

Investigating of Floods Monitoring Using GRACE and TRMM Observations in the West and South West of Iran

A. Feizollahi¹ and E. Javadnia^{2*}

Abstract

Floods have many negative economic, social, and environmental impacts. The occurrence of this phenomenon in the West and South West of Iran has caused many challenges for the region and its communities. Investigating the flood monitoring parameters plays a key role in reducing the problems in the area. One of the most important hydrological parameters affecting this phenomenon is the the Total Water Storage (TWS). The purpose of this study is to use the GRACE and GRACE FO TWS time series data, as well as TRMM (The Tropical Rainfall Measuring Mission) rainfall time series, to extract the flood potential index (FPI). FPI is used to check the occurrence of floods in the study area. The geographical area investigated in this research was between 45°-49°N and 30°-35°E, which includes most of the West and South West parts of Iran. The studied time period was from 2002 to the end of 2019. The TWS anomaly extracted from the data of the GRACE satellites was validated using the water balance equation and TRMM satellite precipitation data, MODIS evapotranspiration data, and GLDAS hydrological model runoff data. The results obtained for GRACE and FO GRACE satellites yielded RMSE values of 0.034 and 0.051 meters, respectively. Then, in order to predict the possibility of floods, the process of determining the Flood Potential Amount (FPA) was run using the the GRACE/GRACE FO TWS data and the TRMM rainfall data between 2002 and the end of 2019. Finally, the obtained FPA was used to determine the FPI. The results showed that the FPI index is able to detect many floods that occurred in the studied area.

Keywords: Ground Water Storage, GRACE, Precipitation, Flood Potential Index.

Received: November 13, 2022

Accepted: March 25, 2023

بررسی پایش سیل با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های GRACE و TRMM در منطقه غرب و جنوب غربی ایران

ابوذر فیض‌الهی^۱ و اسلام جوادنیا^{۲*}

چکیده

سیل دارای تأثیرات مخرب اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی زیادی است. وقوع این پدیده در غرب و جنوب غرب کشور ایران باعث ایجاد چالش‌های زیادی برای منطقه و مردم آن شده است. بررسی پایش پارامترهای مؤثر بر این پدیده نقش کلیدی در کاهش مشکلات ناشی از آن دارد. یک از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولوژیکی مؤثر بر این پدیده مقدار ذخیره کلی آب زمینی Total Water Storage (TWS) است. هدف از این مقاله به‌کارگیری داده‌های مربوط به سری زمانی TWS ماهواره‌های GRACE و GRACE FO و همچنین سری زمانی داده‌های بارش به‌دست‌آمده از ماهواره TRMM (The Tropical Rainfall Measuring Mission) برای استخراج شاخص پتانسیل سیل Flood Potential Index (FPI) برای بررسی وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه است. محدوده مکانی مورد بررسی در این تحقیق در حدفاصل ۴۵-۴۹ درجه طول جغرافیایی و ۳۰-۳۵ درجه عرض جغرافیایی است که بسیاری از مناطق غرب و جنوب غربی کشور ایران را دربر می‌گیرد و دوره زمانی مورد مطالعه از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹ است. در این تحقیق ابتدا آنومالی TWS استخراج‌شده از داده‌های جفت ماهواره‌های GRACE به کمک معادله توازن آب و داده‌های بارشی ماهواره TRMM، داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS و داده‌های رواناب مدل هیدرولوژی GLDAS اعتبارسنجی شدند. نتایج به‌دست‌آمده برای ماهواره‌های GRACE FO و GRACE به ترتیب مقادیر RMSE، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۱ متر را به دست دادند. سپس به‌منظور پیش‌بینی امکان وقوع سیلاب، فرآیند تعیین مقدار پتانسیل سیل Flood Potential Amount (FPA) با استفاده از داده‌های TWS ماهواره‌های GRACE FO، GRACE و داده‌های بارشی ماهواره TRMM در بین سال‌های ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹ انجام شد. در نهایت از FPA به‌دست‌آمده برای تعیین FPI استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شاخص FPI قادر به تشخیص بسیاری از سیل‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه است.

کلمات کلیدی: ذخیره آب زمینی، GRACE، بارش، شاخص پتانسیل سیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۵

1- M.Sc. Graduate of Surveying-Geodesy Engineering, Department of Surveying Engineering, College of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, College of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: javadnia@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.1.1.6](https://doi.org/10.17352347.1402.19.1.1.6)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری-ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



است که از جمله آن می توان به مطالعه Farokhnia and Morid (2014) اشاره نمود.

به علت اینکه مشخصه های سیل در وسعت کم و بازه زمانی محدود به سختی قابل اندازه گیری و مشاهده هستند، در حال حاضر یک شاخص مدون و مؤثر جهانی برای پایش و بررسی و پیش بینی سیلاب طراحی نشده است (Sun et al., 2017). دانشمندان در سال ۲۰۰۹ با توسعه پارامتری به نام شاخص پتانسیل سیل (FPI^4) به کمیته عددی برای به دست آوردن ظرفیت آب زمینی دست یافتند و به اهمیت داده های موجود در اطلاعات ماهواره GRACE در ارتباط با سیل های منطقه ای پی بردند (Reager and Famiglietti, 2009). این شاخص از تفاوت بین بارش و TWS به دست آمده از GRACE برای مطالعه پتانسیل سیل استفاده می کند. پتانسیل سیل به عنوان مقدار آب مازاد بر ذخیره بالقوه شناخته می شود.

مطالعات گوناگونی از شاخص FPI برای بررسی ویژگی های متفاوت سیل در نقاط مختلف دنیا استفاده کرده اند. (Long et al., 2015) سیل را با استفاده از FPI در فلات Yun-Gui مورد بررسی قرار داده و ثابت کردند که استفاده از آن هم در ارزیابی سیل و هم در قابلیت های پیش بینی سیل می تواند بسیار مفید باشد. (Molodtsova et al., 2016)، بازدهی و راندمان شاخص FPI در قاره آمریکا را با استفاده از مشاهدات چندساله داده های سیلاب بررسی کرده و همبستگی خوبی بین FPI و داده های مشاهده شده سیلابی را گزارش دادند. (Sun et al., 2017) با استفاده از داده های ماهواره ای GRACE و داده های ماهواره TRMM⁵ و سنجنده MODIS و نیز داده های زمینی ایستگاه های پایش رواناب سطحی در حوضه آبریز رودخانه YRB چین در بین سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج به دست آمده برای همبستگی بین TWS و بارش TRMM دارای R برابر با ۰/۶۲ بوده است و میزان تغییرات TWS به دست آمده از ایستگاه های زمینی و ماهواره ای منطقه مورد مطالعه دارای ضریب همبستگی ۰/۷۳ است. داده های TWS ماهواره های GRACE و GRACE FO به منظور پایش سیل های مهیب در استان هنان کشور چین در خلال سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که این داده ها در بررسی و پایش آنی سیل در مناطق کم وسعت نسبت به داده های ITSG-Grace 2018 از کیفیت و دقت بالاتری بهره می برند (Xiao et al., 2021). مطالعه بر روی حوضه رودخانه یانگ تسه چین توسط Yang et al. (2022) با استفاده از داده های TWS ماهواره GRACE و به منظور تولید شاخص پتانسیل سیل در بین سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ انجام شد و نتایج آن با یافته های

بدون تردید سیل یکی از فاجعه بارترین حادثه های طبیعی است. هر چند در نگاه اول، ابعاد حوادثی از قبیل زلزله و یا آتش فشان، وسیع تر از حوادث طبیعی دیگر به نظر می آید ولی آمارها حاکی از آن است که سیلاب چه از نظر تلفات جانی و چه از نظر تلفات مالی مخرب ترین حادثه در میان حوادث طبیعی است (Ahmadzadeh et al., 2015). این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک مانند کشور ایران به دلیل پراکندگی نامناسب زمانی و مکانی بارشی، علاوه بر ایجاد سیلاب های مخرب و وارد آمدن خسارات جانی و مالی فراوان، موجب هدررفت آب های سطحی نیز می شود (Ahmadzadeh et al., 2015). مطالعه، پایش و پیش بینی رفتار این پدیده نقش مهم و بسزایی در کاهش میزان خسارات ناشی از آن دارد (Azari et al., 2010). هشدار و پیش بینی سیلاب می تواند به عنوان یکی از مؤثرترین روش های مدیریت غیرسازه ای سیلاب در کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیلاب مطرح شود (Ghasemi et al., 2013). این امر با رفتارشناسی و پایش این پدیده و استفاده از ابزارهای مدرن فضایی امروزی که دارای پوشش جهانی و سری های متوالی زمانی هستند امکان پذیر است، ابزارهایی که هزینه ها تحمیلی را به شدت کاهش داده است و دارای پیچیدگی کمتر و سهولت کاربری بیشتری نسبت به ابزارهای زمینی است و استفاده از آن ها منطقی و مقرون به صرفه است (Rahman and Di, 2017). از پارامترهای مؤثر بر این پدیده اقلیمی ذخیره کلی آب زمینی (TWS^1) است که به میزان مجموع آب های موجود در سطح زمین (شامل رودخانه ها و دریاچه ها و آب معادل برف)، در تمام مقاطع خاک و سفره های آبی گفته می شود (Long et al., 2015). این پارامتر با اثر قوی بر آب، انرژی و جریانات زیست شیمیایی نقش مهمی را در سیستم آب و هوایی زمین بازی می کند. این پارامتر با پردازش داده های ماهواره GRACE² به دست می آید. در سال ۲۰۰۲ و با پرتاب ماهواره GRACE و همچنین نسل بعدی آن GRACE FO³ در سال ۲۰۱۷ به فضا یکی از چالش های اساسی پیش روی دانشمندان در پایش ذخیره کلی آب و بررسی حوادث بی شمار هیدرولوژیکی با استفاده از روش های سنتی و بدون داده و یا بدون اطلاعات کافی از بین رفت. وظیفه این ماهواره تعیین دقیق میدان گرانش زمین با قدرت تفکیک مکانی صدها کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی ماهانه بود (Sun et al., 2017; Flechtner et al., 2014). این ماهواره امروزه تحولی شگرف در مطالعه آب های زمینی در خاک و یخ و اقیانوس و غیره ایجاد کرده است. توانایی ماهواره GRACE برای برآورد روند تغییرات آب زیرزمینی در مطالعات مختلفی تأیید شده

حاصل از بررسی میزان رطوبت خاک در بازه زمانی مورد مطالعه، مقایسه شدند. Zhang et al. (2023) مطالعه بر روی سیل با استفاده از داده‌های TWS ماهواره GRACE و داده‌های بارشی در خلال سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ را منتشر نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه با داده‌های مرکز پایش سیل دارتموث و مرکز داده‌های جهانی رواناب و گزارش‌های خبری و داده‌های پایگاه‌های اجتماعی مورد اعتبارسنجی و مقایسه قرار گرفت و نشان داد که این ماهواره ۸۱ درصد سیل‌های موجود در پایگاه داده مرکز پایش سیل دارتموث و ۸۷ درصد سیل‌های وقوع یافته و بسیاری از سیل‌های که در پایگاه داده مرکز پایش سیل دارتموث ثبت نشده‌اند را پوشش می‌دهد.

با وجود مطالعات مختلف صورت گرفته در کشورهای مختلف در خصوص استفاده از داده‌های GRACE برای استخراج شاخص پایش سیل در کشور ایران مطالعه قابل توجهی انجام نگرفته است. Hosseini-Moghari et al (2019) از داده‌های ماهواره GRACE در پایش خشک‌سالی در حوضه آبریز مرکزی کشور در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ استفاده نمود. در این مطالعه مشخص گردید که سالیانه میزان ۱۱/۰۴ میلی‌متر از آب این منطقه عمدتاً تحت تأثیر عوامل انسانی از دست می‌رود و نشان داد شاخص خشک‌سالی MDSI⁶ حاصل از پردازش داده‌های ماهواره GRACE نسبت به دیگر روش‌های ماهواره‌ای پیشین و همچنین روش‌های زمینی از دقت پایش منطقه‌ای بالایی برخوردار است. Rezvani Faezifar et al. (2022) در پژوهشی با عنوان امکان‌سنجی پیش‌بینی وقوع سیل با استفاده از داده‌های گرانشی ماهواره GRACE در حوضه آبریز رود کارون، به این نتیجه رسیدند که شاخص پتانسیل سیل به‌طور قطعی نمی‌تواند سیل را پیش‌بینی کند و نیاز به اطلاعات مکمل با استفاده از منابع و روش‌های دیگر برای پایش و پیش‌بینی سیلاب دارد.

بنابراین با توجه به نبود پایگاه‌های اطلاعاتی زمینی کافی و پراکندگی نامناسب پایگاه‌های جمع‌آوری اطلاعاتی موجود و نیز عدم دسترسی عمومی به داده‌های این پایگاه‌ها در ایران به نظر می‌رسد استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تنها راه منطقی و در دسترس برای انجام مطالعات در این حوزه است. از طرفی با توجه به بررسی مطالعات پیشین انجام شده در نقاط مختلف ایران با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، به نظر می‌رسد مطالعه جامعی در خصوص استفاده از منابع داده‌ای مختلف برای تحلیل و بررسی دقیق‌تر امکان وقوع سیل انجام نشده است. از جمله این مطالعات، می‌توان به ارزیابی دقت داده‌های TWS ماهواره GRACE قبل از به‌کارگیری آن برای محاسبه شاخص سیل، استفاده از منابع داده‌ای مختلف دیگر، از قبیل بارش و مقایسه روند

خطی و فصلی این داده‌ها با داده‌های TWS ماهواره GRACE و همچنین ارتباط بین سری زمانی آن‌ها اشاره نمود.

از جمله مناطق آسیب پذیر سیل در ایران غرب و جنوب غرب ایران می‌باشد که شاهد سیل‌های مهیب مختلفی در چند دهه اخیر بوده است. لذا در این تحقیق ابتدا به منظور مطالعه جامع‌تر، محدوده مکانی وسیعی در حدفاصل ۴۵-۴۹ درجه طول جغرافیایی و ۳۵-۳۰ درجه عرض جغرافیایی که بسیاری از مناطق غرب و جنوب غربی ایران و بخش‌هایی از کشور عراق را در بر می‌گیرد، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. سپس دقت داده‌های TWS به‌دست آمده از ماهواره‌های GRACE برای سری زمانی حدود ۱۷ سال (از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹) به کمک معادله توازن آب و داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS⁷ و همچنین داده‌های رواناب بدست آمده از مدل هیدرولوژی GLDAS⁸ مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مرحله بعدی، به‌منظور تحلیل دقیق‌تر سیل، روند سالانه و فصلی داده‌های TWS و همچنین داده‌های بارش و ارتباط بین آنها مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. سپس در جهت امکان‌سنجی تشخیص سیل‌های رخ داده شده در منطقه مورد مطالعه، به کمک داده‌های TWS ماهواره GRACE⁶ و GRACE FO⁶ و همچنین سری زمانی داده‌های بارش ماهواره‌ای TRMM، مقدار بالقوه سیل و شاخص پتانسیل سیل (FPI⁹) در محدوده مکانی و زمانی مورد بررسی، محاسبه گردید. در نهایت به‌عنوان مطالعه موردی، سیل مهیب رخ داده در سال ۲۰۱۹ در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از شاخص FPI در ماه‌های مختلف تجزیه و تحلیل شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه غرب ایران به‌صورت نوار باریکی بین عرض‌های جغرافیایی تقریبی ۳۲ تا ۳۵ درجه شمالی قرار گرفته و حوضه آبریز رودخانه‌های مرزی ایران و عراق در آن واقع شده است. ارتفاعات این حوضه به‌موازات مرزهای غربی کشور کشیده شده‌اند و ویژگی گستردگی عرض جغرافیایی و حائل بودن کوهستان‌ها در مقابل جریانات باران‌زای غربی، تعیین‌کننده شرایط اقلیمی حوضه است (Geographical Organization of the Armed Forces, 2006).

علاوه‌براین منطقه کوهستانی غرب و جنوب‌غربی کشور دارای توپوگرافی ویژه‌ای است. اقلیم این منطقه از دو بخش کوهستانی و جلگه‌ای تشکیل شده است و در مناطق کوهستانی و مرتفع،

زاگرس سرچشمه می‌گیرند، در این جلگه واقع شده و همه آن‌ها در نهایت به سوی خلیج فارس سرازیر می‌شوند. میانگین بارندگی سالانه جلگه خوزستان در شمال و در کوهپایه‌های زاگرس حداکثر ۵۰۰ و در جنوب ۱۰۰ میلی‌متر است (Jafari, 1999). جلگه خوزستان با حجم ورودی بیش از ۳۳ میلیارد مترمکعب آب در سال و دارا بودن بیش از سه میلیارد مترمکعب آب ذخیره‌شده در سفره‌های زیرزمینی، چهار درصد مساحت کشور و حدود ۳۰ درصد منابع آب کشور را در اختیار دارد. آب‌های سطحی خوزستان بیشتر از استان‌های هم‌جوار نظیر لرستان، چهارمحال بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد سرچشمه می‌گیرند (General Department of Meteorology of Khuzestan Province, 2008). در این منطقه حداکثر دمای مطلق سالیانه ۵۳/۷ درجه سانتی‌گراد و حداقل دمای مطلق سالیانه ۴۲ درجه سانتی‌گراد است. میانگین روزهای بارانی در این منطقه ۳۹ روز است. میانگین بارش سالانه استان خوزستان طی دوره آماری بلندمدت ۲۸۴/۳ میلی‌متر است که بیشترین آن مربوط به ایذه با ۶۱۴/۸ میلی‌متر و کمترین آن مربوط به شهر آبادان با ۱۴۹/۷ میلی‌متر است (General Department of Meteorology of Khuzestan Province, 2008). در این مطالعه با انتخاب منطقه غرب و جنوب‌غربی کشور جهت انجام پژوهش، طول‌های جغرافیایی ۴۵ الی ۴۹ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۳۰ الی ۳۵ درجه با توپوگرافی ویژه مدنظر قرار گرفتند. شکل ۱، نقشه مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد، که از تصاویر سنجنده ASTER استخراج شده است.

تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد و در نواحی کوهپایه‌ای دارای آب‌وهوای نیمه بیابانی و در نواحی پست جلگه‌ای هرچه به سمت جنوب و جنوب‌غربی پیش برویم خصوصیات آب‌وهوایی از نیمه‌بیابانی به بیابانی کناره‌ای تبدیل می‌شود (General Department of Meteorology of Khuzestan Province, 2008). جلگه خوزستان و رشته‌کوه‌های زاگرس در این منطقه قرار دارند. جلگه خوزستان، وسیع‌ترین جلگه ایران که حدود سه‌پنجم مساحت استانی به همین نام و نیز قسمت‌هایی از شرق استان‌های بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد را دربر می‌گیرد. این جلگه از کوهپایه‌های زاگرس شروع می‌شود و تا سواحل خلیج فارس و اروندرود ادامه می‌یابد (Educational research and planning organization, 2003). جلگه خوزستان در اثر تجمع آب‌رفت‌ها در قسمت انتهایی رودهایی که به سوی خلیج فارس روان‌اند، پدید آمده و بخشی کوچک از حوضه آبریز وسیعی را تشکیل می‌دهد که به نام «خلیج فارس و دریای عمان» از جنوب استان آذربایجان غربی تا شرق استان سیستان و بلوچستان گسترده شده است (Geological Atlas of Iran, 2002). قسمت‌های شمالی جلگه خوزستان دارای آب فراوان و خاک حاصلخیز بوده و برای کشاورزی بسیار مساعد است، اما قسمت‌های جنوبی آن به علت بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی و به علت جزرومد دریا، دارای زمین‌های شورهای و غیرقابل کشت است (Educational Research and Planning Organization, 2003). رودهای پر آب کرخه، دز، زهره، جراحی و تنها رود پرآب و قابل کشتیرانی ایران یعنی کارون که از ارتفاعات

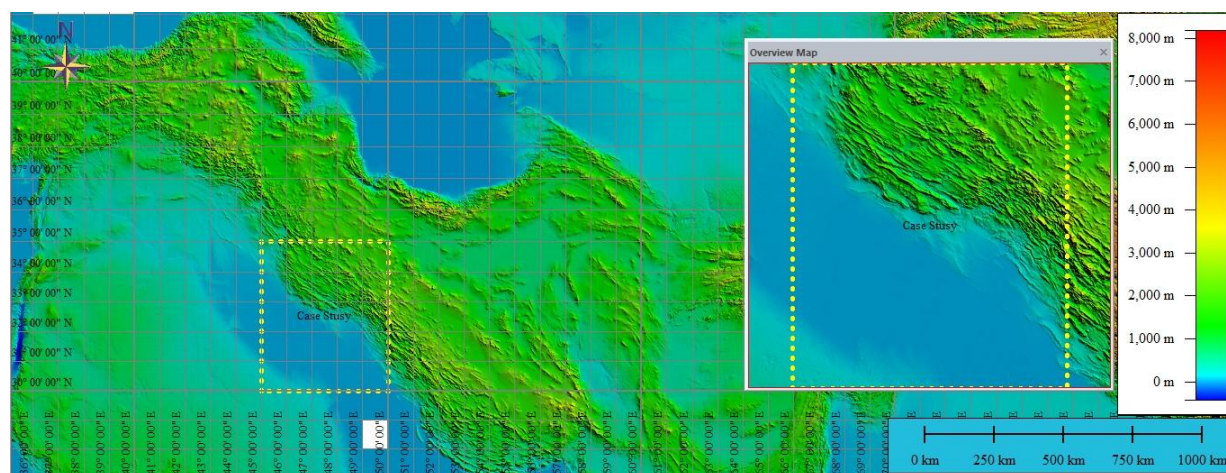


Fig. 1- Digital elevation model of the study area obtained from the ASTER
 شکل ۱- نقشه مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه به‌دست آمده از ماهواره ASTER

۲-۲- داد‌های مورد استفاده

۲-۱- داد‌های ماهواره GRACE

شد. همچنین از طریق نمونه‌برداری مجدد، قدرت تفکیک مکانی آن به یک درجه تبدیل شد. در نهایت پس‌پردازش‌های لازم جهت استخراج مقدار نهایی پارامتر انجام شد.

این ماهواره در سال ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شد (Tapley et al., 2004). هدف اولیه مأموریت این ماهواره (طراحی شده برای یک دوره زمانی ۵ ساله) به دست آوردن مدل‌های جهانی میدان پتانسیل جاذبی زمین یا ژئوپتانسیل و تغییرات آن در طول زمان است (Tapley et al., 2019). جزئیات بیشتر در خصوص ویژگی این داده‌ها در مقاله Landerer and Swenson (2012) قابل دسترسی است. در پژوهش حاضر، محصول سطح سه فایل مرکز تحقیقات فضایی تگزاس (Center for Space Research at the University of Texas, CSR) با قدرت تفکیک مکانی یک درجه و قدرت تفکیک زمانی ماهانه برای دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۲ تا اواسط سال ۲۰۱۷ از سایت <https://podaac.jpl.nasa.gov> اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. این ماهواره در طول برخی ماه‌ها داده ندارد.

۲-۴- داد‌های ماهواره TRMM

در این مقاله از محصول داده‌های بارشی TMPA 3B43 ماهواره TRMM استفاده شده است (Kawanishi et al., 2000). این محصول از الگوریتم نسخه ۷ با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (که با روش میانگین‌گیری تبدیل به یک درجه شده است) و قدرت تفکیک زمانی ماهانه به دست آمده است. داده‌های مورد نیاز برای پژوهش حاضر بین سال‌های ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹ از وبسایت <http://trmm.gsfc.nasa.gov> اخذ و مورد استفاده قرار گرفت (Huffman et al., 2010).

۲-۵- داد‌های مدل هیدرولوژی

هدف از سیستم جهانی اطلاعات سطح زمین GLDAS، مشاهده و ترکیب داد‌های ماهواره‌ای و زمینی، با استفاده از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی به منظور تولید مدل‌های بهینه شده سطح زمین و جریان‌های آن است (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>). مدل هیدرولوژی استفاده شده در این مقاله، GLDAS V2.1 است (Beaudoin et al., 2016). داد‌های رواناب بدست آمده از محصول سطح چهار (استخراج شده از پردازش محصول دریافتی Noah-LSM) با قدرت تفکیک مکانی یک درجه و قدرت تفکیک زمانی ماهانه با واحد کیلوگرم بر مترمکعب برای پرپود زمانی بین ۲۰۱۶ تا اواخر سال ۲۰۱۹ از وبسایت <https://disc.gsfc.nasa.gov> اخذ و مورد استفاده قرار گرفت.

محصولات مختلف مورد استفاده در این تحقیق، به همراه قدرت تفکیک مکانی، قدرت تفکیک زمانی و طول دوره زمانی مورد مطالعه در جدول ۱ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که به منظور به کارگیری همه داده‌ها در یک مدل محاسباتی، نیاز به یکسان کردن قدرت تفکیک آنها است. لذا در این مطالعه، قدرت تفکیک مکانی داده‌های بارشی TRMM و داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS با روش میانگین‌گیری به یک درجه و قدرت تفکیک زمانی آنها نیز به ماهیانه تبدیل شدند.

۲-۲- داد‌های ماهواره GRACE FO

با پایان یافتن عمر ماهواره GRACE و خروج از مدار آن در اواسط سال ۲۰۱۷، ماهواره GRACE FO در اواسط سال ۲۰۱۸ و با یک سال تأخیر به منظور ادامه مأموریت ماهواره GRACE به فضا پرتاب شد (Flechtner et al., 2014). این ماهواره دارای الگوریتم‌های محاسباتی جدیدتر و سنسورهای دقیق‌تری نسبت به مدل پیشین خود است (Kornfeld et al., 2019). در این پژوهش از محصول سطح سه فایل مرکز تحقیقات فضایی تگزاس (CSR) با قدرت تفکیک مکانی یک درجه و قدرت تفکیک زمانی ماهانه برای دوره زمانی اواسط سال ۲۰۱۸ تا اواخر سال ۲۰۱۹ از همان سایت ذکر شده برای GRACE، اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. این ماهواره نیز در طول برخی ماه‌ها داده ندارد.

۲-۳- داد‌های سنجنده MODIS

در این مطالعه محصول تبخیر و تعرق سنجنده MODIS (MOD16A2) مورد استفاده قرار گرفت (Mu et al., 2013). این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و قدرت تفکیک زمانی هشت‌روز است (Zhang et al., 2015) و از طریق وبسایت <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> قابل دسترسی و دانلود است. به دلیل عدم وجود مقادیر ماهیانه برای این محصول، به روش میانگین‌گیری از چهار هفته متوالی، داده‌های این پارامتر در بین سال‌های ۲۰۱۶ تا اواخر سال ۲۰۱۹ به داده‌های ماهیانه تبدیل

Table 1- Summary of the data products used in this study

Satellite	Temporary resolution Date of data acquisition	Spatial resolution	Parameter	Product	Unit
GRACE	Monthly 2002-2017	1 degree	TWS	RL06	m
GRACE-FO	Monthly 2018-2019	1 degree	TWS	RL06	m
MODIS	8 days 2016-2019	500 meters	ET	MOD16-A2	mm/8days
TRMM	Hourly 2002-2019	0.25 degrees	P	TMPA 3B43	mm/hour

قرار می‌گیرد. بعد از اطمینان از کیفیت این داده‌ها، با استفاده از داده‌های TWS ماهواره‌های GRACE و GRACE FO، و سری‌های زمانی داده‌های بارشی ماهواره TRMM، میزان پتانسیل سیل (FPA) و در ادامه شاخص FPI محاسبه می‌شود. در نهایت به کمک این شاخص و همچنین مشاهده روند و تغییرات دوره‌ای مشخصه‌های دیگر سیل مانند TWS و بارش، سیل‌های منطقه در دوره زمانی مورد مطالعه، بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شوند. در ادامه روندنمای مربوط به روش‌شناسی مطالعه حاضر در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳-۲- روش‌شناسی

در این بخش با توجه به اینکه مهم‌ترین داده این تحقیق TWS است، ابتدا نحوه محاسبه TWS از مشاهدات تغییرات چگالی جرم سطحی ماهواره‌های GRACE و GRACE FO و با استفاده روابط جاذبی نیوتنی توضیح داده می‌شود. سپس، نحوه اعتبارسنجی دقت داده‌های آنومالی TWS، به کمک معادله بودجه (توازن) آب و با استفاده از داده‌های بارشی ماهواره TRMM، داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS و داده‌های رواناب مدل هیدرولوژی GLDAS مورد بررسی

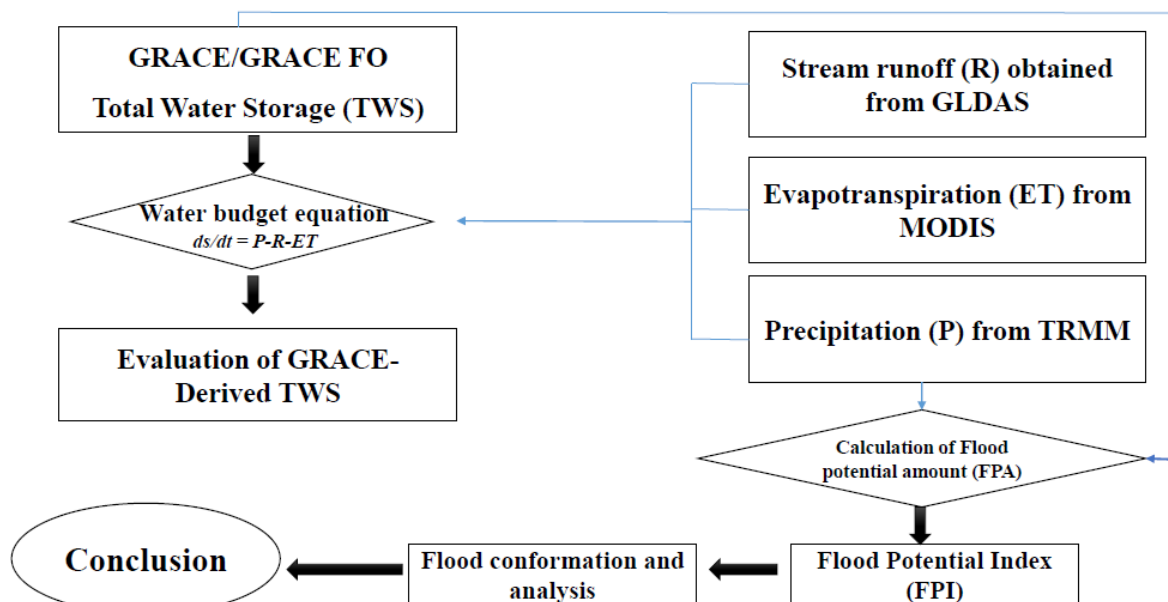


Fig. 2- The flowchart of research methodology

شکل ۲- روندنمای مربوط به روش‌شناسی پژوهش

۲-۳-۱- محاسبه TWS در ماهواره‌های GRACE و GRACE FO

تغییرات چگالی جرم سطحی ($\Delta\sigma$) با استفاده از روابط جاذبی نیوتنی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda) = \frac{\rho_{avg}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_{lm}(\sin\varphi) [\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)]$$

در این رابطه \tilde{P}_{lm} نرمال شده تابع لژاندر میانگین چگالی زمین (برابر است با ۵۵۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب)، k_l مقدار بار لاونامبر 10^1 درجه 1 که در مقاله Wahr et al. (1998) توضیح داده شده است. C_{lm} و S_{lm} پارامترهای ژئودتیک، (φ, λ) طول و عرض جغرافیایی، l و m درجه و مرتبه توابع هارمونیک‌های سطحی هستند. این معادله نقطه آغاز برای استفاده از داده‌های سطح دو ماهواره‌ی GRACE و GRACE FO برای بازیابی تغییرات چگالی جرم سطحی است (Wahr et al., 1998). با استفاده از داده‌های سطح دو این ماهواره‌ها داده‌های سطح سه یعنی محصول TWS به دست می‌آید. جهت اطلاعات بیشتر به مقاله Wahr et al. (1998) مراجعه شود.

۲-۳-۲- ارزیابی و اعتبارسنجی تغییرات TWS به‌دست‌آمده از GRACE و GRACE FO

اکثر مطالعات امروزی از رابطه توازن آب برای ارزیابی تغییرات TWS استفاده می‌کنند. بدین منظور از معادله تعادل آب¹¹ به شرح زیر استفاده می‌گردد (Long et al., 2015; Oliveira et al., 2014):

$$\frac{ds}{dt} = P - R - ET \quad (2)$$

که در آن ds/dt تغییرات ماهانه TWS، P بارش، R جریان رواناب و ET تبخیر و تعرق است. در این مطالعه، P از داده‌های محصول 3B43 ماهواره TRMM، ET از محصول MOD16 ET سنجنده MODIS و داده‌های جریان‌ات رواناب (R) از مدل هیدرولوژی GLDAS به‌دست می‌آیند. در ماهواره‌های GRACE تغییرات ماهانه TWS از آنومالی TWS برای یک دوره زمانی t با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد (Long et al., 2015):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{TWSA(t) - TWSA(t-1)}{t} \quad (3)$$

۲-۳-۳- شاخص پتانسیل سیل (FPI)

FPI مبتنی بر محصول TWSA¹² به‌دست‌آمده از داده‌های GRACE است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Reager and Famiglietti, 2009):

$$S_{DEF}(t) = S_{MAX} - S_{(t-1)} \quad (4)$$

که $S_{(t-1)}$ ، TWS ماه قبل است، S_{MAX} حداکثر مقدار ذخیره آب در آنومالی سری زمانی کل است و S_{DEF} (کسری ذخیره‌سازی) بالاترین میزان تغییر ذخیره‌سازی نسبی مجاز برای ماه آینده است. سپس مقدار بالقوه سیل (FPA¹³) از طریق رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

$$FPA(t) = P_{MON}(t) - S_{DEF}(t) \quad (5)$$

که در آن P_{MON} بارش ماهانه است. FPA به مقدار آب ورودی گفته می‌شود که بر اساس حداکثر آنومالی ذخیره آب در منطقه، نمی‌تواند برای ماه جاری وارد آب‌های ذخیره شود (Reager and Famiglietti, 2009). زمانی که FPA دارای یک مقدار مثبت باشد، سیل ممکن است اتفاق بیفتد. FPI با نرمال کردن FPA به کمک رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$FPI = \frac{FPA(t)}{\text{MAX}[FPA(t)]} \quad (6)$$

در این رابطه، مقدار FPI نمی‌تواند بزرگ‌تر از ۱ باشد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع سیل بیشتر است.

۲-۳-۴- تجزیه و تحلیل سری زمانی TWS

برای تشخیص روند و تغییرات دوره‌ای در آنومالی جرم ماهانه، می‌توان از یک عبارت کلی به شکل زیر استفاده کرد:

$$f(\varphi, \lambda, t) = A + Bt + \sum_i C_i \cos(w_i t) + D_i \sin(w_i t) + \varepsilon \quad (7)$$

در رابطه بالا مقدار در نظر گرفته شده برای تابع f در موقعیت جغرافیایی (φ, λ) در زمان t با استفاده از مقادیر ثابت A و B و متغیرهای دوره‌ای (با دامنه‌های C_i و D_i و فرکانس‌های زاویه‌ای w_i) تقریب زده می‌شود. ε ، نویز و تأثیرات مدل نشده را مشخص می‌کند (Joodaki, 2014).

۳- نتایج و تجزیه و تحلیل

۳-۱- اعتبارسنجی داده‌های ماهواره GRACE و GRACE FO

TWS به‌دست‌آمده از ماهواره‌های GRACE و GRACE FO به کمک معادله تعادل آب و با استفاده از داده‌های بارش ماهواره TRMM، داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS و داده‌های رواناب حاصل از مدل هیدرولوژی GLDAS برای سال‌های ۲۰۱۶ و

توازن آب انجام شد. نتایج حاصل از این ارزیابی ضرایب همبستگی TWS مقادیر ضرایب همبستگی بین ۰/۰۵- تا ۰/۸۲ برای ماهواره GRACE و مقادیر ضرایب همبستگی بین ۰/۶ تا ۰/۸ را برای ماهواره GRACE FO، برای پیکسل‌های مختلف به دست داد. شکل‌های ۴ (الف) و ۴ (ب) نقشه‌های ضرایب همبستگی منطقه مورد مطالعه برای ماهواره‌های GRACE و GRACE FO را نمایش می‌دهد.

۳-۲- بررسی ویژگی‌های داده‌های TWS

سری‌های زمانی بارش ماهواره TRMM و TWS ماهواره GRACE دارای الگوهای فصلی مشخصی می‌باشند به گونه‌ای که بیشترین مقدار بارندگی و بیشترین مقدار TWS در ماه آخر زمستان و دو ماه اول بهار رخ می‌دهد. تغییرات در بارندگی باعث ایجاد تغییرات در TWS با یک ماه تأخیر زمانی برای حوضه می‌شود.

۲۰۱۷ (GRACE) و ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (GRACE FO) اعتبارسنجی شد. لازم به ذکر است که سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ مربوط به داده‌های ماهواره GRACE هر کدام شش ماه کمبود داده داشتند. مقادیر بدست آمده از اعتبارسنجی، برای ۲۵ پیکسل دربرگیرنده منطقه مورد مطالعه، میانگین‌گیری شد. نتایج بدست آمده برای ماهواره GRACE مقدار RMSE ۰/۳۴ متر و ضریب همبستگی ۰/۶۹ و برای ماهواره GRACE FO مقدار RMSE ۰/۵۱ متر و ضریب همبستگی ۰/۷۲ را به دست داد. نتایج حاصل از این اعتبارسنجی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۳ سری‌های زمانی مقادیر TWS به دست آمده از دو روش فوق‌الذکر را نشان می‌دهد.

علاوه بر اعتبارسنجی انجام شده در مرحله قبل، که مقادیر بدست آمده برای میانگین تمامی ۲۵ پیکسل دربرگیرنده منطقه بود، برای هر پیکسل نیز بصورت جداگانه ارزیابی مقادیر TWS ماهواره‌های GRACE و GRACE FO از طریق مقادیر بدست آمده از معادله

Table 2- The RMSE and correlation coefficient obtained from comparing the TWS derived from GRACE and GRACE FO data with estimates based on the water budget equation

جدول ۲- RMSE و ضریب همبستگی بین TWS به دست آمده از داده‌های ماهواره‌های GRACE و GRACE FO و TWS محاسبه‌شده از رابطه توازن آب

TWS From	RMSE (m)	Correlation coefficient (Pearson)
GRACE	0.034	0.69
GRACE-FO	0.051	0.72

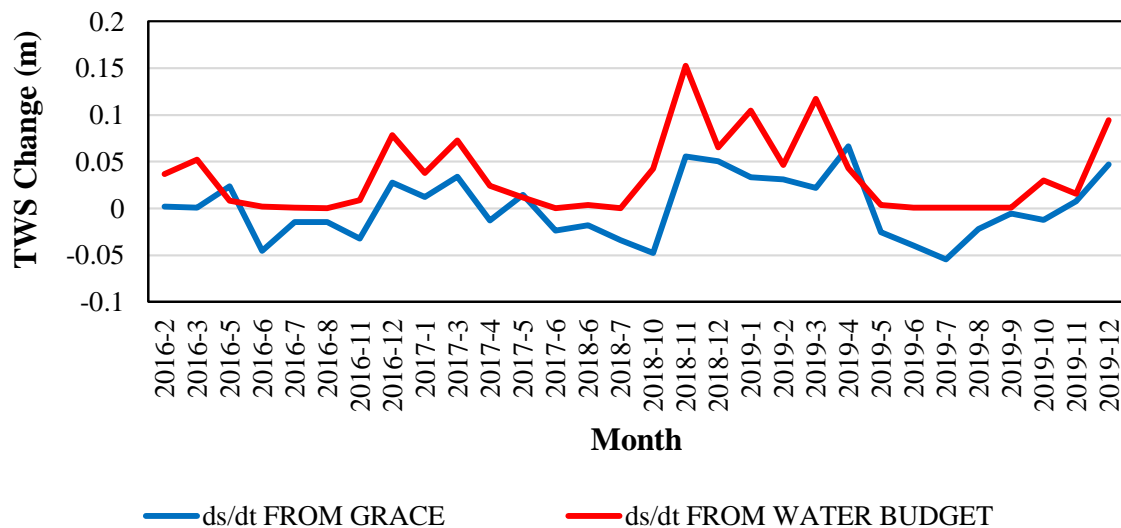


Fig. 3- The changes of the total water storage (TWS) obtained from the GRACE and GRACE FO data compared to the water budget equation estimates from 2016 to 2020.

شکل ۳- تغییرات ذخیره کلی آب زمینی (TWS) به دست آمده از داده‌های ماهواره‌های GRACE و GRACE FO در مقایسه با TWS به دست آمده از معادله تخمین توازن آب بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰

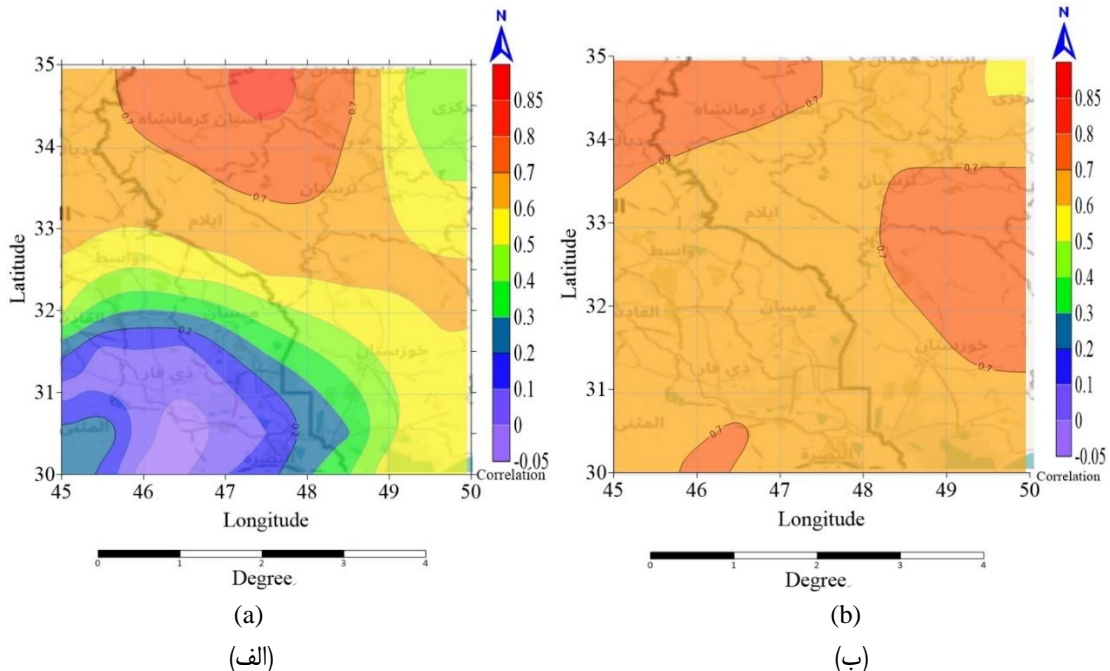


Fig. 4- Pixel-by-pixel validation of TWS obtained from the water balance equation using (a) TWS derived from GRACE data (b) TWS derived from GRACE FO data from 2016 to late 2019.
 شکل ۴- اعتبارسنجی پیکسل به پیکسل TWS به دست آمده از معادله توازن آب (الف) با TWS به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE (ب) با TWS به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE FO در سال‌های ۲۰۱۶ تا اواخر ۲۰۱۹

GRACE و همچنین ماه‌های اول و دوم و سوم و چهارم و پنجم و هشتم و نهم سال ۲۰۱۸ برای ماهواره GRACE FO مقادیر آن‌ها برای تمامی داده‌ها حذف شده است. شکل ۵، سری زمانی بارش ماهواره TRMM و سری زمانی TWS ماهواره‌های GRACE و GRACE FO را نمایش می‌دهد.

لازم به یادآوری است که متأسفانه در این نمودارها به دلیل نبود داده در ماه‌های اول و دوم سال ۲۰۰۲، ماه‌های دوم و ششم سال ۲۰۱۱، ماه دهم سال ۲۰۱۲، ماه‌های هشتم و نهم سال ۲۰۱۳، ماه‌های دوم و هفتم سال ۲۰۱۴، ماه‌های ششم و دهم و یازدهم سال ۲۰۱۵، ماه نهم و دهم سال ۲۰۱۶ و نیز شش ماهه دوم سال ۲۰۱۷ برای ماهواره

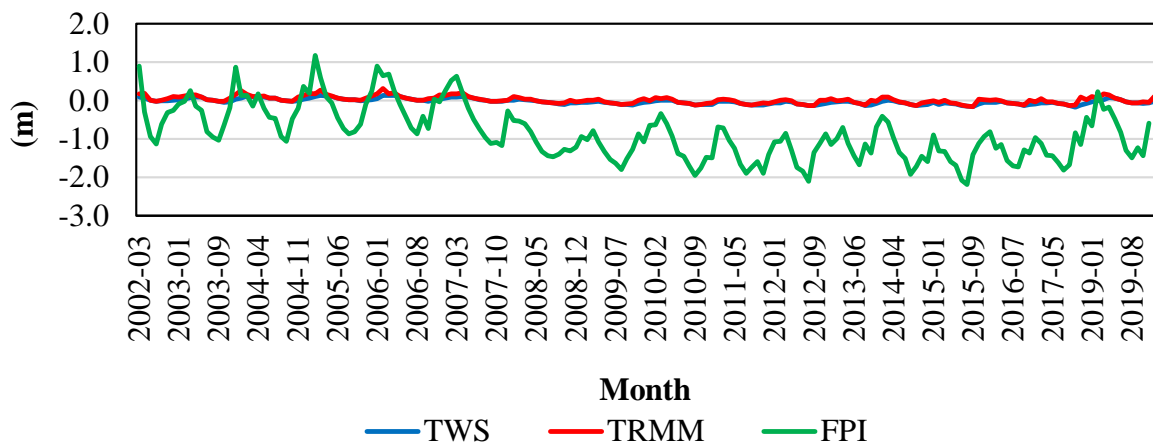


Fig. 5- Variations of TWS and precipitation from 2002 to late 2019
 شکل ۵- تغییرات ذخیره کلی آب زمینی و بارش از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹

۳-۳- بررسی روند خطی و روند فصلی TWS

تکراری اما با دامنه متفاوت است (شکل‌های ۶ و ۷). بطور کلی در بررسی روند خطی آنومالی ذخیره کلی آب زمینی، مشخص گردید که TWS در طول دوره زمانی مورد مطالعه در منطقه روندی نزولی داشته است و از مقدار $0/05$ متر به مقدار $-0/1$ متر کاهش یافته است (روند خطی شکل ۷).

با بررسی اطلاعات مربوط به داده‌های TWS مشخص گردید که روند خطی TWS بین سال‌های ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹ با کاهش ۱۵ سانتی‌متری مواجه شده است و این به معنای کاهش آب ذخیره زمینی با نرخ هشت میلی‌متر در سال است و روند فصلی آن دارای الگوی

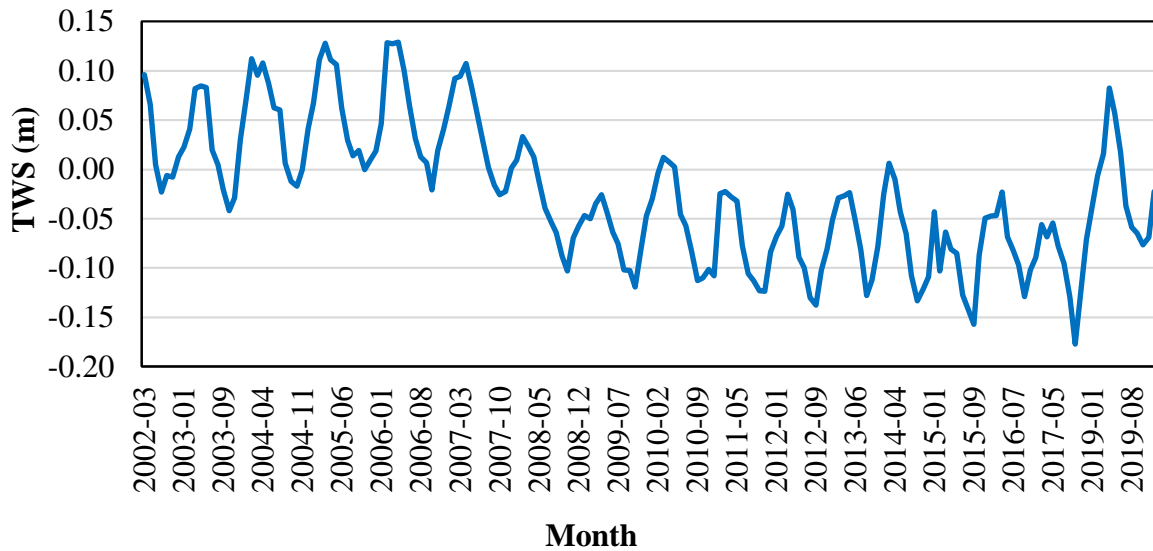


Fig. 6- Variations of TWS derived from GRACE and GRACE FO from 2002 to 2019
شکل ۶- تغییرات TWS ماهواره GRACE و GRACE FO از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹

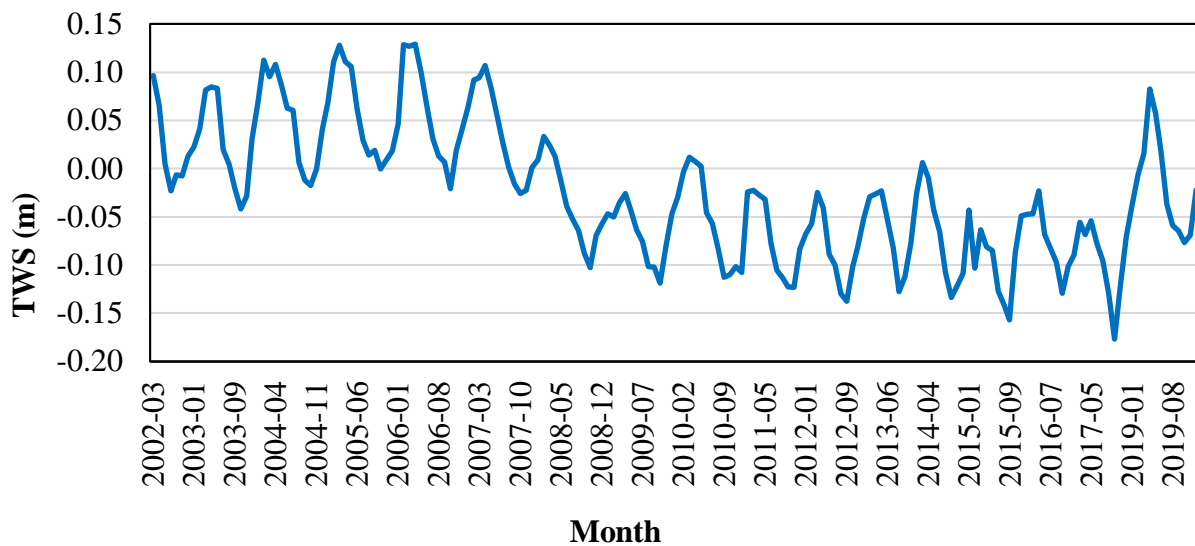


Fig. 7- General and seasonal trend of TWS derived from GRACE and GRACE FO from 2002 to late 2019
شکل ۷- روند کلی و فصلی تغییرات TWS ماهواره‌های GRACE و GRACE FO از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹

۴-۳- بررسی روند خطی و روند فصلی داده‌های بارشی TRMM

در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که روند خطی بارشی بین سال‌های ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹ ثابت بوده و روند فصلی آن دارای

الگوی تکراری است (شکل‌های ۸ و ۹). این تغییرات فصلی عامل تعیین‌کننده و مؤثر بر تغییرات ذخیره آب زمینی است به‌گونه‌ای که افزایش بارش در ماه‌های پرباران و همچنین افزایش ماه‌های بارشی موجب افزایش TWS و کاهش این دو، موجب کاهش TWS می‌شود.

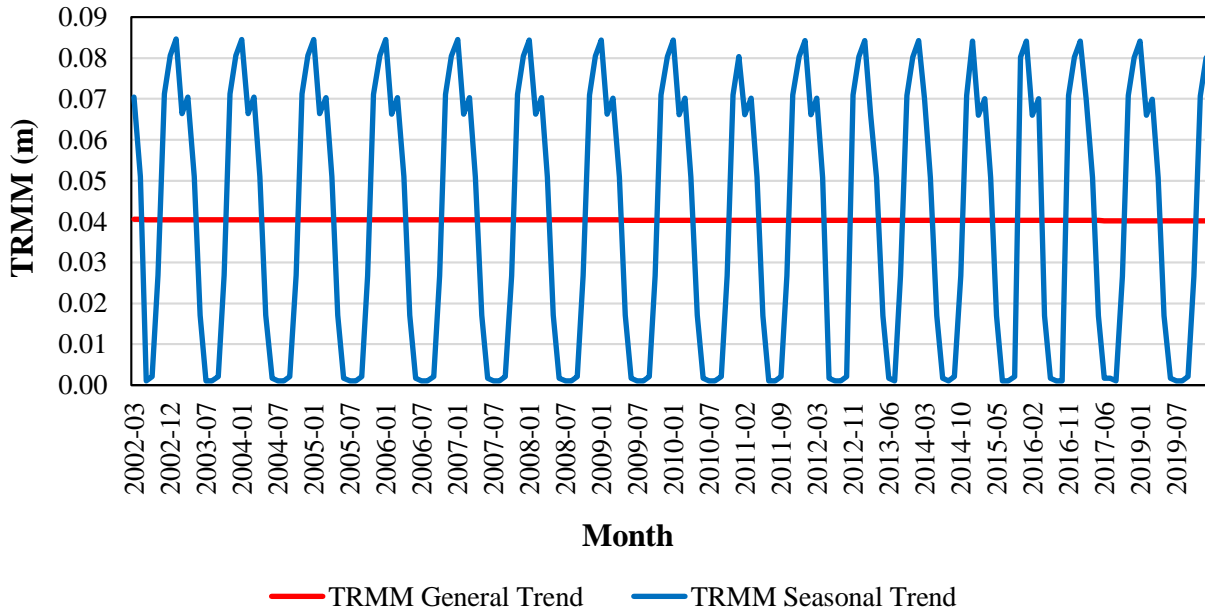


Fig. 8- Variations of monthly rainfall from TRMM from 2002 to late 2019
شکل ۸- تغییرات ماهیانه بارش ماهواره TRMM از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹

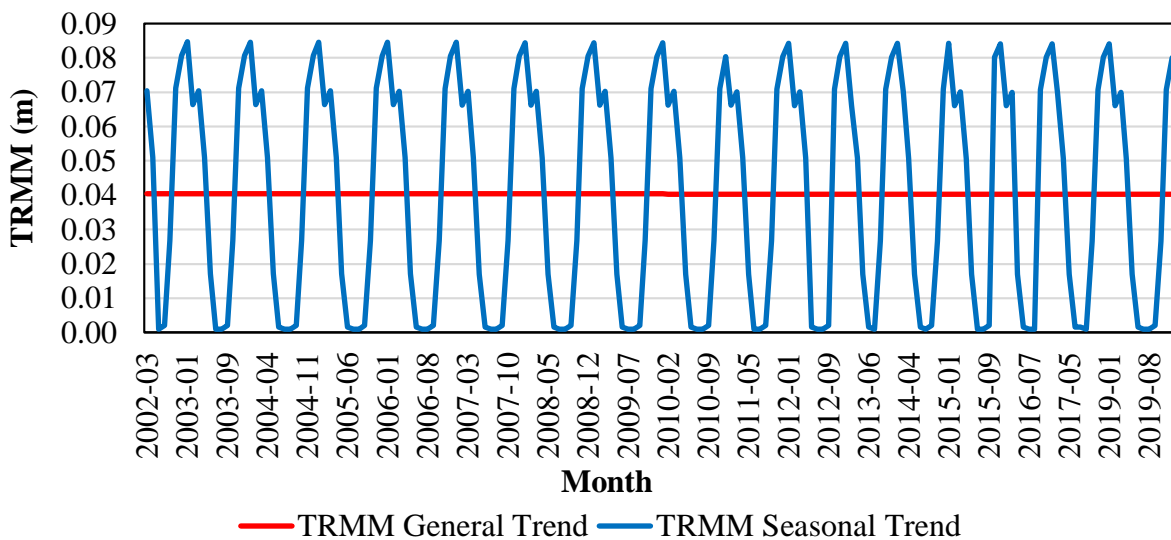


Fig. 9- Linear and seasonal trend of monthly rainfall from TRMM from 2002 to 2019
شکل ۹- روند خطی و فصلی تغییرات ماهیانه بارش ماهواره TRMM از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹

۳-۵- مقایسه تغییرات ماهیانه TWS با تغییرات ماهیانه بارش ماهواره TRMM

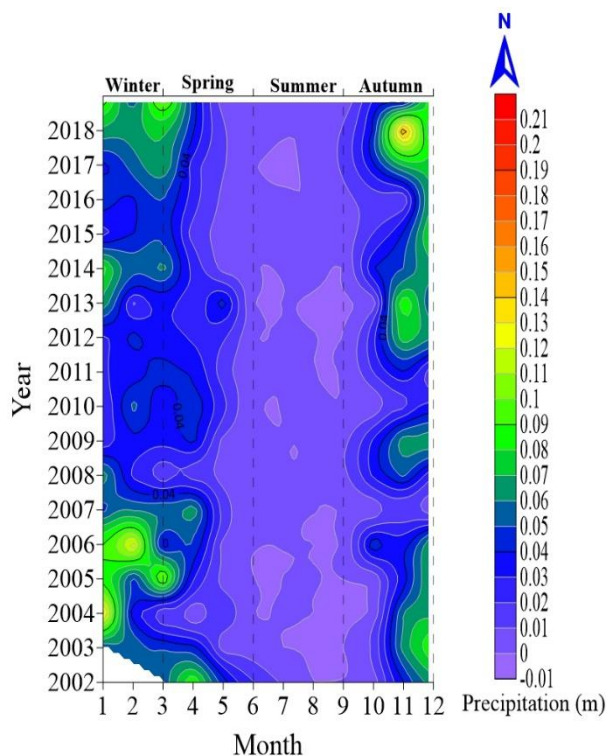


Fig. 11- Variations of monthly rainfall from TRMM from 2002 to late 2019

شکل ۱۱- تغییرات ماهیانه میزان بارش (متر) ماهواره TRMM از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹

همان طور که در شکل ۱۲ مشخص است، توزیع مکانی TWSA در طول دوره مطالعه در شمال منطقه زیاد و در جنوب منطقه کم است. همچنین با توجه به داده‌های پردازش شده، در دوره زمانی مورد مطالعه، بیشترین مقدار تغییرات TWS در طول جغرافیایی ۴۵/۵ و عرض جغرافیایی ۳۴/۵ (در نزدیکی مرز کرمانشاه و عراق) و کمترین مقدار تغییرات در طول جغرافیایی ۴۷/۵ و عرض جغرافیایی ۳۱/۵ (در قسمت بالای مرز خوزستان و عراق) است.

۳-۶- محاسبه میزان پتانسیل سیل (FPA) و شاخص پتانسیل سیل (FPI)

برای محاسبه FPI ابتدا لازم است که میزان پتانسیل سیل (FPA) محاسبه شود. مقادیر FPA بیانگر میزان پتانسیل سیل است و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر و یا بزرگ‌تر از آن باشد احتمال جاری شدن آب بر روی سطح زمین و وقوع سیل بیشتر است و هرچه این مقدار کمتر از صفر باشد احتمال وقوع سیل پایین‌تر است. FPI به‌دست‌آمده از TWSA و بارش، نشانه مستقیمی از پتانسیل سیل ارائه می‌کند.

همان طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است کاهش میزان بارش منجر به افت TWS و افزایش بارش منجر به افزایش میزان TWS می‌شود. برای مثال در اواخر سال ۲۰۱۸ مقدار TWS با کاهش میزان بارندگی کاهش می‌یابد؛ اما در سال ۲۰۱۹ میزان TWS به بالاترین حد خود در چند سال گذشته رسیده است چراکه میزان بارندگی در این ماه‌ها افزایش شدید یافته است و از اواخر ماه سوم و اوایل ماه چهارم میلادی معادل فروردین‌ماه ۱۳۹۸ شمسی، رخداد سیلاب‌های شدید با خسارت‌های مالی و جانی قابل توجه در مناطقی از ناحیه مورد مطالعه اتفاق افتاده است.

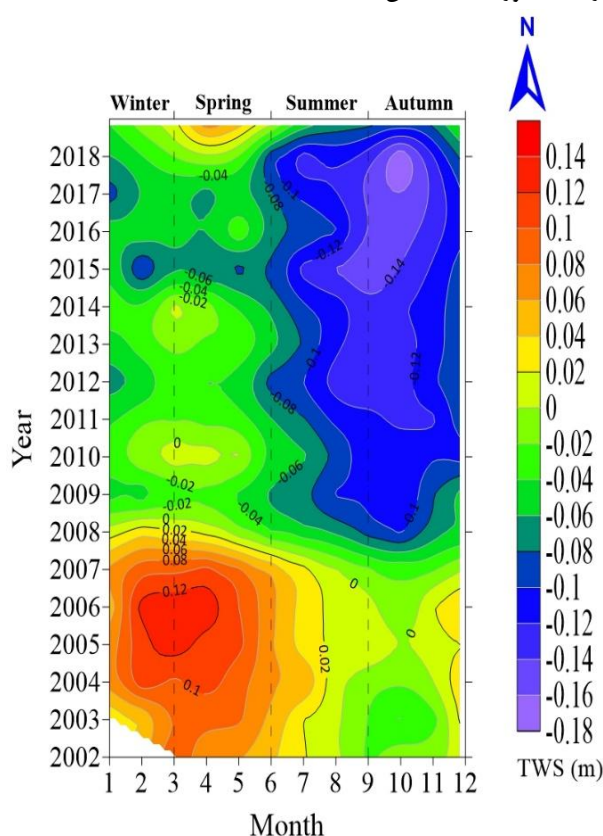


Fig. 10- Variations of monthly TWS from GRACE and GRACE FO from 2002 to late 2019

شکل ۱۰- تغییرات ماهیانه TWS (متر) ماهواره‌های GRACE و GRACE FO از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹

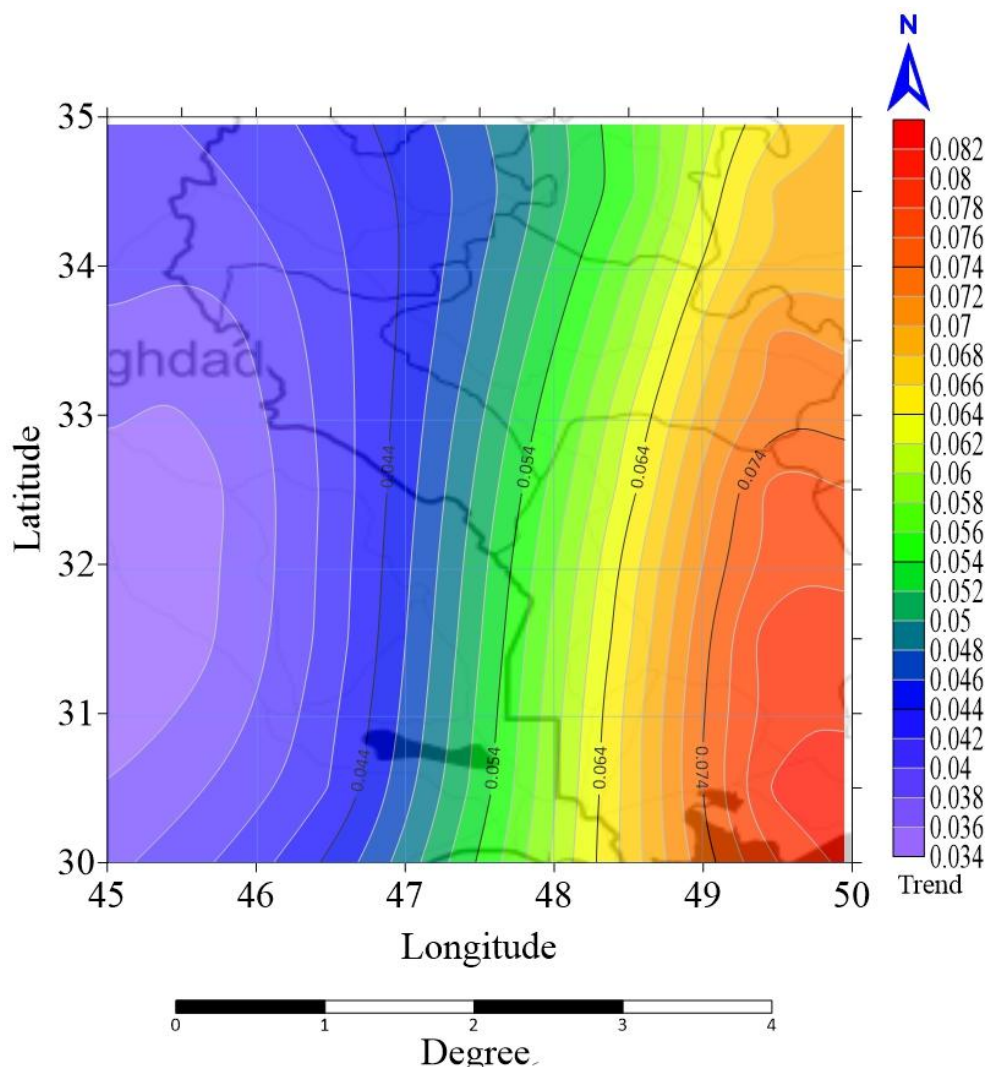


Fig. 12- TWSA trend from 2002 to late 2019 (m)
 شکل ۱۲- روند تغییرات TWSA از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹ (متر)

همین منظور شاخص FPI که در حقیقت نرمال شده FPA است، محاسبه شد.

همان‌گونه که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، شاخص FPI نسبت به تغییرات بارش دارای حساسیت کمتری بوده و وضوح بالاتری نسبت به FPA دارد. لذا نسبت به FPI معیار مناسب‌تری برای پیش‌بینی وقوع سیلاب است. با توجه به این نمودار احتمال وقوع رخداد سیل در زمان‌هایی که شاخص FPI از صفر بالاتر است بیشتر از زمان‌های دیگر است. درنهایت، با مراجعه به شکل ۱۵ بیشترین مقادیر مربوط به شاخص FPI که مقدار آن‌ها بالاتر از صفر است، استخراج گردید. نتایج به‌دست آمده به ترتیب تاریخ در جدول ۳ نمایش داده شده است:

مقادیر بالای FPI نشان از شدت بالای سیل و نیز شدت بالای رواناب و بارش دارد (Sun et al., 2017). مقدار یک برای شاخص پتانسیل سیل بیانگر حداکثر میزان وقوع سیل است، به‌نحوی که در مقادیر بیشتر از صفر احتمال وقوع سیلاب و رواناب بر سطح زمین بسیار بالا بوده و مقادیر کمتر از صفر نشان از احتمال کم وقوع سیلاب و رواناب است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقادیر مربوط به FPI و FPA در بازه زمانی مورد مطالعه نمایش داده شده است.

بررسی‌ها نشان داد که شاخص FPA رابطه مستقیمی با بارش ماهیانه دارد و تغییرات در مقدار بارش موجب تغییرات در همان سطح در شاخص FPA می‌شود (شکل ۱۵). لذا با توجه به این موضوع نیاز به شاخص واضح‌تری برای احتمال رخداد سیل احساس می‌گردد. به

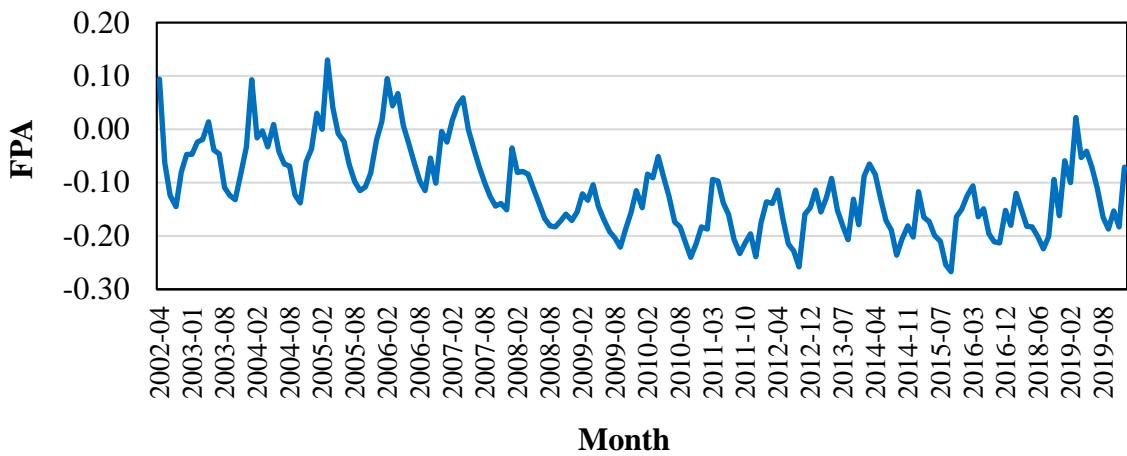


Fig. 13- Variations of flood potential amount (FPA) from 2002 to late 2019

شکل ۱۳- تغییرات FPA از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹

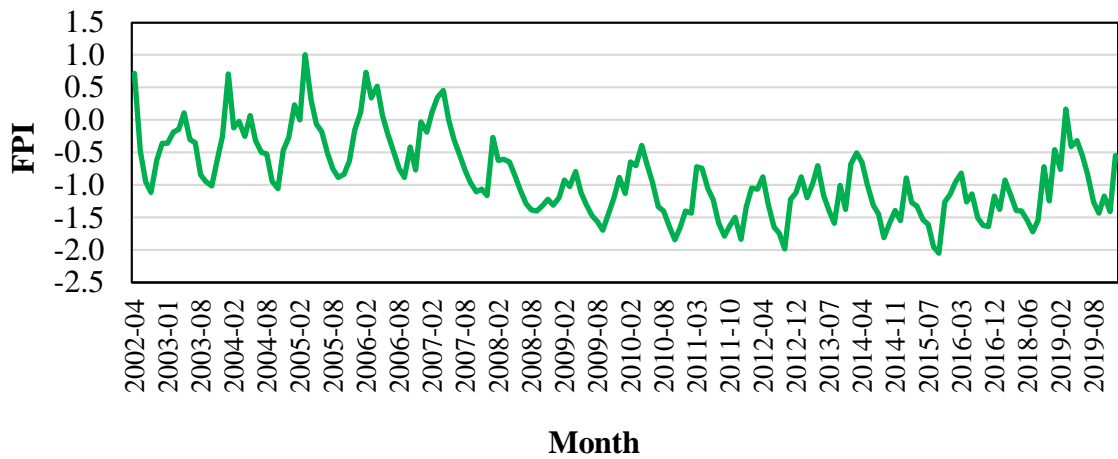


Fig. 14- Variations of flood potential index (FPI) from 2002 to late 2019

شکل ۱۴- تغییرات FPI از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹

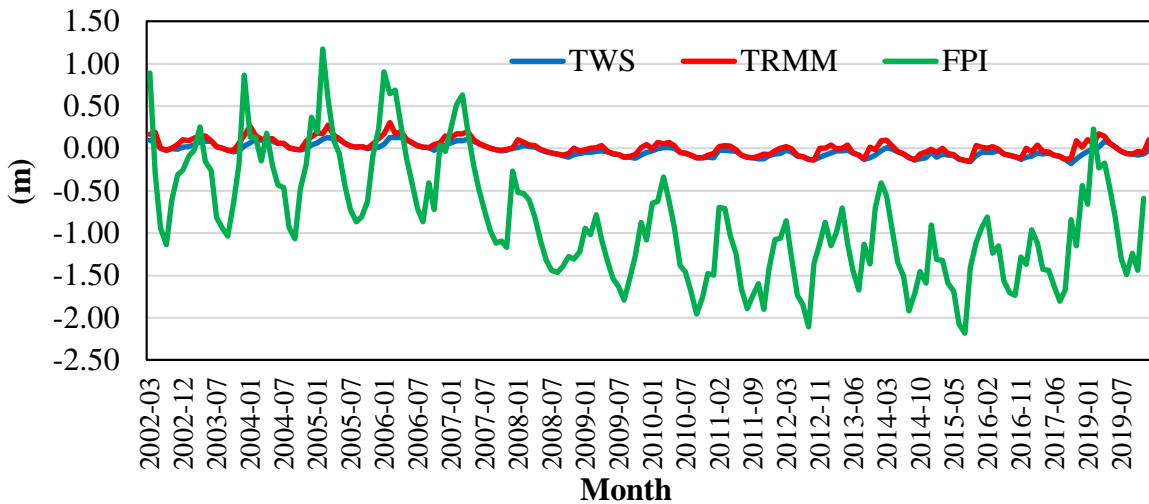


Fig. 15- Variations of TWS, precipitation and FPI from 2002 to late 2019

شکل ۱۵- تغییرات میزان TWS، بارش و FPI از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹

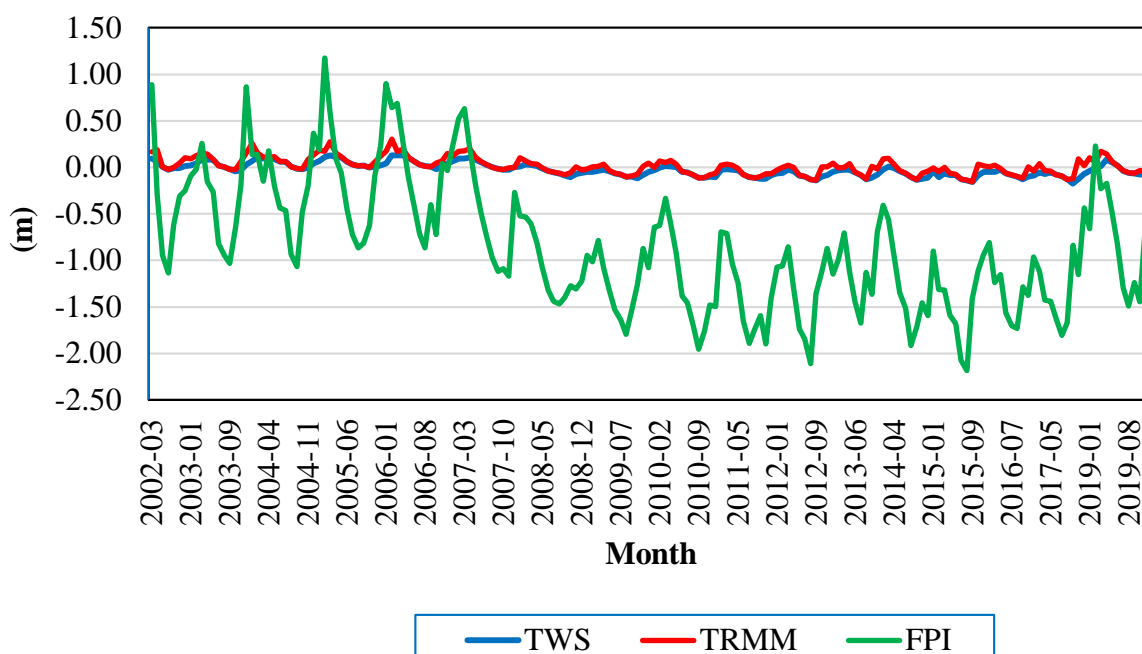


Fig. 16- Variations of TWS, precipitation and FPI from 2002 to late 2019

شکل ۱۶- تغییرات میزان TWS، بارش و FPI از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹

Table 3- Estimation of flood occurrence in the studied area from 2002 to late 2019 using FPI

جدول ۳- تخمین رخداد سیلاب در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۲ تا اواخر ۲۰۱۹ با استفاده از FPI

Num	Date	Shamsi date	FPI	Precipitation (mm)
1	04/2002		0.72	127
2	01/2004		0.71	191
3	01/2005	Bahman-1383	0.23	118
4	02/2005	Esfand-1383	1	148
5	03/2005		0.32	42
6	02/2006	Bahman-1384	0.73	178
7	03/2006	Esfand-1384	0.34	44
8	04/2006		0.52	69
9	03/2007		0.35	82
10	04/2007		0.46	94
11	03/2019	Farvardin-1398	0.17	157

عراق را هم شامل می‌شود سیل‌های این دو سال می‌تواند مربوط به آن مناطق باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص FPI در بسیاری موارد بسیار خوب عمل کرده و موفق به شناسایی سیل‌های رخ داده در منطقه شده است. برخی از سیل‌ها همچون سیل سال ۱۳۹۷ به علت نبود داده‌های ماهواره‌ای شناسایی نشد. با این وجود به نظر می‌رسد برای شناسایی دقیق تر سیل، فقط با اتکا به داده‌های ماهواره‌ای نتوان پایش درستی داشت و نیاز به داده‌های کمکی دیگری از قبیل مشاهدات زمینی ضروری به نظر می‌رسد.

اطلاعات جدول ۳ نشان می‌دهد که بسیاری از سیل‌های مهیب رخ داده در منطقه مورد مطالعه همچون سیل‌های مهیب ژانویه و فوریه ۲۰۰۵ (بهمن و اسفند ۱۳۸۳)، فوریه و مارس ۲۰۰۶ (بهمن و اسفند ۱۳۸۴)، مارس ۲۰۱۹ توسط شاخص FPI شناسایی شده است. ولی در برخی موارد نیز که به نظر نمی‌رسد سیلی رخ داده باشد یا سیل قابل توجهی نبوده، مقدار FPI بیشتر از صفر است (مانند سال ۲۰۰۷). در خصوص سیل‌های شناسایی شده سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ در اخبار و مطالعات فارسی گزارشی دیده نشد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه بخشی از کشور

با توجه به این شکل، روند کلی شاخص FPI دارای سیر نزولی است که این موضوع نشان از خشک شدن منطقه دارد. همچنین افزایش عمق نمودار فصلی نشان از خشک شدن منطقه با سرعتی افزایشی است که این پدیده در جای خود نیاز به بحث و بررسی بیشتری دارد.

در ادامه، به عنوان مطالعه موردی، سیل رخ داده شده در سال ۲۰۱۹ در منطقه مطالعاتی، مورد بررسی و پایش قرار گرفت. به همین منظور در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ احتمال وقوع سیلاب با طیف رنگ آبی (جاری شدن آب در سطح زمین) و قرمز (جاری شدن آب در سطح زمین با شدت و حجم زیاد) و احتمال عدم وقوع این پدیده با رنگ سفید نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است نوسانات شاخص FPI در شش ماهه اول این سال (شکل ۱۸) و به‌طور ویژه در ماه سوم میلادی (مصادف با فروردین و اردیبهشت سال ۱۳۹۸) در منطقه کاملاً قابل مشاهده است و شش ماهه دوم (شکل ۱۹) این شاخص دارای وضعیت پایداری بوده که حاکی از ثبات وضعیت آب‌وهوا و عدم وقوع سیلاب است.

Rezvani Faezifar et al. (2022) با استفاده از شاخص FPI، سیل سال ۲۰۱۹ (فروردین‌ماه ۱۳۹۸) در حوضه خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق مقادیر به‌ترتیب ۰/۲۱، ۰/۴۲ و ۰/۶۸ را برای ماه‌های مارس، آوریل، می و ژوئن نشان داد. مقدار FPI به‌دست آمده در این تحقیق برای سیل رخ داده شده در ماه فروردین ۱۳۹۸ (مارس ۲۰۱۹) با مطالعه حاضر (FPI=0.17) قابل مقایسه می‌باشد. در مطالعه صورت گرفته توسط Rezvani Faezifar et al. (2022) شاخصه‌های دیگر سیل از قبیل سری زمانی بارش و TWS و همچنین بررسی روند کلی و سالیانه و تغییرات آن‌ها بررسی نشده‌اند. درحالی‌که در تحقیق حاضر مشاهدات مقادیر به‌دست آمده از این منابع داده‌ها در کنار شاخص FPI به منظور امکان وقوع سیل سال ۲۰۱۹ و سایر سیل‌های رخ داده شده در منطقه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. دربخش بعدی بعنوان مطالعه موردی سیل سال ۲۰۱۹ با جزییات بیشتر تجزیه و تحلیل شده است.

۳-۷- بررسی و تجزیه و تحلیل روند کلی و روند فصلی FPI

در ادامه پژوهش، FPI به روند کلی و روند فصلی تجزیه گردید. شکل ۱۷ اطلاعات مربوط به آن را نشان می‌دهد.

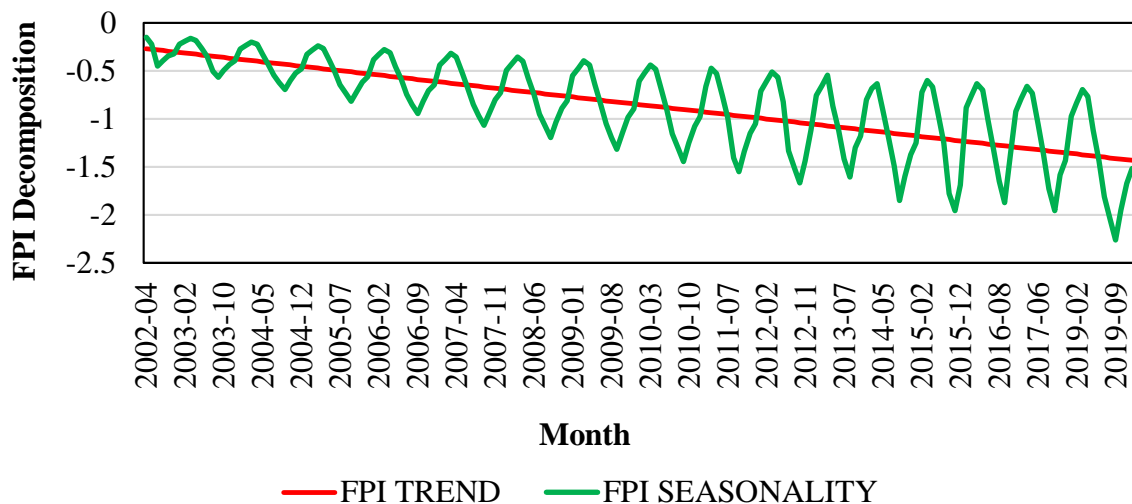


Fig. 17- Linear and seasonal trend of FPI decomposition

شکل ۱۷- روند خطی و فصلی تجزیه FPI

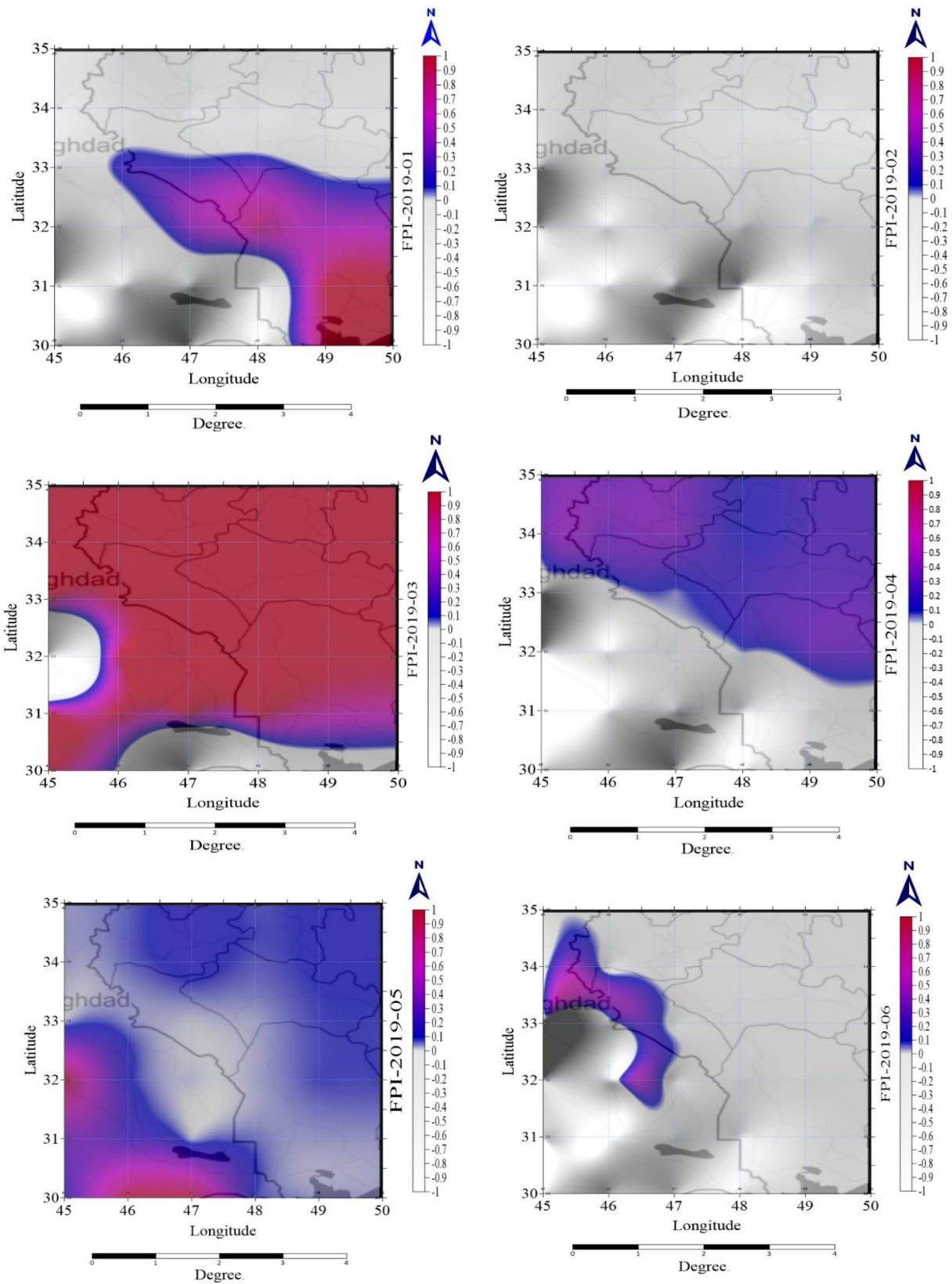


Fig. 18- Variations of FPI during the first six months of 2019
شکل ۱۸- تغییرات شاخص پتانسیل سیل FPI در طول شش ماهه اول سال ۲۰۱۹

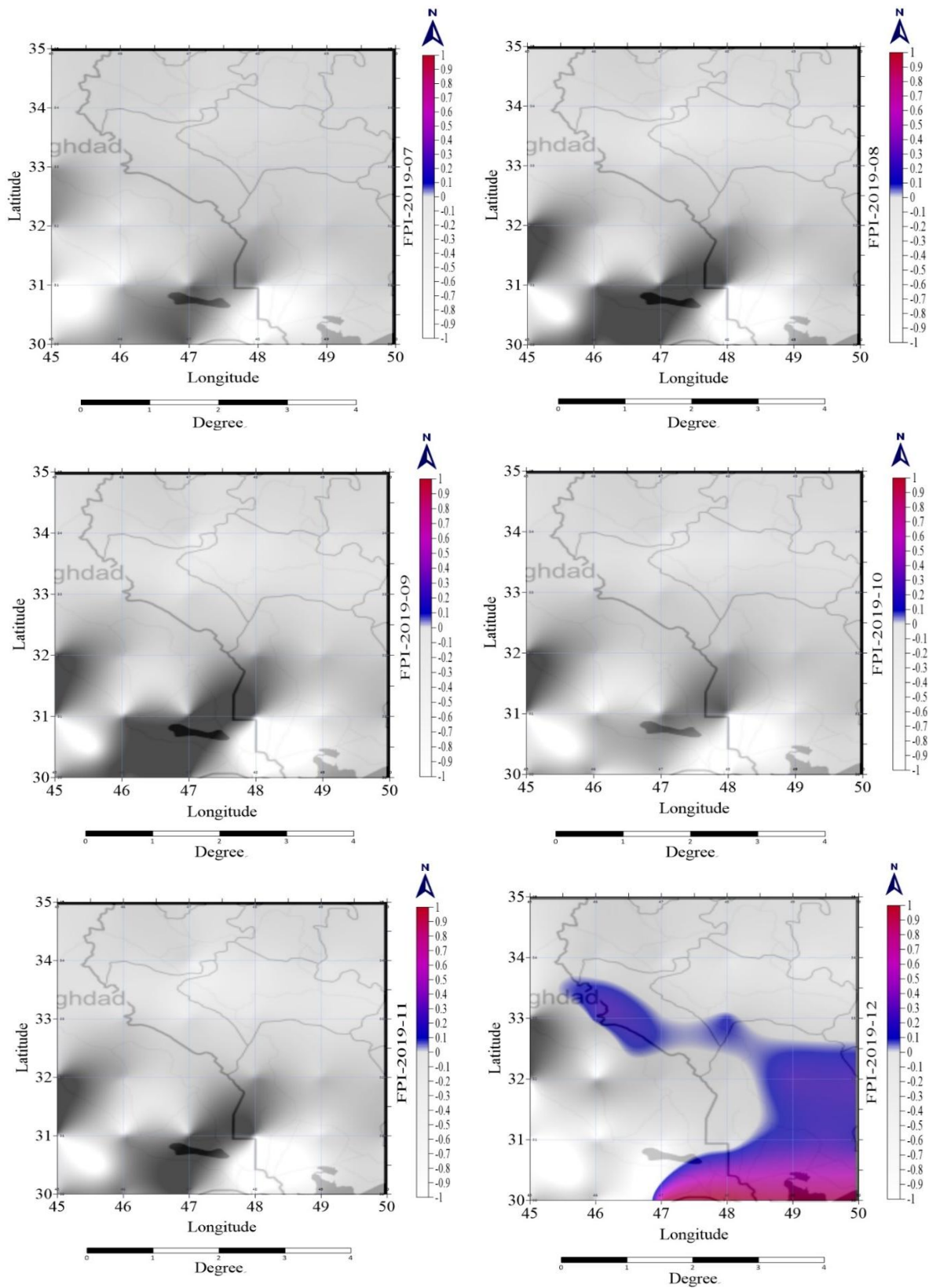


Fig. 19- Variations of FPI during the second half of 2019
شکل ۱۹- تغییرات شاخص پتانسیل سیل FPI در طول شش ماهه دوم سال ۲۰۱۹

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این پژوهش شرایط هیدرولوژیکی و وقوع سیلاب در غرب و جنوب غربی کشور که به صورت تقریبی برای چهار استان کشور شامل خوزستان، لرستان، کرمانشاه و ایلام و نیز بخش‌هایی از استان همدان و اصفهان و همچنین بخش‌هایی از کشور عراق در محدوده‌ی طول‌های جغرافیایی ۴۵ الی ۴۹ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۳۰ الی ۳۵ درجه برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین صورت که ابتدا با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق سنجنده MODIS، داده‌های میزان رواناب مدل هیدرولوژی GLDAS و داده‌های بارشی ماهواره TRMM، میزان آنومالی ذخیره‌کلی آب‌زمینی (TWSA) به دست آمده از ماهواره‌های ثقل‌سنجی GRACE و GRACE FO مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. سپس داده‌های TWS ارزیابی شده به همراه داده‌های بارشی ماهواره TRMM، برای محاسبه شاخص پتانسیل سیل (FPI) از سال ۲۰۰۲ تا اواخر سال ۲۰۱۹ به کار گرفته شدند. نتایج به دست آمده از این بررسی به طور خلاصه به شرح زیر است:

۱- اعتبارسنجی داده‌های GRACE و GRACE FO نشان داد که داده‌های نسل جدید ماهواره GRACE یعنی GRACE FO دارای ضریب اطمینان بالاتر و پیچیدگی کمتری نسبت به داده‌های نسل قبلی خود است؛

۲- سری‌های زمانی TWSA و TRMM، ویژگی‌های فصلی مشخص و مشابه اما با تأخیر زمانی یک‌ماهه را نشان می‌دهند و افزایش بارندگی تأثیرات خود را در آنومالی TWS ماه بعدی نشان می‌دهد. با توجه به روند تغییرات TWS مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر آن میزان بارش است که پیک آن در دو ماه انتهایی زمستان و دو ماه اول بهار در هر سال است. روند خطی آنومالی TWS نشان از کاهش ۹۰ میلی‌متری در طی سال در منطقه مورد مطالعه است که نشان از خشک شدن منطقه از سال ۲۰۰۲ الی ۲۰۱۹ به میزان ۱۵ سانتی‌متر است؛

۳- با توجه به شاخص پتانسیل سیل به دست آمده از TWS و میانگین بارش ماهانه به دست آمده از ماهواره TRMM، بسیاری از سیل‌های مخرب رخ داده در طی بازه زمانی پژوهش شناسایی گردید و این بیانگر این است که شاخص FPI می‌تواند یک معیار نسبتاً قابل اعتماد جهت بررسی و پایش این رخداد باشد.

داده‌های TWSA به دست آمده از GRACE و GRACE FO به طور گسترده در دسترس هستند و می‌توانند به راحتی برای ارزیابی هیدرولوژیکی در مناطق با مقیاس بزرگ استفاده شوند. این داده‌ها

برای ارزیابی‌های هیدرولوژیکی در مناطق کوچک‌تر ممکن است دقت کمتری داشته باشند. با این وجود، روش پیشنهادی در این مطالعه یک جایگزین مناسب برای داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مناطق بزرگی است که ایستگاه‌های مشاهداتی وجود ندارند و یا کم هستند، و استفاده از این روش می‌تواند وضعیت‌های هیدرولوژیکی را کارآمدتر و راحت‌تر ارزیابی کند. علاوه بر این، مطالعات قبلی نشان داده‌اند که داده‌های ماهواره GRACE پتانسیل بالایی در تشخیص و تجزیه و تحلیل رویدادهای هیدرولوژیکی دارند و در بهبود پیش‌بینی سیل ارزشمند هستند. با توسعه نسل بعدی ماهواره‌های GRACE، نظارت بر شرایط TWS و دینامیک سیل در مقیاس‌های مختلف امکان‌پذیر خواهد بود. از سوی دیگر، اگرچه شاخص FPI نمی‌تواند رویدادهای سیل را به طور کامل شناسایی کند، اما مرجع مفیدی برای مطالعات سیل بر اساس داده‌های GRACE و GRACE FO را فراهم می‌کند.

در انتها، با توجه به دقت متفاوت داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های هیدرولوژی در حوزه بارش و سیلاب، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از سایر داده‌های با دقت و کیفیت متفاوت جهت محاسبه شاخص پتانسیل سیل و پیش‌بینی سیلاب استفاده گردد. همچنین با توجه به اینکه در این مطالعه فرایند اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌های GRACE و GRACE FO صرفاً با استفاده از داده‌های فضایی انجام گردیده است پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی جهت سنجش دقت و همچنین انجام محاسبات مربوطه از اطلاعات زمینی در نقاطی که ایستگاه‌های جمع‌آوری داده‌های زمینی به اندازه کافی وجود دارد استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Total Water Storage
- 2- Gravity Recovery and Climate Experiment
- 3- Gravity Recovery and Climate Experiment Follow On
- 4- Flood Potential Index
- 5- Tropical Rainfall Measuring Mission
- 6- Modified Drought Severity Index
- 7- MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer
- 8- Global Land Data Assimilation System
- 9- Flood Potential Index
- 10- Load Love Number of Degree 1
- 11- Water Budget Equation
- 12- Total Water Storage Anomaly
- 13- Flood Potential Amount

۵- مراجع

- Ahmadzadeh H, Saeed abadi R, Noori A (2015) Investigation and zoning of flood-prone areas using the method of urban floods (case study: Mako city). *Hydrogeomorphology* 1(2):1-23(In Persian)
- Azari H, Motakan A, Shakiba A, Poorali H (2009) Flood simulation and warning by integrating hydrologist models in GIS and estimating precipitation through remote sensing. *Iranian Journal of Geology* 3(9):39-51 (In Persian)
- Beaudoing H, and Rodell M (2016) GLDAS Noah land surface model L4 monthly 0.25 x 0.25 degree V2. 1. Greenbelt, Maryland
- Educational Research and Planning Organization (2003) *Geography of Khuzestan province, Iran*. Textbook Publishing Company, Tehran, 1(1):2-3 (In Persian)
- Farokhnia A and Morid S (2014) Assessment of GRACE and GLDAS capabilities for estimation of water balance in large scale areas, a case study of Urmia Lake Watershed. *Iran-Water Resources Research* 10(1):51-62 (In Persian).
- Flechtner F, Morton P, Watkins M, and Webb F (2014) Status of the GRACE follow-on mission In *Gravity, Geoid and Height Systems*. Proceedings of the IAG Symposium GGHS2012, Venice, Italy, Springer International Publishing 12(3):117-121
- General Directorate of Meteorology of Khuzestan Province (2016) Department of applied research of Khuzestan Province, *Geographical and Climatic Characteristics of Khuzestan Province* 1(1):1-16 (In Persian)
- Geographical Organization of the Armed Forces (2006) *Atlas of Iran's Borders*, Tehran, Geographical Organization Publications (limited and domestic publication) 1(3):1-68 (In Persian)
- Ghasemi A, Haji Babaei E, Shamsai A (2013) Flood management and forecasting and warning system. National Flood Management Conference, Tehran (In Persian)
- Hosseini Moghari SM., Araghinejad S, and Ebrahimi K (2019) Application of GRACE satellite observations in drought monitoring (Case Study: Markazi Basin, IRAN). *Iran-Water Resources Research* 15(1):92-103 (In Persian)
- Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, and Nelkin EJ (2010) The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* 8(1):3-22
- Jafari A (1999) *Geology of Iran, Iran's Rivers and Rivers*. Tehran, Gitashenasi 2(2):29-30 (In Persian)
- Joodaki Gh (2014) Earth mass change tracking using GRACE satellite gravity data. PhD Thesis, Faculty of Engineering and Technology, Norwegian University of Science and Technology.
- Kawanishi T, Kuroiwa H, Kojima M, Oikawa K, Kozu T, Kumagai H, Okamoto KI, Okumura M, Nakatsuka H and Nishikawa K (2000) TRMM precipitation radar. *Advances in Space Research* 25(5):969-972
- Kornfeld RP, Arnold BW, Gross MA, Dahya NT, Klipstein WM, Gath PF and Bettadpur S (2019) GRACE-FO: the gravity recovery and climate experiment follow-on mission. *Journal of Spacecraft and Rockets* 56(3):931-951
- Landerer FW, Swenson SC (2012) Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research* 48(3):1-11
- Long D, et al. (2015) Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China's Yangtze River Basin. *Remote Sensing of Environment* 168(1):177-193
- Molodtsova T, Molodtsov S, Kirilenko A, Zhang XD, VanLooy J (2016) Evaluating flood potential with grace in the united states. *Natural Hazards and Earth System Science* 16(1):1011-1018
- Mu Q, Zhao M, and Running SW (2013) MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document, Collection 5(1):600
- Nahazi G (1999) Water crisis in the Middle East. Tehran, Middle East Strategic Studies Center 2-3(14) (In Persian)
- National Mapping Agency, *Geological Atlas of Iran* (2002) Second edition, Chapter 1, Tehran: Country Mapping Organization (Management and Planning Organization of the Country) 2(1):9 (In Persian)
- Oliveira P, et al. (2014) Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resources Research* 50(9):7100-7114
- Rahman M, Di L (2017) The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management. *Natural Hazards* 85(2):1223-1248
- Reager J, Famiglietti J (2009) Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE. *Geophysical Research Letters* 36(23)
- Rezvani Faezifar R, Safari R, Ramouz S (2022) Feasibility study of forecasting the flood occurrence using GRACE satellite gravity data in the Karun river basin. *Iranian Journal of Geophysics* 16(1):7 (In Persian)

- Sun Z, et al. (2017) Assessing terrestrial water storage and flood potential using GRACE data in the Yangtze River basin, China. *Remote Sensing* 9(10):1011
- Tapley BD, Bettadpur S, Ries JC, Thompson PF ,and Watkins MM (2004) GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science* 305(5683):503-505
- Tapley BD, Watkins M M, Flechtner F, Reigber C, Bettadpur S, Rodell M, Sasgen I, Famiglietti JS, Landerer FW, Chambers DP and Reager JT (2019) Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change* 9(5):358-369
- Wahr J, et al. (1998) Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103(B12):30205-30229
- Xiao C, Zhong Y, Feng W, Gao W, Wang Z, Zhong M and Ji B (2022) Monitoring the catastrophic flood with GRACE-FO and near-real-time precipitation data in northern Henan Province of China in July. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 16:89-101
- Yang P, Wang W, Zhai X, Xia J, Zhong Y, Luo X, Zhang S and Chen N (2022) Influence of terrestrial water storage on flood potential index in the Yangtze River Basin, China. *Remote Sensing* 14(13):3082
- Zhang B, Xu D, Liu Y, and Chen H (2015) Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 31(6):8-16
- Zhang J, Liu K, and Wang M (2023) Flood detection using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Terrestrial water storage and extreme precipitation data. *Earth System Science Data* 15(2):521-540