



The Effects of Increasing Carbon Dioxide Concentration on Iran's Total Water Storage Using Remote Sensing

Samaneh Safaeian.¹, Samereh Falahatkar.*¹, Mohammad Javad Tourian²

1. Dep. of Environmental Science, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modarres University, Noor, Mazandaran, Iran

2. University of Stuttgart, Germany

Abstract

In recent years, the phenomenon of climate change and drought has become a global problem in the arid and semi-arid regions of the world. Climate change as a problem in the annual bio-farming cycle causes extinction of plant and animal species, reduced vegetation richness, impaired and reduced fertility severity in animals, changes in the pattern of migration of birds and animals (due to new habitats or food sources New) and changes in the spawning pattern of fish. Droughts and floods are one of the most severe climatic events that are likely to change faster than the average climate of any region. Today, access to freshwater resources is a very important issue in most countries, including the Middle East and Iran, according to FAO statistics, while the Middle East accounts for 14 percent of the Earth's surface, accounting for only 2 percent of water resources. The drying up of internationally valuable lakes and wetlands, the lowering of rivers to crisis levels, and the exposure of people in 12 provinces to drinking water shortages are among the consequences of a nationwide drought. Droughts have been particularly prevalent in the tropical and subtropical regions since the 1970s. Reduced ground precipitation and increased temperatures, which increase evaporation and decrease soil moisture, are important factors that have led to more drought zones. Recent droughts have emphasized the need for more research into the causes and effects of droughts and the need for additional planning to help reduce the potential consequences of future droughts. On the other hand, some studies consider the increase in greenhouse gases and disruption of sunlight transfer to and from the earth to the atmosphere as a reason for the recent drought. In the present study, monthly changes of atmospheric carbon dioxide and monthly changes of total water storage in the period 2003-2015 in Iran were investigated. Combined data with the Obsm4MIPs algorithm of GOSAT satellite and SCIAMACHY sensor were used to obtain the trend of changes in carbon dioxide concentration and GRACE satellite data for changes in total water storage from 2003 to 2015. The results of the canonical correlation show a strong relationship between carbon dioxide concentration and changes in total water storage. Stepwise regression model was used to model the relationship between changes in total water storage with CO₂, discharge rate and groundwater consumption. The results of regression model showed that carbon dioxide with R² = 0.91 had the highest relationship with total water reservoir changes in the model. It is noteworthy that the identification of these relationships on a large scale is tangible and at the local scale management practices are more influential in changing water resources, especially groundwater.

Keywords: Climate change, Canonical correlation, Stepwise regression.

* Correspondence Address: Department of Environmental Sciences, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modarres University, Noor, Mazandaran.

Email: samereh.falahatkar@modares.ac.ir

https://doi.org/10.52547/gisj.12.1.101



سجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۱۱۲-۱۰۱



تأثیر افزایش غلظت گاز دی‌اکسید کربن بر ذخیره کل آب ایران با استفاده از سنجش از دور

سمانه صفائیان^۱، سامره فلاحتکار^{۱*}، محمدجواد طوریان^۲

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران

۲. مدرس دانشگاه اشتوتگارت، آلمان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

چکیده

در سال‌های اخیر، پدیده تغییر اقلیم و خشکسالی به معضلی جهانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تبدیل شده است. در تحقیق حاضر، تغییرات ماهیانه دی‌اکسید کربن جو و ذخیره کل آب، در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۳ در ایران، بررسی شده است. از داده‌های ترکیب‌شده با الگوریتم Obsm4MIPs ماهواره GOSAT و سنجنده SCIAMACHY، برای به‌دست‌آوردن روند تغییرات غلظت گاز دی‌اکسید کربن، و داده‌های ماهواره GRACE، برای تغییرات ذخیره کل آب در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵، استفاده شده است. نتایج همبستگی کانونی رابطه‌ای قدرتمند را، بین غلظت دی‌اکسید کربن با تغییرات ذخیره کل آب، نشان می‌دهد. به‌منظور مدل‌سازی رابطه بین تغییرات ذخیره کل آب با دی‌اکسید کربن، میزان تخلیه و مصرف آب‌های زیرزمینی از مدل رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون بین تغییرات اشاره‌شده نشان‌دهنده این است که دی‌اکسید کربن، با $R^2=0/91$ ، بیشترین رابطه را با تغییرات ذخیره کل آب در مدل دارد. شایان ذکر است که شناسایی این روابط، در مقیاس کلان، ملموس است و در مقیاس محلی شیوه‌های مدیریتی در تغییرات منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، تأثیر بیشتری دارد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، همبستگی کانونی، رگرسیون گام‌به‌گام.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران.

۱- مقدمه

مدارهای ژئوپتانسیلی تا درجه و مرتبه ۱۲۰ از ضرایب هارمونیک کروی در مقیاس‌های چندصد کیلومتر، در اختیار قرار می‌دهد. در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی زمینی مانند کندن چاه‌ها، مأموریت ماهواره‌ای GRACE می‌تواند جایگزین بسیار کارآمدی در بررسی میزان تغییرات ذخیره آب‌ها شمرده شود که همواره، در مقیاس بزرگ، کاری دشوار بوده است. اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن جو با استفاده از ماهواره از اقدامات نوآمد و جدید محسوب می‌شود. اولین و دومین مأموریت اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای شامل پروژه GOSAT است، که در ژانویه ۲۰۰۹ پرتاب شد، (Yokota et al., 2009) و نیز پروژه OCO، که پرتاب آن در فوریه ۲۰۰۹ به شکست انجامید. گازهای گلخانه‌ای با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌های دیگری نیز اندازه‌گیری می‌شوند اما این ماهواره‌ها، به صورت تخصصی، به منظور اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای طراحی نشده‌اند. مطالعات متعددی تغییرات ذخیره آب را، با استفاده از مشاهدات ماهواره GRACE، بررسی کرده‌اند: اندرسن^۲ و همکاران (۲۰۰۵)، یه^۳ و همکاران (۲۰۰۶)، سید^۴ و همکاران (۲۰۰۸)، فروتن^۵ و همکاران (۲۰۱۴)، طوریان^۶ و همکاران (۲۰۱۵)، خاکی^۷ و همکاران (۲۰۱۸). با توجه به اینکه داده‌های ماهواره GOSAT از سال ۲۰۰۹ در اختیار کاربران قرار گرفته، مطالعاتی در این زمینه انجام شده که شامل یوکوتا^۸ و همکاران (۲۰۰۹)، گوو^۹ و همکاران (۲۰۱۳)، شیم^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳)، جینگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۴)، سان^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶) و موسوی^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷) است. تا کنون پژوهشی انجام نشده است که هم‌زمان از داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های دی‌اکسید کربن،

مطالعات نشان می‌دهد که میانگین دمای سطح زمین و جو، طی قرن گذشته، افزایش یافته؛ به طوری که دهه ۲۰۰۰ گرم‌ترین دهه کره زمین از سال ۱۸۸۰ تا به حال بوده است (Brewer et al., 2012). دی‌اکسید کربن جو مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای انسانی است که افزایش چشمگیری داشته و غلظت آن، از دوران صنعتی شدن تا سال ۲۰۱۳، از ۲۸۰ ppm به بیش از ۴۰۰ ppm رسیده که نتیجه فعالیت‌های انسانی، از جمله مصرف سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی است (Cogan et al., 2011). گاز دی‌اکسید کربن، خود به تنهایی، مسئول بیش از ۶۴٪ گرمایش ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (WMO, 2015). خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها از وقایع اقلیمی بسیار تأثیرگذار محسوب می‌شوند که، به نسبت میانگین اقلیم هر منطقه، احتمال تغییراتی که ایجاد می‌کنند سریع‌تر است (Trenberth et al., 2003). امروزه دسترسی به منابع آب شیرین از مسائل بسیار مهم در بیشتر کشورها، از جمله منطقه خاورمیانه و ایران، است. براساس آمار فائو، درحالی‌که خاورمیانه ۱۴٪ مساحت کره زمین را به خود اختصاص داده است، فقط ۲٪ از منابع آب را در اختیار دارد. ذخیره آب کل (TWS)^۱ به تمامی صورت‌های آب ذخیره‌شده، در بالا و پایین سطح زمین، اطلاق می‌شود. این میزان بخش اصلی چرخه‌های آب‌شناختی خشکی و جهانی است و با به‌کاربردن کنترل‌های مهم بر آب و انرژی و جریان‌های بیوژئوشیمیایی، نقش مهمی در سیستم اقلیمی زمین بازی می‌کند. پایش پدیده‌ها و اکوسیستم یکی از کاربردهای اصلی تصاویر ماهواره‌ای در سنجش از دور است (صادقی و شاد، ۱۳۹۴). در طول دو دهه گذشته، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به صورت ابزار نظارت سطوح آب داخلی و چرخه آب‌شناختی استفاده شده است (Alsdorf & Lettenmaier, 2003; Calmant & Seyler, 2006; Crétaux & Birkett, 2006; Papa et al., 2006; Papa et al., 2010; Berry et al., 2005). ماهواره‌های GRACE تخمینی از میدان جاذبه زمین را، به صورت منظم و ماهیانه، به شکل

- | | |
|------------------------|-------------|
| 1. Total Water Storage | 2. Andersen |
| 3. Yeh | 4. Syed |
| 5. Forootan | 6. Tourian |
| 7. khaki | 8. Yokota |
| 9. Guo | 10. Shim |
| 11. Jing | 12. Sun |
| 13. Mousavi | |

۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

پروژه تعیین ثقل و آزمایش‌های آب‌وهوایی (GRACE)^۱ پروژه‌های مشترک بین آلمان و امریکا، شامل مرکز فضایی آلمان (DLR)^۲ و سازمان ملی هوانوردی و فضایی (NASA)^۳ است. ماهواره‌های دوقلوی GRACE، در هفدهم مارس ۲۰۰۲، از پایگاه فضایی پلستیک در روسیه به فضا پرتاب شدند. این دو ماهواره، در ارتفاع حدود چهارصد کیلومتری زمین و با فاصله اسمی ۲۲۰ کیلومتر، در حال حرکت‌اند. این فاصله دستخوش تغییر شده است و با تحلیل تغییرات این فاصله، می‌توان به تغییرات ثقل پی برد. داده‌های GRACE به چهار دسته داده‌های سطح ۰، سطح A-1، سطح B-1 و سطح ۲ تقسیم می‌شوند (فتح‌الله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). در این مطالعه، با توجه به هدف تحقیق، از داده‌های سطح ۲ استفاده شد.

ماهواره مشاهده‌کننده گازهای گلخانه‌ای (GOSAT)^۴، در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۹ و در جزیره تانگاشیمای ژاپن، به فضا پرتاب شد (Yokota et al., 2009; Kuze et al., 2009; Parker et al., 2011).

با هدف تحلیل سری زمانی و مکانی تغییرات ذخایر آب و غلظت گاز دی‌اکسید کربن در مقیاس ملی، استفاده کند. بنابراین، در تحقیق حاضر، ارتباط بین تغییرات گاز گلخانه‌ای CO₂ و تغییرات ذخایر آب به صورت یکپارچه بررسی شده است. در ضمن، برای بررسی ارتباط بین این گاز و تغییرات ذخیره کل آب و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، از روش رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری است که در غرب آسیا و مرکز خاورمیانه، بین عرض ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی، واقع شده است (FAO, 2015). میانگین ارتفاعی در ایران بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی آن ۲۳۳.۲ میلی‌متر است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۵). کشور ایران، با وجود قرارگرفتن در کمربند خشک جهانی (UNEP, 1997) و تغییرپذیری شدید اقلیمی، بارشی فقط معادل یک‌سوم میانگین جهانی دارد.



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

1. Gravity Recovery and Climate Experiment
2. Deutschen Zentrum für Luft-und Raumfahrt
3. National Aeronautics and Space Administration
4. Greenhouse Gases Observing Satellite

زیر استخراج می کند (Chang et al., 2013):

$$R = \frac{E[X_c Y_c]}{\sqrt{E[X_c^2]E[Y_c^2]}} = \frac{E[U^T X_c Y_c^T V]}{\sqrt{E[U^T X_c X_c^T U]E[V^T Y_c Y_c^T V]}} = \frac{U^T C_{X_c Y_c} V}{\sqrt{U^T C_{X_c X_c} U V^T C_{Y_c Y_c} V}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$C_{X_c Y_c}$ و $C_{X_c X_c}$ به ترتیب، ماتریس کواریانس X_c و Y_c هستند و هدف، در عملکرد بالا، حداکثر کردن همبستگی (R) است. ضرایب کانونی متفاوت در هر یک از مجموعه‌ها منجر به ضریب همبستگی متفاوتی می‌شود. با وجود این، ترکیبی از متغیرها با اولین ضریب کانونی، برای هر مجموعه، دارای بیشترین همبستگی چندگانه ممکن با متغیرهای موجود در مجموعه دیگر است. در این مطالعه، بین تغییرات سری ذخیره کل آب و غلظت دی‌اکسید کربن، روش همبستگی کانونی انجام شد تا بیشترین همبستگی خطی بین متغیرهای مذکور با تغییرات ذخیره کل آب محاسبه شود.

۲-۴- رگرسیون گام به گام

در این روش، متغیرهای مستقل از مهم‌ترین متغیر تا کم‌اهمیت‌ترین آن‌ها، به صورت مرحله‌ای وارد مدل می‌شوند. معیار میزان اهمیت متغیر در مدل را نیز مقدار سطح معناداری یا آماره F متناظر با آن، که در جدول‌های آزمون معناداری وجود دارند، تعیین می‌کند. در واقع، در این روش، متغیرها به ترتیب وارد معادله می‌شوند ولی، با ورود هر متغیر جدید، کلیه متغیرهای موجود در معادله بررسی می‌شوند. هر یک از آن‌ها که سطح معناداری خود را از دست داده باشد، پیش از ورود متغیر جدید، از معادله خارج می‌شود و در پایان عملیات، هر متغیری که معناداری کمتر از سطح

GOSAT پروژه مشترک آژانس اکتشافات فضایی ژاپن (JAXA) ^۱، وزارت محیط‌زیست (MOE) ^۲ و انجمن ملی مطالعات محیط‌زیست (NIES) ^۳ است (Miao et al., 2013). هدف اولیه پروژه GOSAT تخمین دقیق منابع انتشار و جذب گازهای گلخانه‌ای، در مقیاس زیرقاره‌ای، برای کمک به مدیران محیط‌زیستی در ارزیابی تعادل چرخه کربن اکوسیستم‌های زمینی است (Kuze et al., 2009; Morino et al., 2010). GOSAT اولین ماهواره دنیاست که به منظور اندازه‌گیری‌های غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و متان از باند SWIR ^۴ و با پوشش جهانی هر سه روز یکبار طراحی شده است (Guo et al., 2013). سنجنده SCIAMACHY ^۵ ماهواره ENVISAT ^۶ آژانس فضایی اروپاست که در مارس ۲۰۰۲ به فضا پرتاب و در آوریل ۲۰۱۲ ارتباط آن با مرکز قطع شد. SCIAMACHY خورشیدآهنگ است و زمان اندازه‌گیری آن ۱۰:۰۰ صبح به وقت محلی است. قدرت تفکیک مکانی آن ۳۰×۶۰ کیلومتر است و اندازه‌گیری‌هایش را، در ۳۵ روز، کامل می‌کند (Schneising et al., 2009). در این تحقیق، از داده‌های تلفیقی GOSAT و SCIAMACHY با الگوریتم Obs4MIPs در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ استفاده شد.

۲-۳- همبستگی کانونی

تحلیل همبستگی کانونی (CCA) محاسبات روابط بین جفت سری (مانند یک سری از دمای سطح دریا و یک سری از دمای جو) را محاسبه می‌کند. این دو سری، به طور مشترک، سری مستقل (X) و وابسته (Y) شناخته می‌شوند. در اینجا تحلیل همبستگی کانونی، به علت توانایی آن در ایجاد روابط بین متغیرهای درونی، به جای تحلیل همبستگی ساده انتخاب شده است. CCA ضرایب کانونی U و V را، به طوری که $X_c = X_c T U$ و $Y_c = Y_c T V$ (X_c و Y_c متغیرهای کانونی) و با ضریب همبستگی حداکثر، با استفاده از تابع

1. Japan Aerospace Exploration Agency
2. Ministry of the Environment
3. National Institute for Environmental Studies
4. Short-wavelength infrared
5. Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography
6. Environmental Satellite

بوده و در شرق و جنوب‌شرق و مرکز ایران، بیشتر از سایر مناطق مشاهده شده است. در ارتباط با تغییرات زمانی و مکانی روند گاز دی‌اکسید کربن در ایران، تا کنون مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است اما می‌توان به مطالعه موسوی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد که، با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT، تغییرات غلظت دی‌اکسید کربن از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ را، در سراسر ایران، ارزیابی کردند. نتایج حاصل نشان از افزایش مداوم میانگین غلظت این گاز، از ۳۸۴.۸۹ به ۴۰۰.۳۹، دارد. همچنین، مشاهده شده است که تغییرات دی‌اکسید کربن ارتباط مهمی با ماه دارد؛ بدین صورت که بیشترین غلظت آن در ماه‌های آوریل و مه و کمترین غلظت آن در ماه‌های اوت و سپتامبر بوده است. سیابی (۱۳۹۶)، با توجه به نحوه پراکنش مکانی این گاز در تمامی ماه‌های مورد مطالعه، بیان می‌کند که، به‌طور کلی، غلظت‌های حداکثری این گاز در تمامی مدت زمان مورد بررسی، در بخش‌های شرق و جنوب‌شرق کشور، به‌خصوص دشت لوت و دشت کویر، تمرکز یافته است. پس از این مناطق، بخش‌های جنوبی و جنوب‌غرب دارای غلظت‌های تقریباً زیاد این گاز، در تمامی ماه‌ها، بوده است. سایر بخش‌های ایران، شامل بخش‌های غربی و شمال‌غرب و شمال کشور، در کل این مدت مقادیر کمتری از غلظت گاز یادشده را، در مقایسه با دیگر بخش‌ها، داشته‌اند. موسوی و همکاران (۱۳۹۵)، در ارتباط با پایش توزیع مکانی گاز دی‌اکسید کربن با استفاده از داده‌های GOSAT در ایران، پژوهشی انجام دادند. پس از تهیه نقشه‌های توزیع مکانی، مشاهده کردند که، طی چهار فصل بهار تا زمستان سال ۲۰۱۳، غلظت‌های حداکثری این گاز در بخش‌های شرق و جنوب‌شرق کشور تمرکز یافته و باقی قسمت‌های ایران دارای غلظت‌های کمتری از این نواحی‌اند. آن‌ها دلیل این امر را بالاتر بودن دما و نبود پوشش گیاهی مناسب در بخش‌های شرق و جنوب‌شرق کشور بیان کردند.

تعیین شده داشته باشد در معادله حضور نخواهد یافت (فرج‌زاده، ۱۳۸۶). در تحقیق حاضر، از داده‌های مصرف آب زیرزمینی و تخلیه آب (گردآوری شده از سازمان آب منطقه‌ای) و دی‌اکسید کربن، به‌منزله متغیرهای مستقل، و تغییرات کل ذخایر آب، به‌منزله متغیر مستقل، استفاده شد.

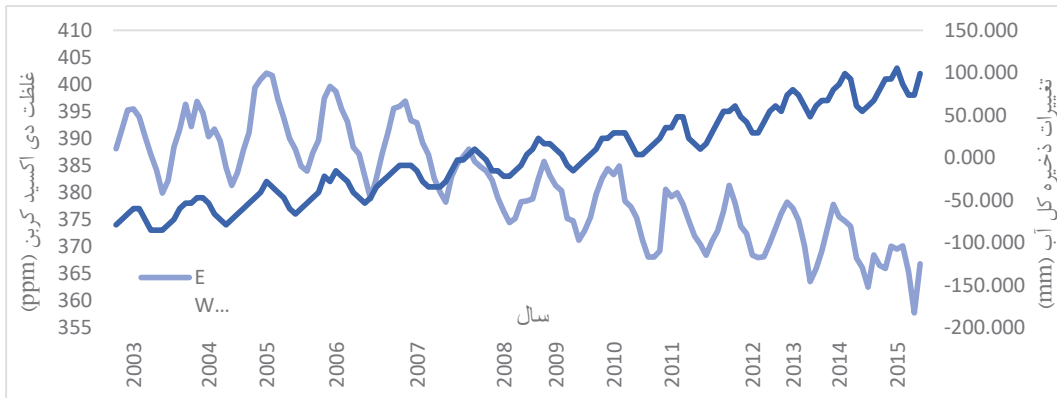
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات زمانی بین تغییرات ذخیره کل آب و غلظت دی‌اکسید کربن

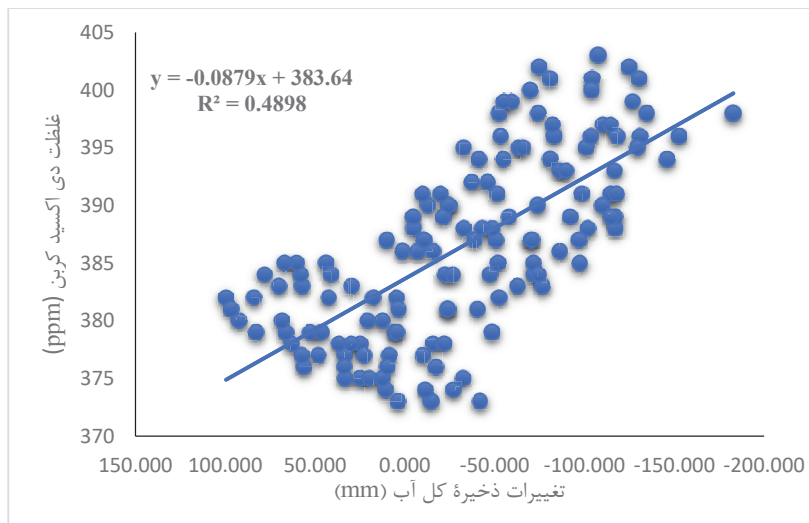
مطابق شکل ۲، در غلظت دی‌اکسید کربن جو طی بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵، روندی افزایشی همراه با نوسانات سینوسی دیده می‌شود. در هر سال، بیشترین غلظت دی‌اکسید کربن در فصل بهار و کمترین غلظت آن در فصل تابستان مشاهده می‌شود. نتایج این بخش با داده‌های نمودار Keeling تطابق دارد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۵). نوسانات سینوسی و کاهشی تغییرات ذخیره کل آب در این بازه زمانی به نمایش گذاشته شده است. بر این اساس، با کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در جو ایران، افزایش تغییرات ذخیره کل آب در مقیاس ملی مشاهده می‌شود. در شکل ۳، رابطه معکوس بین تغییرات ذخیره کل آب و غلظت دی‌اکسید کربن با $R^2=0.48$ نشان داده شده است که، مطابق آن، با کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در جو ایران، تغییرات ذخیره کل آب در مقیاس ملی افزایش می‌یابد. به‌منظور حذف تأثیر فصل در تغییرات داده‌های ماهیانه دی‌اکسید کربن، آنومالی هر داده به‌نسبت میانگین سالیانه محاسبه شد. شکل ۴ همبستگی بین آنومالی داده‌های دی‌اکسید کربن و تغییرات ذخیره کل آب را با $R^2=0.86$ نشان می‌دهد که، به‌علت حذف آنومالی یا ناهنجاری‌های فصلی، به‌میزان بالاتر برآورد شده است.

همان‌گونه که در نتایج نیز بیان شد، روند افزایشی دی‌اکسید کربن در تمامی مناطق ایران مشاهده می‌شود. در شمال کشور، این روند کمتر از سایر مناطق

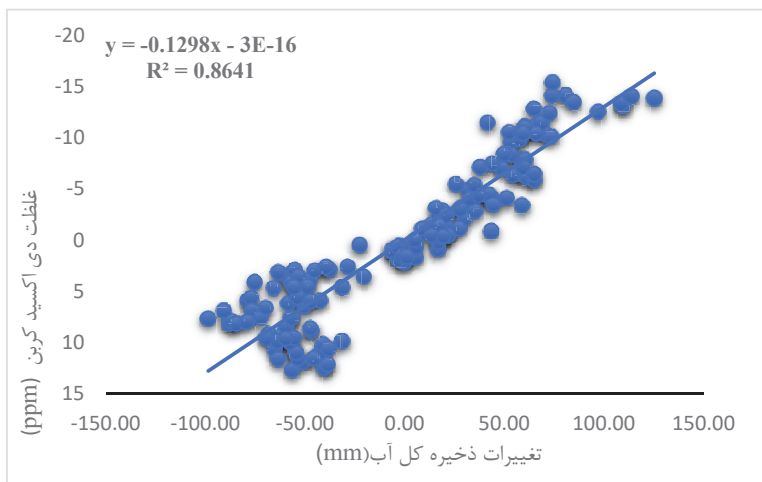
سمانه صفائی و همکاران



شکل ۲. نتایج حاصل از روند تغییرات ذخیره کل آب و غلظت دی اکسید کربن



شکل ۳. نتایج حاصل از همبستگی تغییرات ذخیره کل آب و غلظت دی اکسید کربن



شکل ۴. نتایج حاصل از همبستگی آنومالی غلظت دی اکسید کربن و تغییرات ذخیره کل آب

ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰، سطح آب معادل از مقادیر مثبت به منفی کاهش یافته است. آن‌ها علت این کاهش سطح تغییرات ذخیره کل آب را کاهش نزولات جوی در این دوره و خشکسالی می‌دانند. از آنجا که ۹۰٪ ایران در مناطق خشک یا نیمه‌خشک قرار دارد، بارندگی مستقیم تنها منبع تأمین‌کننده آب شمرده می‌شود. این بدان معناست که فقط ۱۰٪ از کشور بارندگی کافی، برای برآوردن نیازهایش، دریافت می‌کند اما مناطق بسیار خشک به آب‌های زیرزمینی بسیار وابسته‌اند. منابع آب ایران، به‌علت رشد جمعیت و شهرنشینی و عواقب آن، در فشار قرار دارند. تأثیر مستقیم جمعیت (۷۵ میلیون نفر در سال ۲۰۱۰) در منابع آب باعث افزایش نیاز به آب شیرین در مراکز پرجمعیت شده است، درحالی‌که اثر غیرمستقیم آن منجر به گسترش زمین‌های کشاورزی و افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی شده است. کل منابع آب در سراسر ایران، از سال ۱۹۶۰، بیش از ۶۵٪ کاهش یافته است و تا سال ۲۰۲۵، کاهش شانزده درصدی خواهد داشت. افزایش تقاضا برای آب‌های زیرزمینی، از یک‌سو، و میزان بالای آبیاری و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب در برخی مناطق، از سوی دیگر، احتمالاً تبدیل به مشکلی جدی برای حفاظت از آینده حوزه‌های آب زیرزمینی، در مرکز و شمال ایران، می‌شود (Forootan et al., 2014).

۳-۲- همبستگی کانونی بین تغییرات ذخیره کل آب و غلظت دی‌اکسید کربن

همبستگی کانونی بین دو سری متغیر X (مستقل) و Y (وابسته) انجام شد که، به ترتیب، دی‌اکسید کربن و تغییرات ذخیره کل آب محسوب می‌شوند. نمودار ۱ همبستگی کانونی بین متغیرهای X و Y را نشان می‌دهد که در آن همبستگی کانونی در 1 Variate برابر

مطابق با شکل ۲، در سراسر کشور روند کاهشی در تغییرات ذخیره کل آب تشخیص داده می‌شود. در کل، فقط بخشی از غرب و جنوب‌غرب روند کاهشی کمتری از دیگر بخش‌های ایران دارد. براساس آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن در آبان ۱۳۹۵، جمعیت کشور برابر با ۷۹۹۲۶۲۷۰ نفر بوده است که، از این تعداد، حدود ۷۴.۹۱٪ در نقاط شهری ساکن بوده‌اند. طبق آمار دفتر مطالعات منابع آب ایران، استان‌هایی مانند کرمان، سیستان و بلوچستان، فارس، اصفهان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و به‌طورکلی، استان‌های واقع در شرق، جنوب‌شرق و مرکز ایران بیشترین میزان مصرف منابع آب زیرزمینی را، در بخش کشاورزی، دارند. جودکی^۱ و همکاران (۲۰۱۴) نیز، برای برآورد تغییرات ماهیانه ذخیره آب کل در خاورمیانه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲، از داده‌های گریس استفاده کردند. نتایج آن‌ها، همانند نتایج فروتن و همکاران (۲۰۱۴)، روند منفی را در کل ذخایر آب در مرکز و غرب ایران و شرق عراق نشان داد. آن‌ها علت این روند کاهشی بزرگ در کل ذخایر آب در مناطق یادشده و نیز، بیش از نیمی از تلفات آب‌های زیرزمینی در ایران را به خشکسالی سال ۲۰۰۷ و برداشتهای انسانی نسبت دادند. خاکی و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات ذخایر آب غیرسطحی، از جمله آب‌های زیرزمینی، و تغییرات رطوبت خاک در شش حوزه آبخیز اصلی ایران، از جمله قسمت شرقی آن (هامون)، دریای خزر، مرکز، سرخس، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که، در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲، میانگین کاهش آب‌های زیرزمینی در ایران ۸-۹ میلی‌متر در سال است. کاهش مشابهی نیز در ذخیره رطوبت خاک، به‌ویژه پس از سال ۲۰۰۵، مشاهده شده است. آنان علت کاهش آب‌های زیرزمینی و رطوبت خاک را عوامل اقلیمی، از جمله کاهش بارش و فعالیت‌های انسانی و اغلب آبیاری، دانستند. شریفی و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از داده‌های ماهیانه ماهواره گریس، توانایی پایش خشکسالی در ایران را

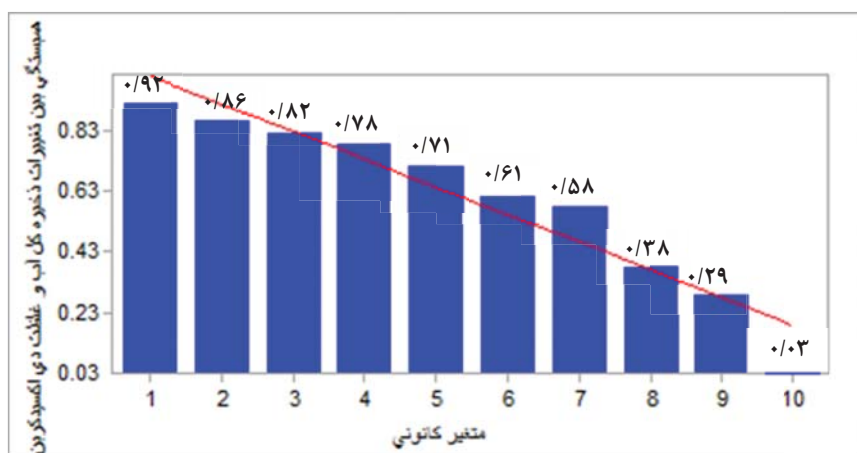
1. Joodaki

اثرگذار باشند، در گام‌های بعدی، وارد مطالعه می‌شوند. متغیر وابسته، در این مطالعه، تغییرات ذخیره کل آب و متغیرهای مستقل (دی‌اکسید کربن، اطلاعات آماری مربوط به تخلیه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، چشمه، قنات، مصرف کشاورزی، مصرف شرب، مصرف صنعت برحسب میلیون مترمکعب) هستند. ضریب تعیین تعدیل‌شده تأثیر واقعی متغیر دی‌اکسید کربن در مدل مورد نظر را نشان می‌دهد و در مقایسه با ضریب تعیین، درجه اعتماد بیشتری دارد که در مطالعه حاضر، ۰.۹ برآورد شده است. در جدول ۱، بتا (Beta) همان B استاندارد است. در این قسمت، اگر بیش از یک متغیر وجود داشته باشد، متغیرهای وارد شده را می‌توان، با مقایسه مقدار آماره بتای آن‌ها، با هم مقایسه کرد. آماره t اهمیت تک‌تک متغیرها را بیان می‌کند و آزمون F در جدول تحلیل واریانس «ANOVA» به آزمون کل مدل رگرسیونی می‌پردازد. مطابق با جدول ۱، متغیر دی‌اکسید کربن دارای بیشترین تأثیر در خروجی مدل رگرسیونی است.

با ۰.۹۲، Variate ۲ برابر با ۰.۸۶، Variate ۳ برابر با ۰.۸۲، Variate ۴ برابر با ۰.۷۸، Variate ۵ برابر با ۰.۷۱، محاسبه شد. همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین همبستگی در ۱ Variate وجود دارد و هرچه به سمت آخرین Variate پیش می‌رود، همبستگی به کمترین میزان می‌رسد (شکل ۵). به بیان دیگر، نخستین جفت متغیر کانونی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین همبستگی داخلی ممکن بین دو مجموعه متغیر وجود داشته باشد. دومین جفت به‌گونه‌ای استخراج می‌شود که بین دو مجموعه از متغیرها، که برای جفت اول متغیرها حساب نشده‌اند، بیشترین رابطه وجود داشته باشد و انتخاب به این صورت ادامه می‌یابد.

۳-۳- رگرسیون گام‌به‌گام بین متغیر تغییرات ذخیره کل آب و دی‌اکسید کربن

در رگرسیون گام‌به‌گام، ابتدا متغیر اول، براساس بیشترین میزان تأثیر وارد، مطالعه می‌شود و متغیرهای دیگر هم، اگر بتوانند به‌صورت معنادار در متغیر وابسته



شکل ۵. همبستگی کانونی بین سری متغیرهای تغییرات ذخیره کل آب و دی‌اکسید کربن

جدول ۱. روش رگرسیون خطی بین متغیر تغییرات ذخیره کل آب و دی‌اکسید کربن به‌روش گام‌به‌گام

دی‌اکسید کربن						
R	R Square	Adjusted R Square	F	Sig	Beta	
۰.۹۵۶	۰.۹۱۴	۰.۹۰۷	۱۱۷.۶۱۳	۰.۰۰۰	-۰.۹۵۶	

جدول ۲. روش رگرسیون خطی بین متغیر دی‌اکسید کربن و آب زیرزمینی به روش گام‌به‌گام

دی‌اکسید کربن					
R	R Square	Adjusted R Square	F	Sig	Beta
۰.۹۵۶	۰.۹۱۴	۰.۹۰۶	۱۱۶.۹۰۲	۰.۰۰۰	-۰.۹۵۶

همبستگی کانونی بین سری زمانی داده‌های دی‌اکسید کربن و تغییرات ذخیره کل آب نشان‌دهنده رابطه قوی بین این متغیرهاست. در واقع، نتایج بیان می‌کنند افزایش گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن عاملی اثرگذار در منابع آب شمرده می‌شود که این تأثیرات را می‌توان، از جنبه تأثیر بر بارش و تبخیر و تعرق، مورد واسنجی قرار داد. در ضمن، نتایج رگرسیون گام‌به‌گام بین تغییرات ذخیره کل آب و دی‌اکسید کربن با $R^2 = 0.91$ و رگرسیون بین آب زیرزمینی و دی‌اکسید کربن با $R^2 = 0.91$ نشان داد، در کنار مصرف و تخلیه که نشان از دخالت‌های مستقیم انسان در مصرف آب زیرزمینی دارند، دی‌اکسید کربن همچنان با بیشترین تأثیر ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.90$) در مدل نگه داشته شده است. طبق مطالعات انجام‌شده، عوامل متعددی باعث روند افزایشی دی‌اکسید کربن می‌شوند که عبارتند از: تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی. روند کاهش تغییرات ذخیره کل آب نیز حاصل دلایل متعددی همچون خشکسالی، کاهش نزولات جوی، افزایش دما و گرمایش جهانی، بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب — به‌خصوص آب‌های زیرزمینی، حفر غیرمجاز چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، مصرف بیش‌ازحد آب — به‌ویژه در بخش کشاورزی و در نهایت، رشد سریع جمعیت و افزایش شهرنشینی است. دی‌اکسید کربن نقش مهمی در گرمایش جهانی دارد و با تأثیر مستقیم در بارش، دما، تبخیر و تعرق گیاهان در تغییرات ذخیره کل آب و کاهش منابع آب نیز دست دارد و می‌توان آن را متغیر اقلیمی بسیار مؤثری، در هرچه بهتر شدن وضعیت منابع آب ایران، محسوب کرد. البته شایان ذکر است که

۳-۴- رگرسیون گام‌به‌گام بین متغیر دی‌اکسید کربن و آب زیرزمینی، به‌منزله متغیر وابسته و به‌صورت سالیانه، در کنار دی‌اکسید کربن و تخلیه کل آب و مصارف (صنعت، شرب و کشاورزی)، به‌منزله متغیرهای مستقل، وارد مدل رگرسیون شد. از بین متغیرهای مستقل، دی‌اکسید کربن با $R^2 = 0.91$ بیشترین رابطه را با متغیر آب زیرزمینی داشت.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه مفاهیم آب‌شناختی منطقه‌ای تغییر اقلیم نقش مهمی در مدیریت منابع آب دارد. انتظار می‌رود که چرخه آب، به‌علت افزایش دما، سرعت بگیرد و شدت و فرکانس و مدت زمان بارش، با گرم‌شدن، تغییر یابد. تبخیر تعرق، رطوبت خاک و رواناب در برابر تغییرات کوچک در دما و بارش حساس‌اند. چرخه آب‌شناختی جهانی و منطقه‌ای تحت تأثیر فراوان مداخلات انسانی، مانند آبیاری و عملیات ذخیره‌سازی و استحصال آب، قرار دارد (Jaramillo & Destouni, 2015). سولومون^۱ و همکاران (۲۰۰۹) نیز، درمورد تغییرات اقلیمی برگشت‌ناپذیر به‌دلیل انتشار دی‌اکسید کربن، بیان کردند که در قرن بیستم، بر اثر فعالیت‌های انسانی، غلظت گازهای گلخانه‌ای اصلی در جو افزایش یافته است و به همین دلیل، انتظار می‌رود بیشتر تغییرات فیزیکی اقلیمی حاصل از وجود دی‌اکسید کربن انسانی در جو زمین برگشت‌پذیر نباشد. احتمالاً گرما با تغییرات بارش ارتباط دارد و چه بسا در تأمین آب مصرفی انسان، بخش کشاورزی و اکوسیستم تأثیر بگذارد.

1. Solomon

بررسی تغییرات ماهانه دی‌اکسید کربن ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GOSAT، اولین کنفرانس بین‌المللی نمونه‌برداری و پایش آلاینده‌های محیط‌زیست.

Alsdorf, D. & Lettenmaier, D.P., 2003, **Tracking Fresh Water from Space**, Science, 301, PP. 1491-1494.

Andersen, O.B., Seneviratne, S.I., Hinderer, J. & Viterbo, P., 2005, **GRACE-derived Terrestrial Water Storage Depletion Associated with the 2003 European Heat Wave**, Geophysical Research Letters, 32(18).

Berry, P.A.M., Garlick, J.D., Freeman, J.A. & Mathers, E.L., 2005, **Global Inland Water Monitoring from Multi-mission Altimetry**, Geophysical Research Letters, 32(16).

Brewer, W., Hoffman, G., Silver, E., DiLeonardo, C., Henderson, J.R. & Vigil, S., 2012, **Evaluating Use of Satellite Observations for Detecting Large CO₂ Leaks and Carbon Sequestration Monitoring**, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore CA.

Calmant, S. & Seyler, F., 2006, **Continental Surface Waters from Satellite Altimetry**, Comptes Rendus Geoscience, 338(14-15), PP. 1113-1122.

Chang, B., Kruger, U., Kustra, R. & Zhang, J., 2013, **Canonical Correlation Analysis Based on Hilbert-schmidt Independence Criterion and Centered Kernel Target Alignment**, In International Conference on Machine Learning, PP. 316-324.

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. & Wunch, D., 2011, **Atmospheric Carbon**

شناسایی این روابط در مقیاس کلان ملموس است و در مقیاس محلی شیوه‌های مدیریتی در تغییرات منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، تأثیر بیشتری دارد. پیشنهاد می‌شود، برای روشن‌تر شدن رابطه بین دی‌اکسید کربن و تغییرات ذخایر کل آب، تغییرات سایر مؤلفه‌های مؤثر در چرخه هیدرولوژیکی، مانند دما و بارش و تبخیر-تعرق، نیز مطالعه شود.

۵- منابع

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۵، سالنامه آماری ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

سیایی، ژ، ۱۳۹۶، مدل‌سازی توزیع مکانی گاز CO₂ در ارتباط با مؤلفه‌های پوشش اراضی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی.

شریفی، م.ع، آخوندزاده، م، شهریسوند، م، صنعتگر قوچانی، م، ۱۳۹۳، پایش خشکسالی در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ثقل‌سنجی GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص. ۳۵-۳۹.

صادقی، ح، شاد، ر، ۱۳۹۴، چگونگی پایش تغییرات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، اولین کنفرانس علمی- پژوهشی افق‌های نوین در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی ایران.

فتح‌الله‌زاده، ف، وثوقی، ب، روفیان نایینی، م، محبی، م، ۱۳۹۴، برآورد تغییرات سالانه آب‌های زیرزمینی در ایران به‌کمک مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی GRACE، اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی.

فرج‌زاده، م، ۱۳۸۶، تکنیک‌های اقلیم‌شناسی، تهران: سمت.

موسوی، س.م، فلاحتکار، س، فرج‌زاده، م، ۱۳۹۵،

- Dioxide Retrieved from the Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with Ground-based TCCON Observations and GEOS-chem Model Calculations**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D21).
- Crétau, J.F. & Birkett, C., 2006, **Lake Studies from Satellite Radar Altimetry**, Comptes Rendus Geoscience, 338(14-15), PP. 1098-1112.
- Food and Agriculture Organization, 2015, <<http://ag/agp/agpc/doc/counprof/iran/iran.htm>>. last visited at 23/04/2015>.
- Forootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., Sharifi, M.A., Awange, J.L., Schmidt M., ... & Famiglietti, J., 2014, **Separation of Large Scale Water Storage Patterns over Iran Using GRACE, Altimetry and Hydrological Data**, Remote Sensing of Environment, 140, PP. 580-595.
- Guo, M., Wang, X.F., Li, J., Yi, K.P., Zhong, G.S., Wang, H.M. & Tani, H., 2013, **Spatial Distribution of Greenhouse Gas Concentrations in Arid and Semi-arid Regions: A Case Study in East Asia**, Journal of Arid Environments, 91, PP. 119-128.
- Jaramillo, F. & Destouni, G., 2015, **Local Flow Regulation and Irrigation Raise Global Human Water Consumption and Footprint**, Science, 350(6265), PP. 1248-1251.
- Jing, Y., Shi, J. & Wang, T., 2014, **Mapping Global Land XCO₂ from Measurements of GOSAT and SCIAMACHY by Using Kriging Interpolation Method**, in 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, PP. 3017-3020.
- Joodaki, G., Wahr, J. & Swenson, S., 2014, **Estimating the Human Contribution to Groundwater Depletion in the Middle East, from GRACE Data, Land Surface Models, and Well Observations**, Water Resources Research, 50(3), PP. 2679-2692.
- Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., van Dijk, A.I.J.M., Schumacher, M. & Sharifi, M.A., 2018, **Determining Water Storage Depletion within Iran by Assimilating GRACE Data into the W3RA Hydrological Model**, Advances in Water Resources, 114, PP. 1-18.
- 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**, Applied Optics, 48(35), PP. 6716-6733.
- Miao, R., Lu, N., Yao, L., Zhu, Y., Wang, J. & Sun, J., 2013, **Multi-year Comparison of Carbon Dioxide from Satellite Data with Ground-based FTS Measurements (2003-2011)**, Remote Sensing, 5(7), PP. 3431-3456.
- Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., Wennberg, P., ... & Warneke, T., 2010, **Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra**, Atmospheric Measurement Techniques, 4(6), PP. 1061-1076.
- Mousavi, S.M., Falahatkar, S. & Farajzadeh, M., 2017, **Assessment of Seasonal Variations of Carbon Dioxide Concentration in Iran Using GOSAT Data**, In Natural Resources Forum, 41(2), PP. 83-91. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Papa, F., Durand, F., Rossow, W.B., Rahman, A. & Bala, S.K., 2010, **Satellite Altimeter-Derived Monthly Discharge of the Ganga-Brahmaputra River and its Seasonal to Interannual Variations**

- from 1993 to 2008, *Journal of Geophysical Research*, 115(C12).
- Papa, F., Prigent, C., Durand, F. & Rossow, W.B., 2006, **Wetland Dynamics Using a Suite of Satellite Observations: A Case Study of Application and Evaluation for the Indian Subcontinent**, *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Parker, R., Boesch, H., Cogan, A., Fraser, A., Feng, L., Palmer, P.I. ... & Wunch, D., 2011, **Methane Observations from the Greenhouse Gases Observing Satellite: Comparison to Ground-based TCCON Data and Model Calculations**, *Geophysical Research Letters*, 38(15), PP. 1-20.
- Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Bergamaschi, P. & Peters, W., 2009, **Three Years of Greenhouse Gas Column-averaged Dry Air Mole Fractions Retrieved from Satellite—Part 2: Methane**, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 9(2), PP. 443-465.
- Shim, C., Lee, J. & Wang, Y., 2013, **Effect of Continental Sources and Sinks on the Seasonal and Latitudinal Gradient of Atmospheric Carbon Dioxide over East Asia Atmospheric Environment**, 79(85), PP. 853-860.
- Solomon, S., Plattner, G.K., Knutti, R. & Friedlingstein, P., 2009, **Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions**, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), PP. 1704-1709.
- Sun, Z., Wang, X., Tani, H., Zhong, G. & Yin, S., 2016, **Spatial Distribution of CO₂ Concentration over South America during ENSO Episodes by Using GOSAT Data**, *American Journal of Climate Change*, 5(01), P. 77.
- Syed, T.H., Famiglietti, J.S., Rodell, M., Chen, J. & Wilson, C.R., 2008, **Analysis of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE and GLDAS**, *Water Resources Research*, 44(2).
- Tourian, M.J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S. & Sneeuw, N., 2015, **A Spaceborne Multisensor Approach to Monitor the Desiccation of Lake Urmia in Iran**, *Remote Sensing of Environment*, 156, PP. 349-360.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M. & Parsons, D.B., 2003, **The changing Character of Precipitation**, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), PP. 1205-1218.
- UNEP, 1997.
- WMO, 2015, **WMO WDCGG Data Summary**, No. 39, Japan Meteorological Agency/WMO: Tokyo, Japan, 2015; PP. 17-22.
- Yeh, P.J.F., Swenson, S.C., Famiglietti, J.S. & Rodell, M., 2006, **Remote Sensing of Groundwater Storage Changes in Illinois Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)**, *Water Resources Research*, 42(12), PP. 1-7.
- Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H. & Maksyutov, S., 2009, **Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results**, *National Institute for Environmental Studies Tsukuba, Japan, SOLA*, 5, PP. 160-163.