینه: ۹۸۰۱۲۷۵۲) انجام شده است

#### ۷- منابع

Butz, A., Hasekamp, O.P., Frankenberg, C., Aben, I., 2009. **Retrievals Of Atmospheric CO<sub>2</sub> From Simulated Space-Borne Measurements Of Backscattered Near-Infrared Sunlight: Accounting For Aerosol Effects**, Appl. Optics, 48: 3322–3336, doi:10.1364/AO.48.003322.

Butz, A., Hasekamp, O., Frankenberg, C., Vidot, J., Aben, I., 2010. **CH<sub>4</sub> Retrievals From Space Based Solar Backscatter Measurements: Performance Evaluation Against Simulated Aerosol And Cirrus Loaded Scenes**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 115.

Cogan, A. J., Boesch, H., Parker, R. J., Feng, L., Palmer, P. I., Blavier, J.-F. L., Deutscher, N. M., Macatangay, R., Notholt, J., Roehl, C., Warneke, T. and Wunch, D., 2012. **Atmospheric Carbon Dioxide Retrieved From The Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison With Ground-Based TCCON Observations And GEOS-Chem Model Calculations**, journal of geophysical research 117: D21301.

- O'Dell, C., Connor, B., Bösch, H., Frankenberg, C., Castano, R., Christi, M., Eldering, D., Fisher, B. and Gunson, M., 2012 **The ACOS CO<sub>2</sub> Retrieval Algorithm–Part 1: Description And Validation Against Synthetic Observations**, Atmospheric Measurement Techniques, 5: 99-121.
- Oshchepkov, S., et al. 2012, **Effects Of Atmospheric Light Scattering On Spectroscopic Observations Of Greenhouse Gases From Space. Part 1: Validation Of PPDF-Based CO<sub>2</sub> Retrievals From GOSAT**, J. Geophys. Res. 117: D12305.
- Parker, R., et al. 2011, **Methane Observations From The Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison To Ground-Based TCCON Data And Model Calculations**, Geophys. Res. Lett. 38: L15807. doi:10.1029/2011GL047871.
- Shiomi, K., Kawakami, S., Ohyama, H., Arai, K., Okumura, H., Taura, C., **saga010.01 T. Fukamachi, M. Sakashita. 2014. TCCON data From Saga, Japan, 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. saga01. R0/1149283**
- Sussmann, R., Rettinger, M., 2014. **garmisch01 0.75 TCCON Data from Garmisch, Germany, 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.garmisch01. R0/ 1149299**
- Taylor, K.E, 2001, **Summarizing Multiple Aspects Of Model Performance In A Single Diagram**. J. Geophys. Res.,106: 7183-7192, (also see PCMDI Report 55, [http://wwwpcmdi.llnl.gov/publications/a\\_b55.html](http://wwwpcmdi.llnl.gov/publications/a_b55.html))
- Washenfelter, R. A., Toon, G. C., Blavier, J. F. L., Yang, Z., Allen, N. T., Wennberg, P. O., Vay, S. A., Matross, D. M. and Daube, B. C, 2006. **Carbon Dioxide Column Abundances At The Wisconsin Tall Tower Site**, J. Geophys. Res. 111(D22): 1–11.
- Wunch, D., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Stephens, B. B., Fischer, M. L., Uchino, O. and et al, 2010a, **Calibration of the Total Carbon Column Observing Network Using Aircraft Profile Data**, Atmos. Meas. Tech 3: 1351–1362.
- Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., Morino, I. and Yokota, T., 2011, **Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Column Abundances From Short-Wavelength**, Atmos. Meas. Tech., 4 : 717–734.
- Wennberg, P. O., Wunch, D., Roehl, C., Blavier, J.F., Toon, G.C., Allen, N, **lamont010.32 P. Dowell, K. Teske, C. Martin, J. Martin. 2014. TCCON Data From Lamont, Oklahoma, USA, 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.lamont01. R0/1149159**
- Wennberg, P.O., Roehl, C., Wunch, D., Toon, G. C., Blavier, J.F, **parkfalls010.44 R. Washenfelter, G. Keppel-Aleks, N. Allen, J. Ayers. 2014. TCCON Data From Park Falls, Wisconsin, USA, 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/tccon.ggg2014.parkfalls01.R0/1149161**
- Blumenstock, T., Hase, F., Schneider, M., García, O.E., Sepúlveda, E, 2014. **izana01 2.37 TCCON Data From Izana, Tenerife, Spain, 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/tccon.ggg2014.izana01.R0/1149295**
- Warneke, T., Messerschmidt, J. , Notholt, J., Weinzierl, C., Deutscher, N., Petri, C., **Orleans010.13 P. Grupe, C. Vuillemin, F. Truong, M. Schmidt, M. Ramonet, E. Parmentier. 2014. TCCON Data From Orleans, France, 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/tccon.ggg2014.orleans01.R0/1149276**