



سنجش از دور

و

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.15, No. 4, Winter 2023

۶۰-۴۱

مقاله پژوهشی

تحلیل روند تغییرات منابع آب و عوامل مؤثر در آن در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران با استفاده از محصولات ماهواره‌ای

محسن ابراهیمی خوسفی^{۱*} و زهره ابراهیمی خوسفی^۲

۱. استادیار سنجش از دور گروه جغرافیا، دانشگاه یزد

۲. دانشیار بیابان‌زدایی گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳

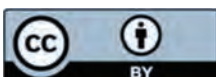
چکیده

حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب در دسترس از یک سو و افزایش جمعیت و به تبع آن، افزایش تقاضا از سوی دیگر، با بحران شدید آب مواجه است. دانش سنجش از دور و در دسترس بودن محصولات متعدد ماهواره‌ای امکان پایش روند تغییرات پارامترهای گوناگون محیطی، به ویژه منابع آب سطحی و زیرزمینی را با دقت مناسب فراهم آورده است. بدین منظور، با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، شانزده محصول ماهواره‌ای شامل پارامترهای محیطی متفاوت، همچون بارش، دما، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، رواناب، ضخامت آب معادل (GRACE)، شاخص پوشش گیاهی و مساحت پیکره‌های آبی، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، دریافت و آماده‌سازی شد. سپس با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال و تخمین گر شیب سن، روند تغییرات این پارامترها بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل، تغییرات گرانش زمین که از نشانگرهای سطح آب زیرزمینی است و نیز مساحت پیکره‌های آبی که بیانگر منابع آب سطحی است و رطوبت خاک، روندی کاهشی و معنی‌دار را نشان داد؛ در حالی که دمای حداکثر، دمای حداقل و تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص NDVI بیانگر روند افزایشی معنی‌داری بود. به رغم کاهش مساحت پیکره‌های آبی، شاخص پوشش گیاهی افزایش یافته است که افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و روند کاهشی محصول ماهواره GRACE نیز مؤید این واقعیت است. بررسی ضرایب همبستگی بین پارامترهای دارای روند معنی‌دار نیز نشان داد بین GRACE و پارامترهای NDVI، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت خاک و مساحت پیکره‌های آبی، همبستگی معنی‌داری وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور، روند تغییرات، گوگل ارث انجین، منابع آب سطحی، منابع آب زیرزمینی، پیکره‌های آبی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: یزد، صفائیه، دانشگاه یزد، گروه جغرافیا، ساختمان امامت، اتاق ۲۱۵. تلفن: ۰۳۵۳۱۲۳۳۸۹۴

Email: Mohsen.ebrahimi@yazd.ac.ir
https://orcid.org/0000-0002-2756-0388
https://doi.org/10.48308/gisj.2022.102889



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

۱- مقدمه

با توجه به روند گرم‌شدن کره زمین بر اثر گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی، مدیریت منابع آب چالش جهانی بسیار مهمی به‌شمار می‌رود. آب برای زندگی انسان، در قالب آب آشامیدنی و کمک به بهداشت، ضروری است و در تأمین غذا، انرژی و سلامت نیز اهمیت فراوانی دارد. رخدادهای حادی و تغییرات شدید در چرخه آب که به‌صورت سیل و خشکسالی جلوه می‌کنند، نیز می‌توانند تأثیرات شگرفی در تمامی فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در جمعیت‌های آسیب‌پذیر، داشته باشند. بنابراین آب در توسعه اهمیت اساسی دارد و این نقش آن از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد شناخته شده است (United Nations, 2016). مدیریت منابع آب برای توسعه پایدار، در مناطق دارای شبکه‌های پایش زمینی و پراکنده، با چالش‌های زیادی مواجه است. در بسیاری از مناطق، شبکه‌های نظارت آب‌وهواشناسی و کشاورزی اغلب پراکنده‌اند و تأخیر زیاد دارند و بنابراین، در تصمیم‌گیری در زمان واقعی، کاربرد عملی ندارند. در مناطق در حال توسعه که مسلماً به بیشترین مقدار اطلاعات نیاز است، به دلیل کاهش تعداد شبکه‌های آب‌وهواشناسی و نظارت کشاورزی و فقدان سرمایه‌گذاری مداوم در زیرساخت و آموزش، زیرساخت‌های جمع‌آوری داده‌ها و ظرفیت انسانی برای پایش و پیش‌بینی خطرها اغلب اندک است (Fay et al., 2017; Lorenz & Kunstmann, 2012). دانش سنجش از دور و رشد تصاعدی اطلاعات مبتنی بر ماهواره، طی چند دهه گذشته، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای را برای پشتیبانی و بهبود مدیریت منابع آب فراهم کرده است. علاوه بر این، موانع معمول و قدیمی برای دسترسی و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در حال کاهش است زیرا نوآوری‌های فناوری‌ها، برای مدیریت و ارائه این انبوه اطلاعات به مخاطبان گسترده‌تر، فرصت‌هایی فراهم می‌کنند (Sheffield et al., 2018). دستیابی به امنیت آب و افزایش انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات شدید هیدرولوژیکی مستلزم درکی

مطلوب از پویایی منابع آب در مقیاس حوضه است. این دانش و درک صرفاً براساس داده‌ها و مشاهدات حاصل می‌شود و زیربنای مدیریت بهینه و کارآمد آب، از نظر اقتصادی و اجتماعی است و به تأثیرات زیست‌محیطی و استفاده‌کنندگان پایین‌دستی نیز نگاهی دارد. به‌طور خاص، به اطلاعاتی در مورد متغیرهای هیدرولوژیکی که چرخه هیدرولوژیکی در خشکی را تشکیل می‌دهند، نحوه تغییر آنها در طول زمان و مکان، و نحوه ظهور آنها به‌صورت رخدادهای حادی و خطرهای متعاقب آن نیاز است (Walker, 2000). علاوه بر این، کاربرد سری‌های زمانی طولانی‌مدت (چند دهه) از متغیرهای هیدرولوژیکی، برای تخمین خطر سیل یا خشکسالی، به‌منزله ورودی مدل‌های پیش‌بینی برای کاهش خود خطر و تأثیرات آن، ضرورت دارد (Serinaldi & Kilsby, 2017). سنجش از دور ماهواره‌ای، در جایگاه منبع اطلاعات تکمیلی برای شبکه‌های نظارت زمینی، کاربردی روزافزون دارد و در بسیاری موارد و مناطق، تنها منبع در دسترس است. سنجنده‌های ماهواره‌ای قادر به اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم تقریباً تمامی اجزای چرخه هیدرولوژیکی‌اند؛ از جمله بارش، تبخیر و تعرق، سطح آب دریاچه‌ها و تالاب‌ها، رطوبت خاک، مجموع ذخایر آبی و زیرزمینی و دما (Lettenmaier et al., 2016; McCabe et al., 2017; Zhang et al., 2015) و می‌توانند اطلاعات سری‌های زمانی متفاوت را در اختیار کاربران و پژوهشگران قرار دهند. همچنین این سنجنده‌ها قادر به ارائه اطلاعات حیاتی، در حمایت از مدیریت آب و نظارت بر بلایای طبیعی (همچون سیل و خشکسالی) و تأثیرات مخرب آنها هستند (Van Dijk & Renzullo, 2011). علاوه بر این سنجش از دور امکان پایش و نظارت بر تولید محصولات کشاورزی، تولید مواد غذایی، ذخیره‌سازی و تجارت آنها را فراهم می‌کند و به‌نحوی بیابانگر امنیت آب و غذای هر منطقه به‌شمار می‌رود (Dalin et al., 2017; Jones, 2009).

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات و پژوهش‌های متعددی نیز در ایران، در حوزه مدیریت منابع آب و پایش آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، انجام شده است. در مطالعه‌ای، ارزیابی شاخصه‌های خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، با استفاده از ماهواره گرانش‌سنجی انجام شد و فراوانی، مدت و شدت خشکسالی کشاورزی این حوضه، از طریق شاخص کمبود ذخیره کلی آب، داده‌های گرانشی ماهواره و شاخص بارش استاندارد (SPEI)^۱ به دست آمد. براساس این محاسبات، ناحیه مورد مطالعه چندین خشکسالی کشاورزی را با شدت و گستردگی متفاوت پشت سر گذاشته که توزیع زمانی-مکانی و شدت خشکسالی حاصل از هر دو شاخص با یکدیگر مطابقت خوبی را نشان داده است (Nemati et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر، شاخصی کارآمد مبتنی بر تلفیق داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره‌ای برای پایش خشکسالی در کشور ایران، با نام شاخص خشکسالی داده‌های ادغام‌شده (MDI)^۲ مطرح شد. برای تهیه این شاخص، از محصولات ماهواره‌ای شاخص پوشش گیاهی (NDVI)^۳، سنجنده مادیس و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است. نتایج به دست آمده همبستگی ۷۵ درصدی با شاخص استاندارد جهانی شدت میزان خشکسالی پالمیر (PDSI)^۴ را مشخص کرد. نتایج شاخص MDI و PDSI روند خشکسالی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در ایران را به وضوح نشان داد (Farzaneh et al., 2021). در پژوهشی دیگر، از داده‌های ماهواره‌ای سامانه گوگل ارث انجین همچون NDVI، دمای سطحی زمین در شب و روز، رطوبت سطحی خاک، بارش، شاخص وضعیت دما (TCI)^۵ و تبخیر و تعرق، برای پایش و پیش‌بینی تغییرات پهنه آبی تالاب انزلی، مبتنی بر یک سیستم هوشمند عصبی-فازی استفاده شده است (Seyed Mousavi & Akhoondzadeh Hanzaei, 2022). مطالعات متعددی نیز داده‌های ماهواره GRACE و ارتباط آن با نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق گوناگون کشور را از جمله منطقه جنوب ایران

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات و پژوهش‌های متعددی نیز در ایران، در حوزه مدیریت منابع آب و پایش آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، انجام شده است. در مطالعه‌ای، ارزیابی شاخصه‌های خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، با استفاده از ماهواره گرانش‌سنجی انجام شد و فراوانی، مدت و شدت خشکسالی کشاورزی این حوضه، از طریق شاخص کمبود ذخیره کلی آب، داده‌های گرانشی ماهواره و شاخص بارش استاندارد (SPEI)^۱ به دست آمد. براساس این محاسبات، ناحیه مورد مطالعه چندین خشکسالی کشاورزی را با شدت و گستردگی متفاوت پشت سر گذاشته که توزیع زمانی-مکانی و شدت خشکسالی حاصل از هر دو شاخص با یکدیگر مطابقت خوبی را نشان داده است (Nemati et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر، شاخصی کارآمد مبتنی بر تلفیق داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره‌ای برای پایش خشکسالی در کشور ایران، با نام شاخص خشکسالی داده‌های ادغام‌شده (MDI)^۲ مطرح شد. برای تهیه این شاخص، از محصولات ماهواره‌ای شاخص پوشش گیاهی (NDVI)^۳، سنجنده مادیس و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است. نتایج به دست آمده همبستگی ۷۵ درصدی با شاخص استاندارد جهانی شدت میزان خشکسالی پالمیر (PDSI)^۴ را مشخص کرد. نتایج شاخص MDI و PDSI روند خشکسالی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در ایران را به وضوح نشان داد (Farzaneh et al., 2021). در پژوهشی دیگر، از داده‌های ماهواره‌ای سامانه گوگل ارث انجین همچون NDVI، دمای سطحی زمین در شب و روز، رطوبت سطحی خاک، بارش، شاخص وضعیت دما (TCI)^۵ و تبخیر و تعرق، برای پایش و پیش‌بینی تغییرات پهنه آبی تالاب انزلی، مبتنی بر یک سیستم هوشمند عصبی-فازی استفاده شده است (Seyed Mousavi & Akhoondzadeh Hanzaei, 2022). مطالعات متعددی نیز داده‌های ماهواره GRACE و ارتباط آن با نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق گوناگون کشور را از جمله منطقه جنوب ایران

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
2. Merged Dataset Drought Index
3. Normalized Difference Vegetation Index
4. Palmer Drought Severity Index
5. Thermal Condition Index

و سنتینل طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، در سامانه گوگل ارث انجین از سوی پویان^۱ و همکاران (۲۰۲۲) نشان از وقوع خشکسالی با شدت متوسط، در ایران، در سال ۲۰۱۸ دارد. مطالعه طاهری دهکردی^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز که بر بستر سامانه گوگل ارث انجین و با استفاده از سری زمانی ۱۸۰۰۰ تصویر لندست، از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۲۱ انجام شده، بیانگر کاهش منابع آب‌های سطحی در تمامی حوضه‌های آبریز اصلی ایران، به‌جز حوضه خلیج فارس است. دنگ^۳ و همکاران (۲۰۱۹) نیز روند تغییرات مساحت پیکره‌های آبی در حوضه آبریز یانگ‌تسه^۴ در چین را با استفاده از ۷۵۵۹۳ تصویر لندست، بررسی کردند.

مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد تا کنون مطالعه‌ای جامع، برای بررسی روند تغییرات پارامترهای مؤثر در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز مرکزی ایران، با استفاده از محصولات ماهواره‌ای، انجام نشده است و بیشتر مطالعات صرفاً یک یا چند محصول محدود ماهواره‌ای در مناطق محدودی از پهنه جغرافیایی ایران را دریافت و پردازش و تفسیر کرده‌اند. از این رو و با توجه به اهمیت موضوع، هدف این پژوهش بررسی و تحلیل روند تغییرات مساحت پیکره‌های آبی و منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، با مساحت تقریباً ۵۰٪ از کشور، با استفاده از شازنده نوع داده و محصولات ماهواره‌ای در دسترس است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعت بیش از ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع، دارای شش حوضه آبریز اصلی یا درجه یک است و این حوضه‌ها به سی حوضه درجه دو تقسیم می‌شوند.

1. Pouyan
2. Taheri Dehkordi
3. Deng
4. Yangtze River Basin

یابد (Climatology Research Institute, 2016; Ebrahimi Khusfi et al., 2016; Research Center of the Islamic Council, 2016). این روندهای نگران‌کننده ضرورت و اهمیت توجه به پایش منابع محدود آبی موجود و برنامه‌ریزی برای هدایت صحیح و بهینه آنها به بخش‌های مصرف‌کننده کشاورزی، صنعت و شرب را نشان می‌دهد.

حوضه آبریز فلات مرکزی، با مساحت تقریباً ۸۲۴ هزار کیلومتر مربع، بیشتر مساحت ایران را زیر پوشش دارد. این حوضه شامل دامنه‌های جنوبی البرز، دامنه‌های شرقی زاگرس و دشت‌های لوت و کویر می‌شود و بین عرض جغرافیایی ۲۶/۵ درجه شمالی تا ۳۸ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه شرقی تا ۶۱/۵ درجه شرقی واقع شده است. در حوضه آبریز فلات مرکزی، ۴۵۶ شهر با جمعیتی بالغ بر ۳۰ میلیون نفر، معادل ۵۰٪ جمعیت شهری کشور و بیش از ۶ میلیون نفر جمعیت روستایی قرار دارد. ۲۳۳ دشت از ۶۰۹ دشت مطالعاتی کشور نیز در این حوضه واقع شده است که از این تعداد، ۱۸۹ دشت وضعیت ممنوع و یا ممنوع بحرانی دارند (Center for Development and Foresight Research, 2021). برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و سطحی باعث تشدید فرونشست و افزایش مساحت کانون‌های تولید گردوغبار در این منطقه‌ها می‌شود و جمعیتی حدود ۳۶ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای، در مقیاس‌های مکانی وسیع، نیازمند ابزارهای ذخیره‌سازی، نمایش و پردازش قدرتمند است. گوگل ارث انجین سامانه‌ای آنلاین برای دسترسی به محصولات و داده‌های گوناگون ماهواره‌ای و همچنین پردازش آنهاست. استفاده از این سامانه، با هدف پایش و مدیریت منابع آب، مورد توجه فزاینده محققان و پژوهشگران گوناگون قرار گرفته است. بررسی روند تغییرات زمانی- مکانی خشکسالی در ایران، با استفاده از شاخص‌های خشکسالی و داده‌های ماهواره‌ای لندست

اقلیمی، به دلیل تأثیرگذاری در حوزه‌های اقتصادی و اجتماعی و سیاسی، لزوماً به شهرهای حوضه آبریز مرکزی محدود نمی‌شود بلکه، فراتر از مرزهای جغرافیایی آن و در مقیاس بزرگ‌تر، چه بسا امنیت این شهرها را تحت تأثیر قرار دهد (Afzali et al., 2020). بنابراین، در این پژوهش، حوضه آبریز فلات مرکزی ایران به‌منزله منطقه مورد مطالعه انتخاب شد که موقعیت جغرافیایی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای انجام دادن پژوهش حاضر، از محصولات ماهواره‌ای در دسترس در سامانه گوگل ارث انجین، طی بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استفاده شده است. با توجه به اهمیت پایه زمانی مشترک، برای پردازش و تحلیل نتایج، بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ انتخاب شد و تمامی محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده (جدول ۱)، در این بازه،

در این بین حوضه آبریز فلات مرکزی به دلیل اقلیم خشک و بارندگی بسیار کمتر از میانگین کشور، در برابر کاهش منابع آب در دسترس، آسیب‌پذیرتر از دیگر حوضه‌های کشور است. برخی پژوهشگران، با تبیین پیامدهای امنیتی تغییر اقلیم در حوضه آبریز مرکزی ایران، به این نتیجه رسیدند که در صورت تداوم وضعیت فعلی، پیامدهای تغییر اقلیم در حوضه آبریز مرکزی ثبات و امنیت ملی را دچار مشکلاتی خواهد کرد (Kavianirad et al., 2017). تغییرات اقلیمی بر پهنه جغرافیای ایران، زنجیره‌ای از پیامدها مانند تغییر الگوی بارش، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی و ایجاد تنش‌های اجتماعی و امنیتی را به همراه دارد و در ابعاد گوناگون، در زیست جامعه و کشور اثر می‌گذارد؛ به گونه‌ای که در صورت تداوم روند فعلی، تمدن ایرانی دچار چالش راهبردی خواهد شد (Karami, 2021). ظرفیت بحران‌زایی پیامدهای امنیتی ناشی از بحران‌های



جدول ۱. داده‌ها و محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق (دریافت و پردازش تمامی داده‌ها روی سامانه گوگل ارث انجام شده است)

| پارامتر | محصولات ماهواره‌ای | پارامتر | محصولات ماهواره‌ای |
|------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| آب زیرزمینی | GRACE | دمای حداقل و حداکثر | TerraClimate دانشگاه آیداهو |
| بارش | GPM, CHIRPS, TRMM, Idaho_Precipitation | رطوبت خاک | TerraClimate دانشگاه آیداهو |
| دمای سطح زمین | MODIS (MOD11A2) | رواناب | TerraClimate دانشگاه آیداهو |
| پوشش گیاهی | MODIS NDVI (MOD13A1) | تابش ورودی طول موج کوتاه | TerraClimate دانشگاه آیداهو |
| تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل | TerraClimate دانشگاه آیداهو | مساحت پیکره‌های آبی | MODIS (MCD12Q1) |
| خشکسالی (پالمر) | TerraClimate دانشگاه آیداهو | | |

ماهواره GRACE

این ماهواره ناهنجاری‌های گرانشی ماهیانه را در قیاس با خط پایه میانگین زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۴ ارائه می‌دهد. داده‌های این مجموعه داده واحدهای «ضخامت آب معادل»^۳ هستند که انحرافات جرم را با توجه به تغییرات عمودی آب برحسب سانتی‌متر، نشان می‌دهند. این محصول را سه مرکز گوناگون تولید می‌کنند. در این پژوهش، از میانگین داده‌های مرکز تحقیقات فضایی تگزاس (CSR)^۴ و آزمایشگاه پیشرانته جت ناسا (JPL)^۵ استفاده شده است. این مراکز بخشی از سامانه زمینی GRACE هستند و محصولات سطح ۲ را در مقیاس زمانی ماهیانه و با قدرت تفکیک مکانی ۱۱۱۳۲۰ متر تولید می‌کنند (Chambers, 2006; Landerer & Swenson, 2012; Swenson, 2012).

محصولات ماهیانه TerraClimate دانشگاه آیداهو

محصولات TerraClimate مجموعه داده‌ای اقلیمی و آب‌وهوایی از سطح زمین در مقیاس جهانی است که با ترکیب و درون‌یابی، از محصولات جهانی با قدرت تفکیک مکانی بالای WorldClim و محصول دارای

برای منطقه مورد مطالعه در دسترس بودند. سامانه گوگل ارث انجین مجموعه‌ای چندپتابایتی از تصاویر و محصولات ماهواره‌ای و داده‌های مکانی را به‌رایگان در اختیار کاربران گوناگون قرار می‌دهد. این سامانه قابلیت پردازش‌ها و محاسبات گوناگون روی داده‌ها را نیز به‌زبان‌های برنامه‌نویسی پایتون و جاوااسکریپت، بدون نیاز به دانلود، فراهم کرده است (Tamiminia et al., 2020).

بارش ماهیانه (GPM)

محصول GPM^۱ مأموریتی ماهواره‌ای برای فراهم کردن داده‌های سه‌ساعته، روزانه و ماهیانه بارش و برف در سرتاسر جهان است. الگوریتم IMERG^۲ مورد استفاده، برای تولید محصول بارش، از داده‌های تمامی سنجنده‌های فعال و غیرفعال در مجموعه GPM استفاده می‌کند. این الگوریتم با هدف کالیبره کردن، ادغام و درون‌یابی برآوردهای ابزارهای گوناگونی همچون سنجنده‌های مایکروویو، سنجنده‌های مادون قرمز، باران‌سنج‌ها و سایر برآوردکننده‌های بارش به کار می‌رود. این الگوریتم چندین بار اجرا می‌شود؛ به نحوی که ابتدا برآوردی اولیه از بارش به دست می‌دهد و سپس، با در نظر گرفتن سایر منابع و داده‌ها، برآوردهای خود را تدقیق می‌کند و محصول بارش را در مقیاس ماهیانه، برحسب میلی‌متر بر ساعت، با قدرت تفکیک مکانی ۱۱۱۳۲ متر در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Huffman et al., 2019).

1. Global Precipitation Measurement (GPM) v6
2. Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM
3. Equivalent Water Thickness
4. U. Texas / Center for Space Research
5. Jet Propulsion Laboratory

نوع پوشش زمین^۱ سنجنده مادیس ترکیبی ماهواره ترا و آکوا (MCD12Q1)

محصول نوع پوشش سطح زمین در بازه زمانی سالیانه و براساس روش‌های طبقه‌بندی متفاوت نظارت شده، با قدرت تفکیک مکانی پانصد متر، از داده‌های سنجنده مادیس دو ماهواره ترا و آکوا^{۱۱} تولید می‌شود. در این تحقیق، کلاس پوشش زمین «پیکره‌های آبی»^{۱۲}، برای بررسی روند تغییرات سالیانه مساحت پیکره‌های آبی در منطقه مورد مطالعه، استفاده شد (Friedl & MCD12Q1).

۳- روش کار

نمودار فرایندی روش کار، برای این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است. در گام نخست، پارامترهای اقلیمی و محیطی که در بخش پیشین بیان شد، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ از سامانه گوگل ارث انجین به صورت ماهیانه دریافت شد. سپس با توجه به تفاوت بازه زمانی محصولات گوناگون ماهواره‌ای، سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ به‌منزله بازه زمانی مشترک انتخاب شد و تمامی داده‌های ماهیانه به داده‌های متوسط سالیانه تبدیل شدند. با توجه به تفاوت قدرت تفکیک مکانی محصولات گوناگون ماهواره‌ای و تلفیق‌نشدن آنها در فرایند این تحقیق، ابعاد پیکسل‌ها همسان‌سازی نشد و ابعاد پیکسل استاندارد محصول، برای محاسبه میانگین ماهیانه و یا سالیانه آن محصول در کل منطقه مورد مطالعه، در نظر گرفته شد.

1. Climatic Research Unit
2. Japanese 55-Year Reanalysis
3. Actual Evapotranspiration
4. Reference Evapotranspiration (ASCE Penman-Montieth)
5. Downward Surface Shortwave Radiation
6. Enhanced Vegetation
7. Terra
8. Land Surface Temperature
9. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation
10. Land Cover
11. Aqua
12. Water Bodies

قدرت تفکیک مکانی پایین اما زمانی بالای CRU^۱ و JRA55^۲ استفاده می‌کند. برخی محصولات مورد استفاده در این پژوهش، با قدرت تفکیک مکانی ۴۳۶۸ متر، عبارت‌اند از تبخیر و تعرق واقعی (AET)^۳، تبخیر و تعرق مرجع (PET)^۴، شاخص شدت خشکسالی پالمیر (PDSI)، بارش (Precipitation)، تابش ورودی طول موج کوتاه سطحی (Srad)^۵، دمای حداقل، دمای حداکثر، رواناب و رطوبت خاک (Vicente-Serrano et al., 2010).

شاخص‌های گیاهی سنجنده مادیس ماهواره ترا (MOD13A1)

محصول MOD13A1 مقادیر دو شاخص گیاهی NDVI و EVI^۶ را با قدرت تفکیک مکانی پانصد متر و در بازه‌های زمانی شانزده‌روزه در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در واقع، ارزش هر پیکسل بیانگر میانگین شانزده‌روزه شاخص‌های گیاهی است (Didan, 2021).

دمای سطحی زمین سنجنده مادیس ماهواره ترا^۷ (MOD11A2)

محصول MOD11A2 میانگین هشت‌روزه دمای سطحی زمین (LST)^۸ برحسب کلوین را با قدرت تفکیک مکانی هزار متر، در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. دلیل انتخاب بازه هشت‌روزه این است که دوبرابر این بازه، یعنی طی شانزده روز، ماهواره دقیقاً در مسیر برداشت تکراری خود قرار می‌گیرد (Wan et al., 2015).

بارش ماهیانه CHIRPS

محصول CHIRPS^۹ یک مجموعه داده بارش جهانی با قدرت تفکیک مکانی ۵۵۶۶ متر است که با تلفیق داده‌های مادون قرمز ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های زمینی، در بازه زمانی ماهیانه، تولید می‌شود (Funk et al., 2015).

در گام نهایی نیز، با توجه به نتایج، نمودارهای روند تغییرات پارامترهای دارای روند معنی‌دار ترسیم و تحلیل شد.

آزمون من-کندال بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی، بسط و توسعه یافته است و نخستین بار، من و سپس کندال آن را مطرح کردند (Kendall, 1975; Mann, 1945). چنان‌که اشاره شد، این آزمون روشی ناپارامتری و دارای مزایایی است که سبب شده، در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی، کاربرد متداول و گسترده‌ای بیابد (Srivastava & Saran, 2017). در این آزمون، فرض صفر بیانگر تصادفی بودن و نبود روند در سری زمانی داده‌هاست و پذیرش فرض ۱ (رد فرض صفر) دلالت بر وجود روند در سری داده‌ها دارد. در روش من-کندال، فرض بر این است که یک سری زمانی به صورت x_1, x_2, \dots, x_n وجود دارد. آماره آزمون من-کندال با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود؛ در این معادله، z و k مرتبه مشاهدات آند و تابع علامت $sgn(x)$ به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

در گام بعدی، با استفاده از آزمون من-کندال^۱، روند تغییرات تمامی پارامترها در سطوح معنی‌داری متفاوتی بررسی شد. برای تعیین شیب تغییرات، تخمین‌گر شیب سن به کار رفت. به دلیل قرارگرفتن بخش بزرگی از ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و پیامدهای ناشی از خشکسالی، ارزیابی روند تغییرات خشکسالی اهمیت بسیار دارد. بدین‌منظور، روش‌های پارامتری و ناپارامتری متعددی، برای ارزیابی روند تغییرات متغیرهای هیدرواقليم مطرح شده است. نیازداشتن به تبعیت از یک تابع توزیع خاص و داشتن حساسیت کمتر به مقادیر حدی از مزایای روش ناپارامتری است. به همین دلیل، گستره استفاده از روش ناپارامتری در قیاس با پارامتری، در مطالعات ارزیابی تغییرات پارامترهای اقلیمی بیشتر است (Ghorbani et al., 2020; Hejazizadeh et al., 2014; Imani et al., 2021; Mazidi & Bahaaddinbeygi, 2021; Omidvar & Salari, 2013). آزمون‌های روند من-کندال، من-کندال اصلاح‌شده^۲، سن^۳ و پتیت^۴ از روش‌های ناپارامتری دارای کاربرد گسترده در مطالعات به‌شمار می‌روند (Ghorbani et al., 2020).



شکل ۱۲. فرایند انجام‌شدن پژوهش

1. Mann-Kendall
2. Modified Mann-Kendall
3. Sen's Slope
4. Pettite's Change Point

$$Q = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این معادله، X_t و X_s به ترتیب، داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ هستند. مقدار مثبت شیب سن بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی است. برای انجام دادن آزمون من-کندال و تخمین شیب سن، از کدهای نوشته‌شده در محیط نرم‌افزار اکسل و نیز راهنمای کاربری آن استفاده شد (Salmi, 2002).

در گام نهایی، برای بررسی همبستگی بین پارامترهایی که روند افزایشی یا کاهشی معنی‌داری را نشان دادند، نمودار ماتریسی همبستگی در محیط نرم‌افزار R تهیه شد. از این نوع نمودار ماتریسی، در مطالعات متعدد، برای نشان دادن ارتباط بین پارامترهای محیطی گوناگون استفاده شده است (Ebrahimi, Khusfi et al., 2022; Mostafazadeh & Zabihi, 2016; Zabihi et al., 2017).

۴- نتایج

نتایج حاصل از ارزیابی روند تغییرات پارامترهای گوناگون، با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. نتایج آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن

| متغیر (متوسط سالیانه) | توصیف | آزمون Z | سطح معنی‌داری | روند | شیب سن Q | تخمین گر شیب سن | |
|--------------------------|---------------------|---------|---------------|------------------|----------|--|---------------------------------------|
| | | | | | | شیب حداکثر با سطح اطمینان ۹۹٪ (Qmax99) | شیب حداقل با سطح اطمینان ۹۹٪ (Qmin99) |
| GRACE (cm) | تغییرات آب زیرزمینی | -۵/۳۸ | *** | کاهشی معنی‌دار | -۱/۲۴۴ | -۱/۴۹۶ | -۱/۱۰۷ |
| NDVI | شاخص پوشش گیاهی | ۳/۰۳ | ** | افزایشی معنی‌دار | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۷ |
| GPM (mm/hr) | بارش | -۰/۹۵ | | کاهشی | ۰/۰۰۰ | -۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰ |
| LST (K) | دمای سطحی زمین | ۱/۴۴ | | افزایشی | ۰/۰۴۰ | -۰/۰۵۵ | ۰/۱۵۱ |
| CHIRPS (mm) | بارش | -۰/۲۳ | | کاهشی | -۰/۵۵۲ | -۴/۹۳۳ | ۳/۹۵۹ |
| TRMM (mm/hr) | بارش | -۰/۹۱ | | کاهشی | -۰/۰۰۲ | -۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۵ |
| Idaho_precipitation (mm) | بارش | ۰/۰۰ | | بدون روند | -۰/۰۸۶ | -۳/۷۴۷ | ۵/۸۷۱ |
| Idaho_aet (kg/m2) | تبخیر و تعرق واقعی | ۰/۰۰ | | بدون روند | -۰/۰۰۴ | -۲/۹۱۲ | ۴/۸۶۳ |

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j + x_k) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

بر اساس این آزمون، در صورتی که مقدار S اختلاف معنی‌داری با صفر نداشته باشد، روند وجود ندارد و در غیر این صورت، روند صعودی یا نزولی خواهد بود. در آزمون معنی‌دار بودن روند، از متغیر Z نرمال استاندارد طبق رابطه (۳) استفاده می‌شود. فرض صفر (H_0) در آزمون من-کندال بیانگر نبود روند و فرض H_1 بیانگر وجود روند است (Salmi, 2002).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{(\text{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{(\text{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{Var}(S) = \{n(n-1)(2n+5)\} \quad \text{رابطه (۴)}$$

آزمون شیب سن

در این آزمون، شیب میانه برای سری زمانی محاسبه می‌شود و معنی‌داری شیب، در سطوح اطمینان گوناگون، به دست می‌آید. شیب میانه بین داده‌ها طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

ادامه جدول ۲

| متغیر (متوسط سالیانه) | توصیف | آزمون من-کندال | | | تخمین گر شیب سن | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|--|---------------------------------------|
| | | آزمون Z | سطح معنی داری | روند | شیب سن Q | شیب حداکثر با سطح اطمینان ۹۹٪ (Qmin99) | شیب حداقل با سطح اطمینان ۹۹٪ (Qmax99) |
| Idaho_PDSI | شاخص شدت خشکسالی پالم | -۰/۴۵ | | کاهشی | -۰/۰۲۶ | -۰/۱۵۷ | -۰/۱۶۱ |
| idaho_PET (mm) | تبخیر و تعرق پتانسیل | ۱/۸۲ | + | افزایشی معنی دار | ۳/۲۳۹ | -۱/۸۶۷ | ۸/۳۴۸ |
| idaho_Runoff(mm) | رواناب | -۰/۳۸ | | کاهشی | -۰/۰۷۳ | -۰/۵۵۴ | -۰/۷۰۸ |
| idaho_SM(mm) | رطوبت خاک | -۲/۲۷ | * | کاهشی معنی دار | -۰/۹۰۸ | -۱/۹۷۳ | -۰/۱۰۷ |
| idaho_Srad(w/m2) | تابش خالص ورودی طول موج کوتاه | -۰/۶۸ | | کاهشی | -۰/۰۶۵ | -۰/۴۳۵ | -۰/۲۳۱ |
| idaho_tmax(C) | دمای حداکثر | ۱/۶۷ | + | افزایشی معنی دار | ۰/۰۴۳ | -۰/۰۲۸ | -۰/۱۲۰ |
| idaho_tmin(C) | دمای حداقل | ۲/۹۵ | ** | افزایشی معنی دار | ۰/۰۷۹ | ۰/۰۲۳ | -۰/۱۴۳ |
| water_bodies (ha) | مساحت سطوح آبی | -۱/۸۹ | + | کاهشی معنی دار | -۳۹۷۲/۷۲۷ | -۶۴۶۶/۴۹۰ | ۷۲۸/۵۶۹ |

$\alpha = ۰/۱$ سطح معنی داری $\alpha = ۰/۰۵$ سطح معنی داری $\alpha = ۰/۰۱$ سطح معنی داری $\alpha = ۰/۰۰۱$ سطح معنی داری

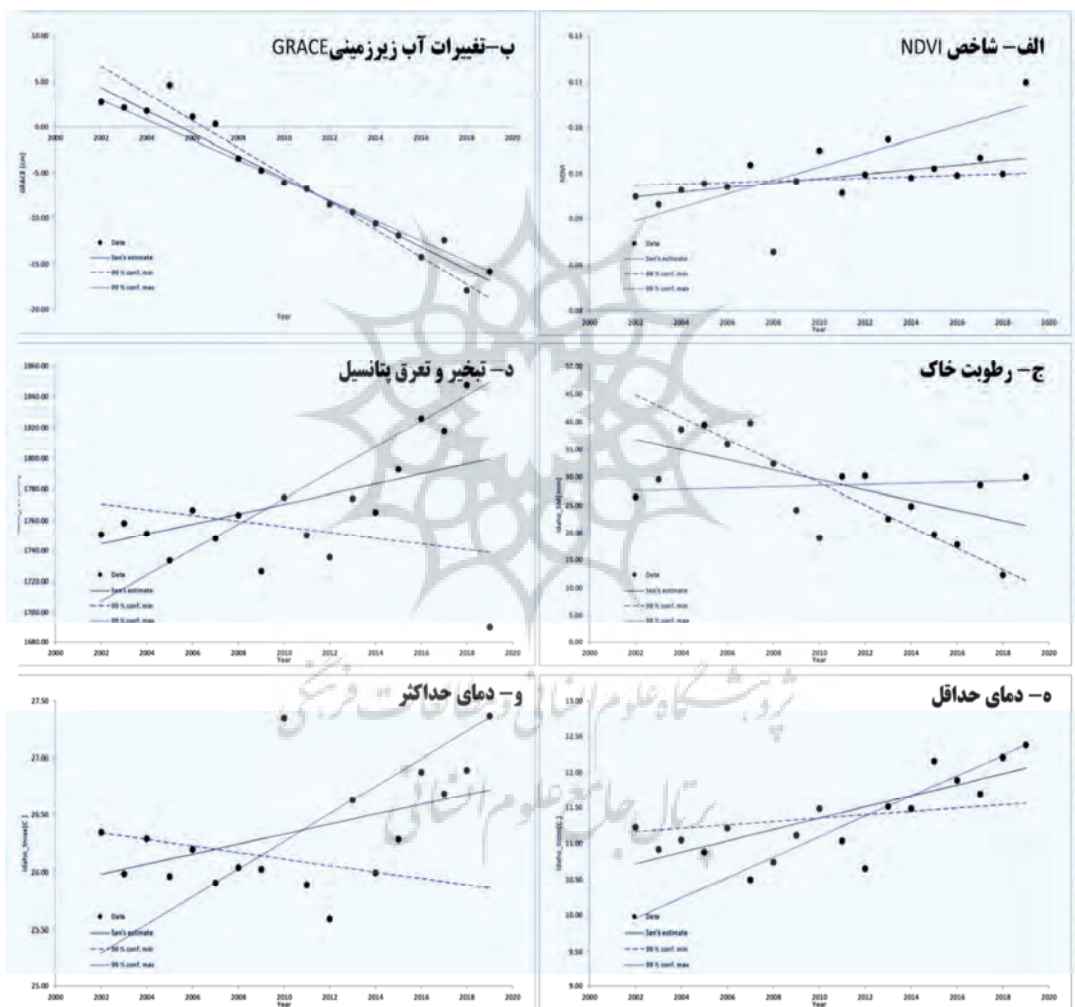
ایران، از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ است. با توجه به اینکه خط مبنای تغییرات سطح آب میانگین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ است، مقدارهای مثبت سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷، در این نمودار، بالاتر بودن سطح آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها را در قیاس با خط مبنا نشان می‌دهد و این روند همواره کاهشی بوده است. شکل ۳- ج به مقادیر رطوبت خاک اشاره می‌کند. بیشترین مقدار در سال ۲۰۰۷ و کمترین مقدار در سال ۲۰۱۸ ثبت شده است. روند کلی تغییرات رطوبت خاک کاهشی است. در شکل ۳- د، میزان تبخیر و تعرق سالیانه منطقه فلات مرکزی ایران نشان داده شده است. طبق این نمودار، روند کلی افزایشی است و این روند، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹، با شیب بیشتری افزایش یافته است. کمترین مقدار در سال ۲۰۰۹ و بیشترین مقدار در سال ۲۰۱۹ رخ داده است. شکل‌های ۳- ه و شکل ۳- و نیز به روند تغییرات سالیانه متوسط حداقل و حداکثر دمای سالیانه اشاره دارند. در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹، بیشترین مقدار دمای حداکثر ثبت شده و بیشترین مقدار دمای حداقل نیز در سال ۲۰۱۹ به ثبت رسیده است.

با توجه به جدول ۲ و نتایج، تغییرات گرانش زمین که بیانگر سطح آب زیرزمینی است (محصول GRACE) و همچنین مساحت سطوح آبی (محصول ماهواره مادیس) که بیانگر مساحت پیکره‌های آبی است و رطوبت خاک، روندی کاهشی و معنی دار در سطوح گوناگون را نشان می‌دهد. از سویی، دمای حداکثر و دمای حداقل و تبخیر و تعرق پتانسیل (محصول دانشگاه آیداهو) و شاخص NDVI که بیانگر درصد پوشش گیاهی در منطقه فلات مرکزی است، دارای روند افزایشی معنی دارند. در ادامه، روند تغییرات محصولات یادشده به صورت نموداری آورده شده است. سایر محصولات ماهواره‌ای به کاررفته در این پژوهش دارای روند افزایشی، کاهشی یا خنثای غیرمعنی دارند. در شکل ۳- الف، روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، حداکثر مقدار NDVI در سال ۲۰۱۹ و حداقل مقدار آن در سال ۲۰۰۸ اتفاق افتاده است. اگرچه مقدار این شاخص، در طول بازه زمانی مورد مطالعه نوسان داشته، روند کلی آن افزایشی است. شکل ۳- ب بیانگر روند کاهشی ذخایر آب در منطقه فلات مرکزی

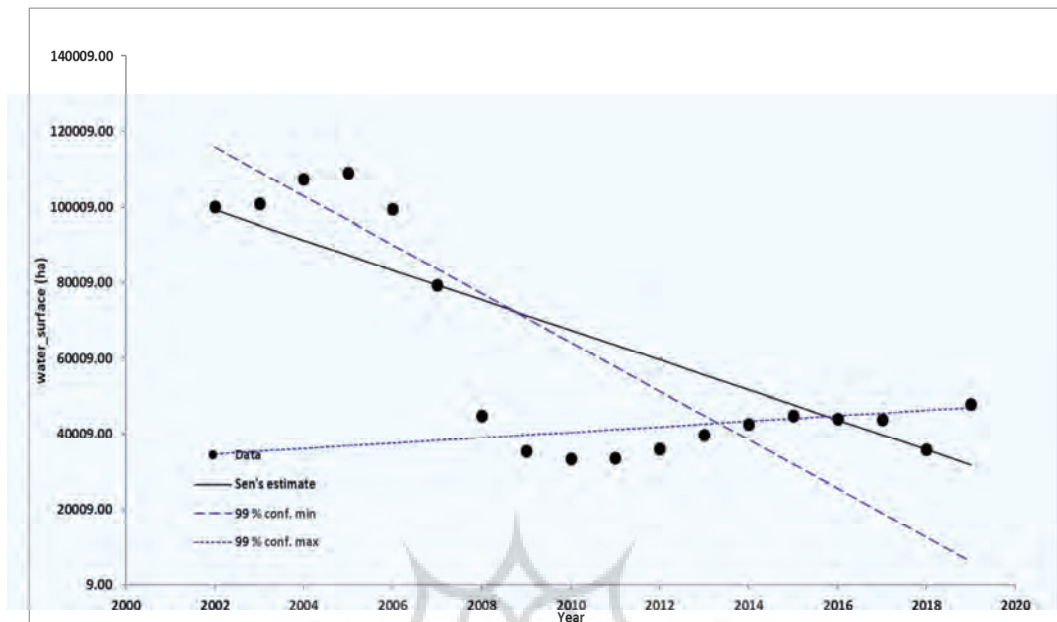
تحلیل روند تغییرات منابع آب و عوامل مؤثر در آن ...

در شکل‌های ۵ و ۶، ضریب همبستگی بین پارامترهایی مشخص شده است که دارای روند افزایشی یا کاهش‌ی معنی‌دارند.

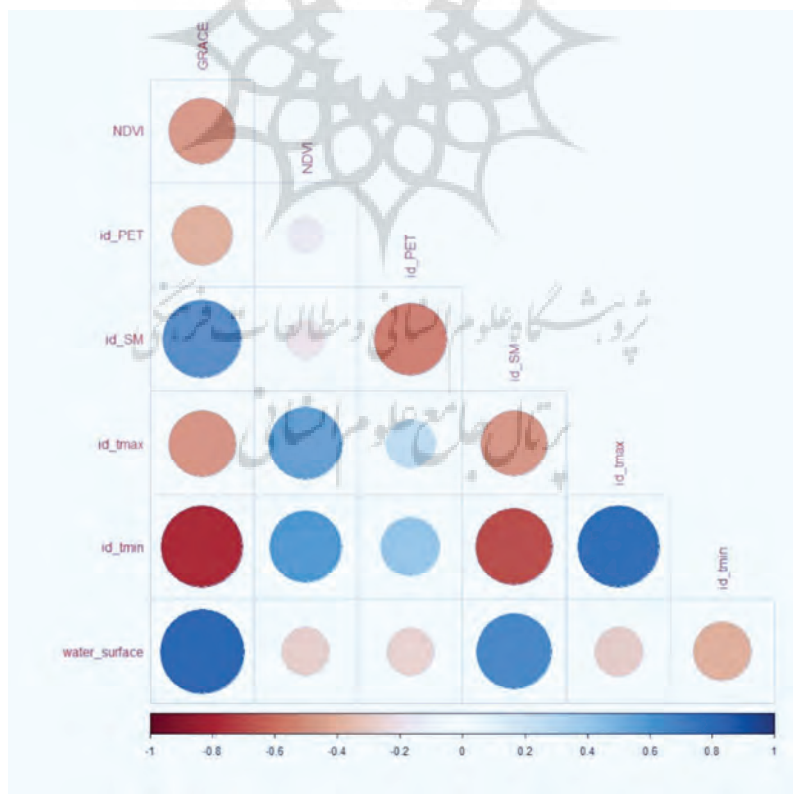
شکل ۴ روند تغییرات مساحت پیکره‌های آبی برحسب هکتار را نشان می‌دهد. بیشترین مساحت در سال ۲۰۰۵ و کمترین آن در سال ۲۰۱۸ به ثبت رسیده و بیشترین شیب کاهش بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ رخ داده است.



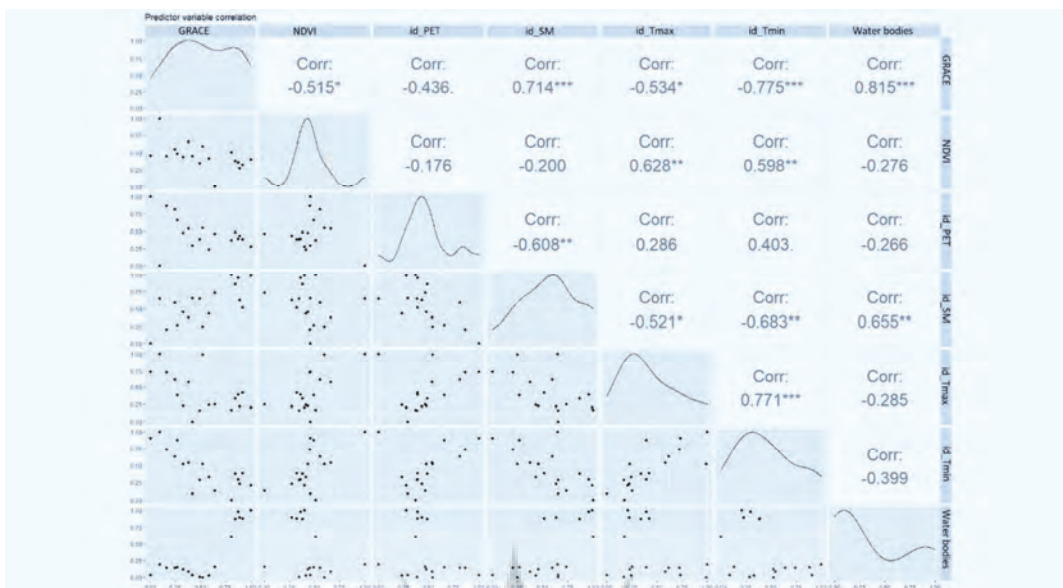
شکل ۱۳. روند تغییرات سالیانه پارامترهای دارای روند افزایشی یا کاهش‌ی معنی‌دار؛ شامل شاخص NDVI، محصول GRACE، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق پتانسیل، دمای حداقل و دمای حداکثر



شکل ۱۴. روند تغییرات سالیانه مساحت پیکره‌های آبی (روند خطی بر مبنای آزمون من-کندال ترسیم شده است)



شکل ۱۵. ضریب همبستگی بین پارامترهای دارای روند معنی‌دار که در این پژوهش به کار رفته‌اند (id مخفف دانشگاه آیداهو است)



شکل ۱۶. ضریب همبستگی بین پارامترهای دارای روند معنی‌دار و نمودار تغییرات این داده‌ها (نمودارهای خطی بیانگر تغییرات سالیانه هر پارامتر و نمودارهای نقطه‌ای ScatterPlot بین جفت پارامترهاست)

(*** سطح معنی‌داری $\alpha = 0/001$ ** سطح معنی‌داری $\alpha = 0/01$ * سطح معنی‌داری $\alpha = 0/05$)

۵- بحث و نتیجه‌گیری

پایش و اندازه‌گیری وضعیت منابع آب، به‌صورت مداوم، به تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در پیشگیری از وقوع بحران و مدیریت آن کمک شایانی می‌کند. دانش سنجش از دور و دسترسی به داده‌ها و محصولات متنوع ماهواره‌ای دارای قدرت تفکیک مکانی و زمانی گوناگون این ابزار را در اختیار تصمیم‌سازان قرار می‌دهد تا بتوانند از وضعیت منابع آب در هر زمان آگاهی یابند و از وقوع بحران پیشگیری کنند. ماهواره GRACE که محصولات آن از سال ۲۰۰۲ در اختیار کاربران قرار گرفته است، می‌تواند بیانگر وضعیت تغییرات منابع آب زیرزمینی باشد. همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی سنجنده‌هایی مانند لندست، سنتینل و مادیس، امکان تعیین مساحت سطوح و پهنه‌های آبی را به‌صورت سری زمانی، فراهم آورده است. با توجه به اهمیت موضوع و وجود محصولات ماهواره‌ای متعدد، در این پژوهش، روند تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی و همچنین پارامترهای محیطی تأثیرگذار در

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، همبستگی معنی‌دار مثبتی بین GRACE (به‌منزله نشانگری برای منابع آب زیرزمینی) و NDVI، رطوبت خاک (id_SM)، دمای حداکثر (id_tmax) و دمای حداقل (id_tmin) وجود دارد که بدین صورت است:

* افزایش شاخص NDVI باعث کاهش مقادیر GRACE با ضریب همبستگی $-0/515$ و سطح معنی‌داری $0/95$ می‌شود؛

* رطوبت خاک و GRACE با ضریب همبستگی $0/714$ و سطح معنی‌داری $0/999$ رابطه‌ای مستقیم دارند؛

* دمای حداقل و دمای حداکثر رابطه معکوس معنی‌داری با GRACE و با ضریب همبستگی دارد که به‌ترتیب معادل $-0/775$ و $-0/534$ است.

بررسی ضریب همبستگی بین مساحت سطوح آبی (water_surface) و پارامترهای گوناگون نیز نشان می‌دهد این پارامتر با GRACE (ضریب همبستگی $0/815$ و سطح معنی‌داری $0/999$) و رطوبت خاک (ضریب همبستگی $0/655$ و سطح معنی‌داری $0/99$) رابطه‌ای مستقیم دارد.

مظفری^۱ و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. این محققان تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی ایران را تحت سناریوهای تغییر اقلیم، با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند و نقشه‌های پهنه‌بندی SPI افزایش خشکسالی‌ها در بخش اعظم کشور را نشان دادند. قربانی^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهش خود، روند تغییرات زمانی- مکانی شاخص دومتغیره خشکسالی هواشناسی SPEI در ایران را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در مجموع، تغییرات اقلیمی در ایران رخ داده و ایران، در سال‌های اخیر، به سمت دوره‌های خشک‌تر متمایل بوده است.

بررسی ضریب همبستگی بین مساحت پیکره‌های آبی و پارامترهای گوناگون نیز نشان داد که این پارامتر با GRACE و رطوبت خاک رابطه‌ای مستقیم دارد؛ یعنی هرچه میزان منابع آب سطحی بیشتر باشد، میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی و در نتیجه، میزان افت این آب‌ها کاهش می‌یابد و مقادیر ثبت‌شده از طریق ماهواره GRACE نیز افزایش خواهد یافت. افزایش رطوبت خاک نیز نشانه ترسالی است و میزان نفوذ رواناب به داخل زمین را کاهش می‌دهد که این وضعیت می‌تواند به افزایش مساحت پهنه‌های آبی منجر شود.

سیاست‌های کلان کشور در زمینه تأمین امنیت غذایی و نیز افزایش جمعیت کشور در دو دهه گذشته و به تبع آن، افزایش نیاز به غذا باعث افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در فلات مرکزی ایران شده است. افزایش معنی‌دار روند شاخص NDVI را نیز می‌توان در همین راستا تفسیر کرد. از طرفی، تغییرات اقلیمی و کاهش بارش و افزایش دما و تبخیر و تعرق در فلات مرکزی باعث کاهش منابع آب در دسترس در این مناطق شده است. روند افزایشی دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر و تعرق در این پژوهش نیز معنی‌دار می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با تغییرات

منابع آب مطالعه شد. بدین منظور، با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، شانزده محصول متفاوت ماهواره‌ای شامل پارامترهای محیطی گوناگون مانند بارش، دما، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، رواناب، گرانش (GRACE)، شاخص پوشش گیاهی و مساحت سطوح آبی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، دریافت و آماده‌سازی شد. سپس با استفاده از آزمون ناپارامتریک من- کندال و تخمین گر شیب سن، روند تغییرات این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، تغییرات گرانش زمین که بیانگر سطح آب زیرزمینی است و نیز مساحت پیکره‌های آبی که منابع آب سطحی را نشان می‌دهد و رطوبت خاک، حاکی از روندی کاهشی و معنی‌دار بود. از سویی، دمای حداکثر، دمای حداقل و تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص NDVI دارای روند افزایشی معنی‌دار بود.

نتایج بررسی میزان همبستگی بین پارامترهای دارای روند معنی‌دار نیز نشان می‌دهد بین GRACE (به‌منزله نشانگری برای منابع آب زیرزمینی) و NDVI، رطوبت خاک، دمای حداکثر و دمای حداقل همبستگی معنی‌دار مثبتی وجود دارد. افزایش شاخص NDVI باعث کاهش مقادیر GRACE می‌شود. بدیهی است که افزایش سطح پوشش گیاهی، به‌ویژه محصولات کشاورزی، در شرایطی که روند منابع آب سطحی کاهشی است (شکل ۴)، فشار بر برداشت منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد و باعث شدیدشدن کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود. دمای حداقل و حداکثر نیز رابطه معکوس معنی‌داری با GRACE دارند. افزایش دما می‌تواند باعث افزایش تبخیر و تعرق و به تبع آن، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شود. افزون بر اینها نتایج به وجود رابطه مستقیم میان رطوبت خاک و GRACE اشاره می‌کند. در واقع، هرچه میزان رطوبت خاک بیشتر باشد، نشان واضح‌تری از ترسالی و افزایش سطح منابع آب زیرزمینی است. نتایج، در زمینه تغییرات اقلیمی و افزایش روند خشکسالی در کشور، با نتایج پژوهش

1. Mozafari
2. Ghorbani

- Water Resources Using Gravimetry Satellite Data**, Journal of Geomatics Science and Technology., 5, PP. 73-84.
https://www.sid.ir/fa/VEWSSID/J_pdf/7002413950407.pdf
- Center for Development and Foresight Research, 2021, **Studies of the National Spatial Planning Document (Water Report and Consolidated Report of Studies)**, In: Tehran: Center for Development and Foresight Research, Plan and Budget Organization.
- Chambers, D.P., 2006, **Evaluation of New GRACE Time-Variable Gravity Data over the Ocean**, Geophysical Research Letters, 33.
<https://doi.org/10.1029/2006GL027296>
- Climatology Research Institute, 2016, **Revealing, Evaluating the Effects and Prospects of Climate Change in Iran during the 21st Century**, In: Iran Meteorological Organization.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. & Puma, M.J., 2017, **Groundwater Depletion Embedded in International Food Trade**, Nature, 543, PP. 700-704.
<https://doi.org/10.1038/nature21403>
- Deng, Y., Jiang, W., Tang, Z., Ling, Z. & Wu, Z., 2019, **Long-Term Changes of Open-Surface Water Bodies in the Yangtze River Basin Based on the Google Earth Engine Cloud Platform**, Remote Sensing, 11, P. 2213.
<https://doi.org/10.3390/rs11192213>
- Didan, K., 2021, **MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]**, NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061;2021>
- Ebrahimi Khusfi, M., Rahmatnia, A. & Sameni, A., 2016, **Water Crisis and the Feasibility of Connecting the Northern and Southern Water Regions of Iran**, In: Development and Foresight Research Center, Plan and Budget Organization.
- Ebrahimi Khusfi, Z., Nafarzadegan, A.R., Kazemi, M. & Ebrahimi Khusfi, M., 2022, **Influential Environmental Drivers on Air Pollution in Dust-Sensitive Regions of**
- اقلیمی صورت گرفته، منابع آب سطحی در دسترس کاهش یافته است که این مهم با معنی داری روند کاهشی بارش، مساحت پیکره‌های آبی و رطوبت خاک مورد تایید قرار می‌گیرد. از طرفی، افزایش سطح زیرکشت (افزایش NDVI) به منابع آب نیاز داشته که این نیاز، با برداشت‌های بی‌رویه و بیش‌از ظرفیت تجدیدپذیر سالیانه از منابع آب زیرزمینی، رفع شده و نتیجه آن کاهش و افت سطح آب‌های زیرزمینی بوده است. این کاهش سطح نیز با معنی داری روند کاهشی محصول ماهواره GRACE تایید می‌شود.
- روند کاهشی مساحت پیکره‌های آبی در ایران با مطالعات طاهری دهکردی و همکاران (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران، با بررسی روند تغییرات زمانی- مکانی آب‌های سطحی ایران از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱، به این نتیجه رسیدند که منابع آب‌های سطحی در تمامی حوضه‌های آبریز اصلی ایران، به‌جز حوضه آبریز خلیج فارس، روند کاهشی دارد.
- با توجه به وسعت کشور ایران و دسترسی سخت به داده‌ها و آمار و اطلاعات زمینی، پیشنهاد می‌شود روند تغییرات مساحت پیکره‌های آبی و منابع آب زیرزمینی، در سایر حوضه‌های آبریز اصلی کشور، نیز مطالعه و بررسی شود و در مناطقی که امکان بیشتری برای دسترسی به آمار و اطلاعات زمینی وجود دارد، دقت محصولات ماهواره‌ای نیز ارزیابی شود.

۶- منابع

- Afzali, R., Zaki, Y., Kaviani Rad, M. & Mohammadkhani, E., 2020, **A Comparative Study of Climate Change and Security Challenges of Water Crisis in Cities of Urmia Lake and Central Iran Basins**, Journal of Urban Social Geography, 7, PP. 167-189.
<https://dori.net/dor/20.1001.1.26457784.1399.7.1.9.5>
- Ashrafzadehafshar, A., Joodaki, G. & Sharifi, M.-A., 2016, **Evaluation of Iran's Underground**

- Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 15, PP. 1-14.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10602-8>
- Eftekhari, M., Madadi, K. & Akbari, M., 2019, **Monitoring the Fluctuations of the Birjand Plain Aquifer Using the GRACE Satellite Images and the GIS Spatial Analyses**, *Watershed Management Research Journal*, 32, PP. 51-65.
<https://doi.org/10.22092/wmej.2019.126204.1218>
- Faraji, Z., Kaviani, A. & Ashrafzadeh, A., 2017, **Assessment of GRACE Satellite Data for Estimating the Groundwater Level Changes in Qazvin Province**, *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4, PP. 463-476.
<https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>
- Farzaneh, S., Shahhoseini, R. & Kordpour, I., 2021, **Combining Satellite-Based Gravity Data and Information Received from Ground Stations to Provide an Efficient Index for Drought Monitoring in Iran**, *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30, PP. 7-17.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244447>
- Fay, M., Andres, L.A., Fox, C., Narloch, U. & Slawson, M., 2017, **Rethinking Infrastructure in Latin America and the Caribbean: Spending Better to Achieve More**, World Bank Publications.
<http://hdl.handle.net/10986/27615>
- Friedl, M. & MCD12Q1, S.-M.D., 2006. **MODIS, Terra+ Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global**, 500.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L. & Hoell, A., 2015, **The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A New Environmental Record for Monitoring Extremes**, *Scientific Data*, 2, PP. 1-21.
<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, L., Rodríguez, D., Wijnen, M. & Pakulski, I., 2016, **Earth Observation for Water Resources Management: Current Use and Future Opportunities for the Water Sector**, World Bank Publications.
<http://documents.worldbank.org/curated/en/783571468196447976/Earth-observation-for-water-resources-management-current-use-and-future-opportunities-for-the-water-sector>
- Ghorbani, K., Bararkhan Poor, S., Valizadeh, E. & Molaarazi, A.J., 2020, **Regional Analysis of Trend and Change Point in Seasonal Series of SPEI Drought Index in Iran**, *Journal of Water and Soil Conservation*, 27, PP. 185-200.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16525.3178>
- Hafezparast, M., 2021, **Monitoring Groundwater Level Changes of Mianrahan Aquifer with GRACE Satellite Data**, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15, PP. 428-443.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.2.16.8>
- Hejazizadeh, Z., Naserzadeh, M., Hatamizarneh, D. & Rezaei, M., 2014, **The Application of Statistical Methods and Drought Indices in the Analysis of Precipitation Fluctuations, A Case Study: Kerman Station**, *Geographical Studies of Arid Regions*, 5, PP. 35-51.
https://jargs.hsu.ac.ir/article_161366.html?lang=en
- Hering, J., 2014, **A Virtual Flood of Information: Open Data for Sustainable Water Management**.
<https://futureearth.org/2014/08/27/a-virtual-flood-of-information-open-data-for-sustainable-water-management>
- Huffman, G., Stocker, E., Bolvin, D., Nelkin, E. & Tan, J., 2019, **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**, In: Accessed 2019-10-08. doi: 10.5067/GPM/IMERG/3BMONTH/06.
- Imani, R., Ghazavi, R. & Esmaili, A., 2021, **Investigating the Trend, Analysis, Modeling and Prediction of Monthly Rainfall Using Stochastic Models (Case Study of Ardabil Station)**, *Geographical Studies Of Arid Regions*, 11, PP. 84-98.
<https://www.researchgate.net/publication/373707178>

- Issazadeh, V. & Argany, M., 2021, **Changes in Water Surface of Aquifers Using GRACE Satellite Data in the Google Earth Engine: A Study of the Urmia Lake Watershed From 2002 to 2017**, *Town & Country Planning (2008-7047)*, 13, PP. 193-214.
DOI: 10.22059/jtcp.2020.304748.670127
- Jones, J., 2009, **Threats to Global Water Security: Population Growth, Terrorism, Climate Change, or Commercialisation?**, *Threats to Global Water Security* (PP. 3-13), Springer.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-2344-5_1
- Karami, S., 2021, **Investigating the Consequences and Methods of Climate Change Management (Case Example: Iran's Central Watershed)**, *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 20, PP. 19-37.
<http://dx.doi.org/10.29252/jgs.20.59.19>
- Kavianirad, M., Karimi Pour, Y., Fahmi, H. & Karami, S., 2017, **Explanation of Security Sequences of Climate Change (Case Study: Iran's Central Drainage Basin)**, *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 17, PP. 73-92.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1396.17.46.4.4>
- Kendall, M., 1975, **Rank Correlation Measures**, Vol. 202, Charles Griffin, London.
- Landerer, F.W. & Swenson, S., 2012, **Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates**, *Water Resources Research*, 48.
<https://doi.org/10.1029/2011WR011453>.
- Lettenmaier, D.P., Alsdorf, D., Dozier, J., Huffman, G.J., Pan, M. & Wood, E.F., 2015, **Inroads of Remote Sensing into Hydrologic Science during the WRR Era**, *Water Resources Research*, 51, PP. 7309-7342.
<https://doi.org/10.1002/2015WR017616>
- Lorenz, C. & Kunstmann, H., 2012, **The Hydrological Cycle in Three State-of-the-Art Reanalyses: Intercomparison and Performance Analysis**, *Journal of Hydrometeorology*, 13, PP. 1397-1420.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-088.1>
- Mann, H.B., 1945, **Nonparametric Tests against Trend**, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, PP. 245-259.
<https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mazidi, A. & Bahaaddinbeygi, H., 2021, **Study of Temperature, Precipitation and Wind Speed Trends in the Northern and Western Regions of Kerman Province Using Parametric and Non-Parametric Tests**, *Geography and Human Relationships*, 4, PP. 246-254.
<https://doi.org/10.22034/gahr.2021.296784.1587>
- McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N.E. & Franz, T.E., 2017, **The Future of Earth Observation in Hydrology**, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, PP. 3879-3914.
<https://hess.copernicus.org/articles/21/3879/2017>
- Mostafazadeh, R. & Zabihi, M., 2016, **Comparison of SPI and SPEI Indices to Meteorological Drought Assessment Using R Programming (Case Study: Kurdistan Province)**, *Journal of the Earth and Space Physics*, 42, PP. 633-643.
<https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.57881>
- Mozafari, E., Bazrafshan, O., & Moradi, N. (2021). **Spatio-Temporal Variability of Characteristics of Meteorological Drought in Iran under Climate Change Scenarios**. *Desert Management*, 16, 153-168.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.24763985.1399.8.16.10.0>
- Nemati, A., Ghoreishi Najafabadi, S.H., Joodaki, G. & Mousavi Nadoushni, S.S., 2019, **Evaluation of Agricultural Drought Characteristics in Iran's Central Plateau Catchment Using GRACE Satellite**, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50, PP. 313-327.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.251136.667840>
- Omidvar, K. & Salari, H., 2013, **Studying the Trend of Heat and Precipitation Changes in the West and Northwest of Iran Using Parametric and Non-Parametric Methods**, *Geography (scientific-research quarterly of*

- the Iranian Geography Association), 11, PP. 271-288.
<https://sid.ir/paper/150411/fa>
- Pouyan, S., Bordbar, M., Ravichandran, V., Tiefenbacher, J.P. & Pourghasemi, H.R., 2022, **Spatio-Temporal Monitoring of Droughts in Iran Using Remote-Sensing Indices**, *Natural Hazards*, 117, PP. 1-24.
<https://doi.org/10.1007/s11069-023-05847-9>
- Research Center of the Islamic Council, O.o.I.S., 2016, **Investigation of the Water Crisis and Its Consequences in Iran**, In Tehran: Research Center of the Islamic Council, Office of Infrastructure Studies.
- Salmi, T., 2002, **Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates-the Excel Template Application MAKESENS**, *Ilmatieteen laitos*.
https://www.researchgate.net/publication/259356944_Detecting_Trends_of_Annual_Value_s_of_Atmospheric_Pollutants_by_the_Mann-Kendall_Test_and_Sen's_Solpe_Estimates_the_Excel_Template_Application_MAKESENS
- Serinaldi, F. & Kilsby, C.G., 2017, **A Blueprint for Full Collective Flood Risk Estimation: Demonstration for European River Flooding**, *Risk Analysis*, 37, PP. 1958-1976.
<https://doi.org/10.1111/risa.12747>
- Seyed Mousavi, S.M. & Akhoondzadeh Hanzaei, M., 2022, **Monitoring and Prediction of the Changes in Water Zone of Wetlands Using an Intelligent Neural-Fuzzy System Based on Data from Google Earth Engine System (Case Study of Anzali Wetland, 2000-2019)**, *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 9, PP. 19-42.
<http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-850-en.html>
- Sheffield, J., Wood, E.F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A. & Verbist, K., 2018, **Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions**, *Water Resources Research*, 54, PP. 9724-9758.
<https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Soleimani Sardoo, F. & Azareh, A., 2021, **Evaluation of Groundwater Level Fluctuations in Jiroft Plain Using GRACE Satellite Images**, *Environmental Erosion Research Journal*, 10, PP. 58-73.
<http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-596-en.html>
- Srivastava, A. & Saran, S., 2017, **Comprehensive Study on AOD Trends over the Indian Subcontinent: A Statistical Approach**, *International Journal of Remote Sensing*, 38, PP. 5127-5149.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1323284>
- Swenson, S., 2012, **GRACE Monthly Land Water Mass Grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0**, PO. DAAC.
- Taheri Dehkordi, A., Valadan Zoej, M.J., Ghasemi, H., Jafari, M. & Mehran, A., 2022, **Monitoring Long-Term Spatiotemporal Changes in Iran Surface Waters Using Landsat Imagery**, *Remote Sensing*, 14, P. 4491.
<https://doi.org/10.3390/rs14184491>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S. & Brisco, B., 2020, **Google Earth Engine for Geo-Big Data Applications: A Meta-Analysis and Systematic Review**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, PP. 152-170.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- United Nations, 2016, **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**.
<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>
- Van Dijk, A. & Renzullo, L.J., 2011, **Water Resource Monitoring Systems and the Role of Satellite Observations**, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, PP. 39-55.
<http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-39-2011>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. & López-Moreno, J.I., 2010, **A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspira-**

- tion Index**, Journal of Climate, 23, PP. 1696-1718.
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Walker, S., 2000, **The Value of Hydrometric Information in Water Resources Management and Flood Control**, Meteorological Applications, 7, PP. 387-397.
<https://doi.org/10.1017/S1350482700001626>
- Wan, Z., Hook, S. & Hulley, G., 2015, **MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity8-Day L3 Global 1 Km SIN Grid V006; Distributed by NASA EOSDIS LP DAAC**, USGS, Sioux Falls.
- Zabihi, M., Mostafazadeh, R. & Sharari, M., 2017, **Analysis of Wet and Dry Spells Intensity and Duration Using Precipitation-Based and Evapotranspiration Influenced Indices**, Journal of Watershed Management Research, 8, PP. 125-136.
<https://www.researchgate.net/publication/319913570>
- Zhang, Y., Pan, M. & Wood, E.F., 2016, **On Creating Global Gridded Terrestrial Water Budget Estimates from Satellite Remote Sensing**, Remote Sensing and Water Resources (PP. 59-78), Springer.
https://citations.springernature.com/item?doi=10.1007/978-3-319-32449-4_4

شعبه پژوهش‌های علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



سجش از دور

,

ایران GIS



سنجش از دور و GIS ایران سال پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲
Vol.15, No. 4, Winter 2023 Iranian Remote Sensing & GIS

41-60

An analysis of the Trend Changes in Water Resources and Factors Affecting it in the Central Plateau of Iran Using Satellite Products

Ebrahimi Khusfi M.^{1*} and Ebrahimi Khusfi Z.²

1. Assistant prof. in Remote Sensing, Dep. of Geography, Yazd University, Yazd
2. Associate Prof., Dep. of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft

Abstract

The Central Plateau of Iran, due to climate changes and the reduction of available water resources on one hand, and the increase in population and the consequent increase in demand on the other hand, is facing a severe water crisis. The science of remote sensing and the availability of numerous satellite products have made it possible to monitor the process of changes in various environmental parameters, especially surface and underground water sources, with appropriate accuracy. For this purpose, using the Google Earth Engine system, 16 different satellite products including different environmental parameters such as precipitation, temperature, evaporation and transpiration, soil moisture, runoff, total water storage (GRACE), vegetation cover index and water surface area were received and prepared for the time period 2000-2022. Then, using the non-parametric Mann-Kendall test and the Sen's slope estimator, the change trend of these parameters was investigated. According to the results, the changes in earth's gravity, which indicates the level of underground water, as well as the area of water surfaces, which indicates surface water resources, and soil moisture, showed a significant decreasing trend. On the other hand, maximum temperature, minimum temperature, potential evaporation and transpiration and NDVI index have a significant increasing trend. Despite the decrease in water surface area, the vegetation cover index has increased, which indicates the increase in the area under cultivation of agricultural products and excessive harvesting of underground water resources, which is also confirmed by the decreasing trend of the GRACE satellite product. The correlation coefficients between parameters with significant trends also showed that there is a significant correlation between GRACE and NDVI parameters, minimum temperature, maximum temperature, soil moisture and area of surface water bodies.

Keywords: Remote sensing, Changes trend, Google Earth Engine, Surface water resources, Underground water resources, Water bodies.

* Correspondence Address: No. 215 ,Emamat Blvd., Yazd University, Safaeie, Yazd. Tel: 09123804637-03531233894

Email: Mohsen.ebrahimi@yazd.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0002-2756-0388>

<https://doi.org/10.48308/gisj.2022.102889>

