

امکان سنجی پیش‌بینی وقوع سیل با استفاده از داده‌های گرانشی ماهواره‌ای GRACE در حوضه آبریز رود کارون

رحیم رضوانی فائزی^{۱*}، عبدالرضا صفری^۲، عباس بحرودی^۳ و صباح راموز^۱

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری گرایش ژئودزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲)

چکیده

سیل یکی از وقایع طبیعی است که خسارت‌های جانی، مالی و زیست‌محیطی فراوانی بر جای می‌گذارد. بررسی وضعیت ذخیره آب زمینی (TWS) در حوضه‌های آبریز برای کاهش تأثیرات این خسارت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. TWS عبارت است از مجموع تمام ذخایر آب‌های زیر و روی سطح زمین. این آب‌ها شامل آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب‌های زیرزمینی، برف، یخ و آب‌های موجود در گیاهان است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های آنومالی ذخیره آب زمینی (TWSA) حاصل از داده‌های جفت‌ماهواره GRACE ظرفیت ذخیره‌سازی حوضه آبریز محاسبه شد سپس با استفاده از آن و همچنین داده‌های بارش ماهانه که از داده‌های پروژه جهانی اقلیم بارندگی (GPCP) به‌دست آمده است، شاخص پتانسیل سیل (FPI) برای پتانسیل وقوع سیل محاسبه و از آن برای ارزیابی پتانسیل وقوع سیل استفاده شد. هرچه مقدار FPI به عدد یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع سیل، بیشتر افزایش می‌یابد. با توجه به سیلاب‌های رخ داده در فروردین ماه ۱۳۹۸، نتایج این شاخص در حوضه آبریز رود کارون در بازه زمانی ماه اکتبر ۲۰۱۸ تا ماه اوت ۲۰۱۹ بررسی شده است. مقادیر FPI در ماه مارس (FPI=۰/۲۱) و آوریل (FPI=۰/۴۲) نشان‌دهنده وقوع سیل در این ماه‌ها است. همچنین در برخی موارد ممکن است FPI افزایش پیدا کند و به‌اشتباه سیل تشخیص داده شود. همچنان که در بازه زمانی مورد بررسی، FPI در ماه‌های مه (FPI=۰/۶۸) و ژوئن (FPI=۰/۲۷) مثبت بوده اما سیلی رخ نداده است؛ بنابراین به‌طور قطعی نمی‌توان اظهار کرد که این شاخص به‌تنهایی می‌تواند سیل را پیش‌بینی کند و به اطلاعات مکمل با استفاده از منابع و روش‌های دیگر برای پایش و پیش‌بینی دقیق‌تر سیلاب‌ها نیاز است.

واژه‌های کلیدی: سیل، پیش‌بینی، آنومالی ذخیره آب زمینی، گریس، شاخص پتانسیل سیل، کارون

۱ مقدمه

سیل یکی از حوادث طبیعی است که باعث خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود. ارزیابی سیل نقش مهمی در تدوین برنامه‌های کاهش بحران دارد و برای کاهش تأثیر فجایع ناشی از سیل، درک متغیرهای مؤثر بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبرگیر مهم است. عوامل زیادی باعث ایجاد سیل می‌شوند که با مطالعه و بررسی دقیق آنها و فراهم آوردن تمهیداتی مانند ساخت سد و... می‌توان تا حدود زیادی از وقوع آنها جلوگیری کرد. همچنین با پیشرفت علوم گوناگون و مأموریت‌های مختلف ماهواره‌ای هواشناسی، هیدرولوژی، گرانی‌سنجی و... امکان پیش‌بینی سیل با درصد احتمال زیادی فراهم شده است.

با مطالعه و بررسی تغییرات در وضعیت ذخیره آب زمینی (Terrestrial/Total Water Storage, TWS)، می‌توان ظرفیت ذخیره‌سازی یک حوضه آبریز و به‌دنبال آن پتانسیل آن حوضه را برای وقوع سیل بررسی کرد. TWS عبارت است از مجموع تمام ذخایر آب‌های زیر و روی سطح زمین. این آب‌ها شامل آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب‌های زیرزمینی، برف، یخ و آب‌های موجود در گیاهان است (رادل و فامیگلیتی، ۲۰۰۱ و لانگ و همکاران، ۲۰۱۵). تغییرات در ذخایر آب در گیاهان کمتر از سایر اجزای تشکیل‌دهنده TWS است؛ از این رو به‌طور معمول فرض می‌شود که در تحلیل منابع تشکیل‌دهنده TWS از ذخایر آب در گیاهان می‌توان چشم‌پوشی کرد (رادل و همکاران، ۲۰۰۵).

پایش آنومالی TWS با استفاده از روش‌های سنتی و توصیف رویدادهای هیدرولوژیکی شدید بدون داشتن داده‌های کافی چالش مهمی بوده است. روش‌های سنتی استفاده‌شده برای نظارت بر سیلاب‌ها مبتنی بر دسترسی به داده‌های کافی هواشناسی مانند میزان تخلیه و بارندگی است که جمع‌آوری و پردازش این داده‌ها نه تنها زمان‌بر

است، بلکه تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی نیز هست. این پایش‌های میدانی به هزینه‌های محاسباتی زیاد و منابع مالی فراوانی نیاز دارد. علاوه‌براین، با توجه به اینکه اغلب، توزیع ایستگاه‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی یکنواخت نیست، به‌دست آوردن اطلاعات کافی می‌تواند پیچیده باشد.

از سال ۲۰۰۲ با شروع مأموریت جفت‌ماهواره Gravity Recovery and Climate (GRACE) (Experiment) مشکلات روش‌های سنتی پایش TWS مرتفع شده است. ماهواره GRACE شامل دو ماهواره است که در هفدهم ماه مارس سال ۲۰۰۲ میلادی به فضا پرتاب شد و بعد از گذشت زمان مأموریت اسمی آن که پنج سال بود، باز هم به کار خود ادامه داد تا زمانی که خرابی باتری آن، باعث پایان این مأموریت علمی در سال ۲۰۱۷ شد. دو ماهواره گریس در یک مدار تقریباً دایره‌ای با زاویه میل ۸۹/۵ درجه، پشت سر هم و با فاصله حدودی ۲۰۰ کیلومتر در ارتفاع ۴۵۰-۵۰۰ کیلومتری از زمین قرار دارند. بعد از پایان یافتن مأموریت GRACE در سال ۲۰۱۷، جفت‌ماهواره گریس فالوآن در تاریخ ۲۲ ماه مه سال ۲۰۱۸ میلادی، با همان مأموریت ماهواره گریس به فضا پرتاب شدند. گریس را ناسا و مرکز هوافضای آلمان (DLR) به‌طور مشترک اداره می‌کنند. فاصله میان دو ماهواره در حدود ۲۰۰ کیلومتر است و در هنگام حرکت حول زمین، با تغییر گرانش در محلی که ماهواره از آن عبور می‌کند، تغییر می‌کند که همین موضوع اساس اندازه‌گیری تغییرات گرانش است. مراکز پردازش و ذخیره‌سازی داده‌های مشاهدات ماهواره گریس، فاصله بین دو ماهواره را به ضرایب هارمونیک کروی تبدیل می‌کنند. با استفاده از این ضرایب می‌توان پتانسیل و جاذبه را در یک نقطه اختیاری روی سطح زمین را به‌دست آورد (ماگیونی، ۲۰۱۹). با پردازش داده‌های دریافتی از ماهواره

می‌کند. همچنین استفاده از TWSA مبتنی بر گریس، کاهش هزینه‌های محاسباتی را در پی خواهد داشت (سان و همکاران، ۲۰۱۷).

این مطالعه بر اساس شاخص پتانسیل سیل (Flood Potential Index, FPI) است. ریگر و فامیگلیتی (۲۰۰۹) این شاخص را برای تعریف ظرفیت ذخیره‌سازی کمی حوضه آبریز تعریف کردند. ظرفیت ذخیره‌سازی حوضه آبریز، میزان گنجایش آب را در یک حوضه آبریز بیان می‌کند. ظرفیت ذخیره‌سازی در یک حوضه آبریز عامل بسیار مهمی در مطالعه ویژگی‌های آن حوضه، از جمله تشخیص پتانسیل آن حوضه برای وقوع سیل و در پی آن مهار سیلاب‌ها خواهد بود. با افزایش میزان آب ورودی به حوضه آبریز و رسیدن به میزان بیشینه ظرفیت ذخیره‌سازی، آن حوضه به حالت اشباع در خواهد آمد و مستعد وقوع سیل خواهد شد. برای محاسبه شاخص FPI، از اختلاف بین بارش و TWSA به دست آمده از گریس استفاده می‌شود. پتانسیل سیل را می‌توان مقدار آب بیش از ذخیره احتمالی آب تفسیر کرد (ریگر و فامیگلیتی، ۲۰۰۹).

مفهوم پتانسیل سیل، برای برجسته کردن اطلاعات مربوط به سیل‌های منطقه‌ای در مقادیر زیاد TWSA معرفی می‌شود. این مقادیر از ماهواره گریس به دست آمده‌اند. اگر مقدار TWSA به مقدار بیشینه نزدیک باشد، می‌تواند نشان‌دهنده وقوع سیل در چند ماه آینده باشد. از مفهوم پتانسیل سیل در چندین مطالعه برای تجزیه و تحلیل خطر وقوع سیل در حوضه‌های آبریز مختلف جهان استفاده شده است (ماگیونی، ۲۰۱۹). مولتسوا و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی پتانسیل سیل در ایالات متحده آمریکا با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE پرداختند. آنها در مقاله خود اثربخشی FPI در ارزیابی خطر سیل را در قاره آمریکا بررسی کردند و با استفاده از مشاهدات سیل‌های چند ساله از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ که سازمان زمین‌شناسی

GRACE می‌توان پتانسیل گرانشی زمین را ترسیم و با به‌کارگیری این نقشه‌های گرانشی، تغییرات جهانی و منطقه‌ای ذخایر آب زمینی را بررسی کرد. تغییرات ماهانه آتومالی ذخیره آب زمینی (Terrestrial/Total Water Storage Anomaly, TWSA) را بر اساس هارمونیک‌های کروی RL06 در سه مجموعه داده، شامل مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس (Center for Space Research at the University of Texas, CSR Jet Propulsion Laboratory, JPL) و مرکز تحقیقات جغرافیایی پوتسدام در آلمان (Geo Forschungszentrum, GFZ)، در اختیار کاربران این سامانه قرار می‌دهد (گوپتا و دانا، ۲۰۲۰). ضرایب هارمونیک کروی درجه دو (C_{20}) با مشاهدات فاصله‌یابی لیزری ماهواره‌های ژئودتیک (Satellite SLR Laser Ranging) جایگزین شده‌اند؛ زیرا ضریب C_{20} به دست آمده از داده‌های گریس، به علت هندسه مدار ماهواره‌های گریس که نسبت به این ضریب حساسیت کمتری دارد، دقت خوبی ندارد (ژو و همکاران، ۲۰۱۶). برای حذف خطای نواری، یک فیلتر دیگر نیز به داده‌ها با شعاع میانگین گاوسی ۳۰۰ کیلومتر اعمال شده است تا اثر خطاهای همبسته و واریانس سیگنال به حداقل برسد (رادل و همکاران، ۲۰۰۵). زوج ماهواره GRACE تغییرات میدان گرانش زمین را با توان تفکیک مکانی چند صد کیلومتر و توان تفکیک زمانی در حدود یک ماه اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های حاصل از این ماهواره تحول چشمگیری در تحقیقات مربوط به منابع آب جهان در زمین، یخ‌ها، اقیانوس‌ها و همچنین تأثیر آنها بر زمین‌لرزه‌ها و تغییر شکل پوسته ایجاد کرده است. معرفی TWSA مبتنی بر داده‌های ماهواره GRACE ابزاری جدید برای پایش سیل فراهم کرده که هم سریع است و هم می‌تواند منطقه بزرگی را پوشش دهد. علاوه بر این بسیاری از محدودیت‌هایی را حذف می‌کند که جو آنها را تحمیل

ایالات متحده (USGS) و رصدخانه سیل دارتموث انجام داده بودند، به بررسی روش کاربردی خود پرداختند و به ارتباط خوبی میان شاخص پتانسیل سیل ریگر و سیل‌های مشاهده‌شده در مقیاس‌های منطقه‌ای و حتی محلی دست پیدا کردند. بررسی آنها نشان داد پیش‌بینی با استفاده از روش FPI رضایت‌بخش است و روش خوبی برای نظارت بر سیل، هم در مقیاس قاره‌ای و هم در مقیاس حوضه‌ای است. این روش به‌ویژه برای حوضه‌های بزرگ رودخانه‌ای مانند حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی که در مناطق مسطح واقع شده‌اند، بسیار خوب عمل می‌کند. همچنین آنها در مطالعه خود برای ارزیابی بیشتر کاربرد این روش، سیل ناشی از یک رویداد بارشی شدید را در حوضه رودخانه ژوبا-شابل در اکتبر ۲۰۰۶ بررسی کردند که یک حوضه ۷۸۳۰۰۰ کیلومتر مربعی مشترک بین سومالی و اتیوپی است. آن مطالعه نشان داد شاخص FPI به‌درستی این سیل را یک ماه قبل از وقوع آن پیش‌بینی کرده است (ملتسوا و همکاران، ۲۰۱۵). وانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از آنومالی ذخیره آب زمینی مبتنی بر داده‌های GRACE و مشاهدات بارندگی داده‌های ماهواره‌ای مأموریت سنجش بارندگی گرمسیری (TRMM)، به ارزیابی سیل‌های منطقه‌ای در افغانستان پرداخته‌اند. نتایج نشان داد با استفاده از این روش، تخمین ذخیره آب زمینی و پتانسیل سیل بهبود یافته است. ایشان شاخص پتانسیل سیل را با ترکیب داده‌های ماهواره GRACE و TRMM محاسبه و نتایج مطالعه خود را با مرکز ملی هواشناسی چین (National Climate Center of China, NCCC) مقایسه کردند و نشان دادند نتایج از نظر زمانی و مکانی با یکدیگر سازگار هستند. سان و همکاران (۲۰۱۷) ذخایر آب زمینی و پتانسیل سیل را با استفاده از داده‌های گریس در حوزه رودخانه یانگ تسه چین مطالعه کردند. آنها در مقاله خود FPI را با استفاده از TWSA مبتنی بر داده‌های گریس و همچنین داده‌های

هیدرولوژی مانند میزان بارندگی ماهانه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ محاسبه و بر مبنای آن، شاخص خطر وقوع سیل را در این رودخانه مطالعه کردند. در این مطالعه نشان داده شد برآوردها از ذخیره آب زمینی مبتنی بر داده‌های ماهواره گریس، که برای محاسبه FPI استفاده می‌شود، برای پیش‌بینی سیل حیاتی هستند. سیل سال ۲۰۱۰ که مهم‌ترین فاجعه در طول دوره مطالعه بود، با FPI پیش‌بینی شده است. طبق تحقیقات آنها، FPI می‌تواند تغییرات شدید هیدرولوژیکی را با اعتماد زیادی ارزیابی کند (سان و همکاران، ۲۰۱۷). گوپتا و دانا (۲۰۲۰) کاربرد تخمین ذخایر آب زمینی مبتنی بر داده‌های ماهواره GRACE را برای نظارت بر حوادث سیل در رودخانه‌های شبه‌جزیره هند بررسی کردند که منطقه‌ای با ناهمگونی هیدرولوژیکی زیاد است. در این مطالعه با استفاده از تخمین ذخیره آب زمینی از داده‌های ماهواره گریس و داده‌های بارندگی و دما از اداره هواشناسی هند (India Meteorological Department, IMD) و سیل‌های گزارش‌شده، پتانسیل سیل در شش حوضه بزرگ رودخانه بررسی شده است. این حوضه‌ها ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاصی دارند. در مطالعه یادشده، پتانسیل سیل برای این حوضه‌های بزرگ در شبه‌جزیره هند با استفاده از شاخص پتانسیل سیل ریگر ارزیابی و میزان کارایی روش FPI برای این حوضه‌ها برای دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ بررسی شده است. نتایج حاکی از تغییرات چشمگیر در ذخیره آب زمینی و برآورد FPI از این حوضه‌ها است که نشان‌دهنده رفتار متنوع هیدرولوژیکی حوضه‌ها است. حوضه ماهانادی مقادیر FPI مثبت بسیار بزرگی را نشان می‌دهد که بیانگر سیل است و حوضه کاوروی مقادیر منفی FPI را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده خشکسالی است. بر مبنای این بررسی، FPI ویژگی‌های مستعد سیل و خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را تأیید می‌کند (گوپتا و دانا، ۲۰۲۰).

این مجموعه داده جدید را برای حذف ناهماهنگی‌های منطقه‌ای و ایجاد یک شاخص پتانسیل سیل جهانی نرمالیزه کردند. مقدار پتانسیل سیل حاصل، مقدار آب ورودی است که بیش از ظرفیت ذخیره‌سازی آب زمینی برای ماه جاری بر اساس بیشینه آنومالی ذخیره‌سازی آب منطقه مشاهده شده است. بر اساس مدل سنتی باکت، وقتی این مقدار از صفر تجاوز می‌کند، احتمال بروز سیل وجود دارد. مدل باکت، پتانسیل و تلفات واقعی آب را با تبخیر و به‌روزرسانی سطح آب در یک A سطح ساده به نمایش می‌گذارد که نشان‌دهنده ذخیره رطوبت خاک است. مدل با استفاده از این سطح در سطح، نفوذ و رواناب را محاسبه می‌کند (مگیونی، ۲۰۱۹ و ریگر و فمیگلیتی، ۲۰۰۹).

پس از انتخاب منطقه مطالعاتی و بازه زمانی مورد نظر، برای محاسبه شاخص پتانسیل سیل مراحل زیر انجام خواهد شد:

در ابتدا داده‌های ذخیره آب زمینی مبتنی بر داده‌های گریس از مراکز پردازش داده این ماهواره استخراج می‌شود. در این مطالعه از داده‌های سطح سوم RL06 از مجموعه داده‌های GRACE Tellus استفاده شده است (<http://grace.jpl.nasa.gov>) که به‌صورت ارتفاع معادل آب با توان تفکیک زمانی یک ماه و توان تفکیک مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ جغرافیایی بیان شده است. سپس از این داده‌ها برای محاسبه ظرفیت حوضه آبریز استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، در ابتدا به محاسبه S_{def} پرداخته شده است که بیانگر کمبود آب تا ظرفیت کامل یک حوضه آبریز است. این پارامتر با استفاده از داده‌های TWSA محاسبه می‌شود و یک پتانسیل را برای پیش‌بینی سیل ایجاد می‌کند. پارامتر S_{def} برای هر ماه با رابطه (۱) محاسبه می‌شود (ریگر و فمیگلیتی، ۲۰۰۹؛ مولتسوا و همکاران، ۲۰۱۵؛ سان و همکاران، ۲۰۱۷ و گوپتا و دانا، ۲۰۲۰):

$$S_{def}(t) = S_{MAX} - S(t - 1) \quad (1)$$

که S_{MAX} بیشینه مقدار آنومالی ذخیره آب زمینی در سری

با توجه به کارایی روش یادشده، این روش در حوضه آبریز رود کارون به‌منظور ارزیابی احتمال وقوع سیل در این منطقه به‌کار گرفته شد. در فروردین ماه سال ۱۳۹۸ در حوضه آبریز کارون سیل‌های وسیعی رخ داد که خسارات فراوانی را نیز در پی داشت. در این مطالعه با استفاده از داده‌های ماهواره گریس و شاخص FPI به بررسی وضعیت و شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز رود کارون و سیل‌های رخ داده در این حوضه پرداخته می‌شود. انتظار می‌رود که استفاده از FPI برای ارزیابی موارد هیدرولوژیکی، روزه‌های جدیدی را برای مدیریت منابع آب در این منطقه آشکار کند و مرجعی مفید برای مطالعات سیل باشد.

۲ روش مطالعاتی

روش پیشنهادی در این پژوهش بر اساس شاخص پتانسیل سیل ریگر و فمیگلیتی (۲۰۰۹) مبتنی بر داده‌های GRACE است که این شاخص مبنایی برای بررسی میزان خطرپذیری منطقه مورد نظر خواهد بود. این شاخص از پارامترهای زیر به‌دست خواهد آمد:

- داده‌های TWSA که از مشاهدات ماهواره GRACE به‌دست خواهند آمد؛

- اطلاعات میزان بارش ماهانه حاصل از داده‌های GPCP.

ریگر و فمیگلیتی (۲۰۰۹) فرض کردند ظرفیت ذخیره آبی منطقه‌ای را می‌توان با رکورد تاریخی بیشینه آنومالی TWS به‌دست آمده از ماهواره گریس در سری زمانی مورد نظر تخمین زد تا برآوردی کمی (به سانتی‌متر) از نقطه اشباع سطح زمین ارائه دهد. به‌طور خلاصه، می‌توان از سری‌های زمانی گریس برای محاسبه حداکثر ظرفیت ذخیره آب زمینی در هر منطقه استفاده کرد. ریگر و فمیگلیتی (۲۰۰۹)، از نظر زمانی و مکانی، ماه‌هایی را به‌دست آوردند که درصد ظرفیت ذخیره‌سازی در آنها زیاد است یا بارندگی زیاد ادامه دارد. در نهایت، ایشان

از GPCP، نوبت به تعریف و محاسبه پارامتر FPA می‌رسد؛ زیرا برای محاسبه این پارامتر به داشتن S_{def} و داده‌های بارش ماهانه نیاز است و به این ترتیب می‌توان پارامتر FPA را برای هر ماه با رابطه (۲) به دست آورد (ریگر و فامیگلیتی، ۲۰۰۹؛ موئسوا و همکاران، ۲۰۱۵؛ سان و همکاران، ۲۰۱۷ و گوپتا و دانیا، ۲۰۲۰):

$$FPA(t) = P_{MON} - S_{def}(t) \quad (2)$$

که P_{MON} میزان بارش ماهانه است. مقدار پتانسیل سیل (FPA)، میزان بارندگی بیش از ظرفیت ذخیره‌سازی موجود را تعریف می‌کند و در نتیجه، ممکن است به جاری شدن سیل منجر شود.

احتمال وقوع سیل زمانی است که FPA مقدار مثبتی داشته باشد؛ بنابراین پارامتر FPA، ورودی مرحله بعد است که مرحله نهایی، یعنی محاسبه شاخص پتانسیل سیل است. FPA با بیشینه‌هایش در طول دوره مطالعه نرمال می‌شود تا تغییرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای برای هر شبکه محاسبه شود سپس با استفاده از آن، شاخص پتانسیل سیل (FPI) با رابطه (۳) به دست خواهد آمد (ریگر و فامیگلیتی، ۲۰۰۹؛ موئسوا و همکاران، ۲۰۱۵؛ سان و همکاران، ۲۰۱۷ و گوپتا و دانیا، ۲۰۲۰):

$$FPI = \frac{FPA(t)}{\max[FPA(t)]} \quad (3)$$

مقدار FPI نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد. هرچه مقدار FPI به یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع سیل بیشتر است.

۳ مطالعه موردی: حوضه آبریز رود کارون

حوضه آبریز رود کارون، یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز درجه یک خلیج فارس و دریای عمان است. حوضه آبریز رود کارون با مساحت ۶۷۲۹۷ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین حوضه آبریز در کشور ایران است که در کوه‌های میانی رشته‌کوه زاگرس و در محدوده جغرافیایی ۴۸-۵۲ درجه شرقی و ۳۴-۳۰ درجه شمالی واقع شده

زمانی مورد نظر است و $S(t-1)$ آنومالی ذخیره آب زمینی (TWSA) ماه قبل از ماه جاری است که نشان‌دهنده شرایط اشباع خاک از ماه قبل است. کسری ذخایر S_{def} مقدار آبی است که می‌تواند قبل از رسیدن به S_{MAX} ذخیره شود؛ به عبارت دیگر، بزرگ‌ترین تغییر مجاز ذخایر برای ماه آتی است. S_{def} بیان می‌کند که چه مقدار آب اضافی در یک ناحیه خاص می‌تواند قبل از رسیدن به حداکثر ظرفیت نگهداری شود. این کمیت با استفاده از داده‌های ماه قبل محاسبه می‌شود و یک پتانسیل برای پیش‌بینی ایجاد می‌کند (گوپتا و دانیا، ۲۰۲۰؛ سان و همکاران، ۲۰۱۷؛ ریگر و فامیگلیتی، ۲۰۰۹ و موئسوا و همکاران، ۲۰۱۵).

پس از محاسبه پارامتر S_{MAX} ، داده‌های بارش ماهانه باید استخراج شوند. در این پژوهش برای استخراج و استفاده از داده‌های بارش ماهانه، از داده‌های پروژه جهانی اقلیم بارندگی (GPCP Precipitation Climatology Project,) بارندگی (GPCP استفاده شده است. پروژه جهانی اقلیم بارندگی، پروژه اداره ملی اقیانوسی و جوئی (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) است که یک آژانس علمی آمریکایی در وزارت بازرگانی ایالات متحده است که بر وضعیت اقیانوس‌ها، آبراه‌های بزرگ و جو متمرکز است. در پروژه جهانی اقلیم بارندگی، داده‌ها از ایستگاه‌های اندازه‌گیری باران، ماهواره و مشاهدات اندازه‌گیری شده برای برآورد بارش ماهانه در یک شبکه جهانی ۲/۵ درجه در ۲/۵ درجه از سال ۱۹۷۹ تا زمان حال ادغام شده‌اند. ترکیبی دقیق از برآورد بارش ماهواره‌ای، کامل‌ترین تحلیل باران موجود تاکنون در اقیانوس‌های جهانی را فراهم می‌کند و جزئیات مکانی لازم را به تجزیه و تحلیل میزان بارش در خشکی می‌افزاید.

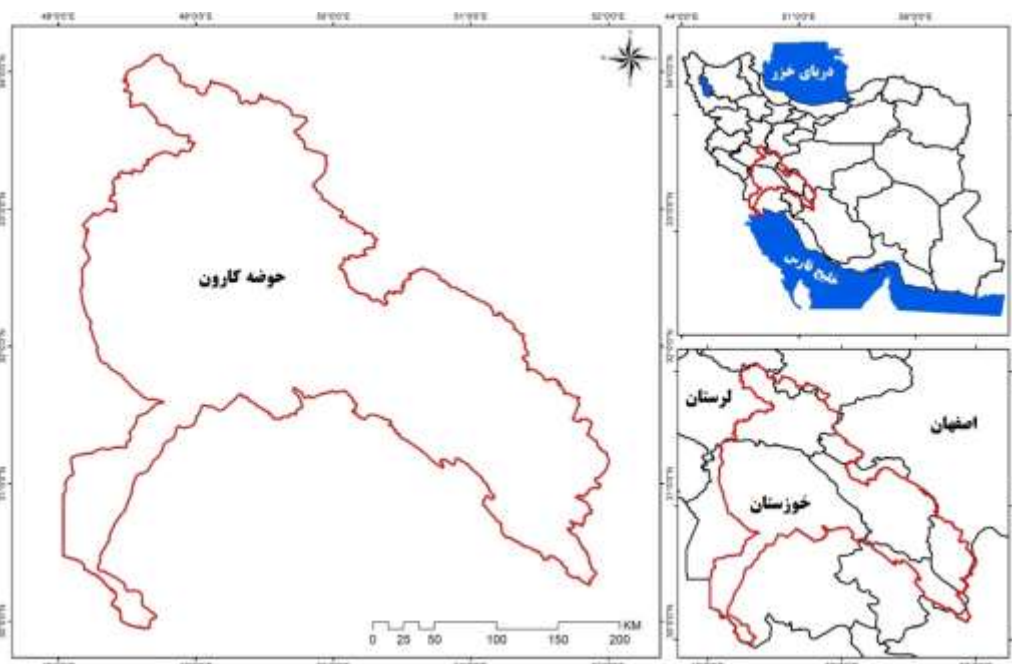
پس از محاسبه پارامتر S_{def} با استفاده از داده‌های TWSA و همچنین استخراج داده‌های میزان بارش ماهانه

در پژوهش حاضر برای انتخاب مناسب‌ترین داده، از داده‌های مبتنی بر GRACE سه مرکز CSR، GFZ و JPL پردازش شده در سلول به ابعاد یک درجه برای محاسبه TWSA استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد از تفاوت این سه دسته داده می‌توان چشم‌پوشی کرد (شکل ۲)؛ بنابراین برای محاسبه TWSA، داده‌های CSR انتخاب شدند.

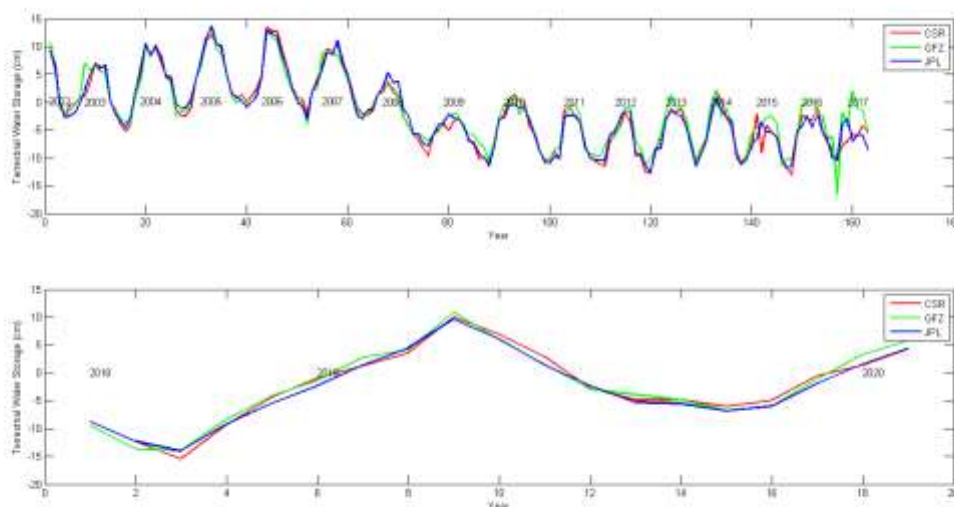
داده‌های TWSA از آوریل ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۷ و از ژوئن ۲۰۱۸ تا فوریه ۲۰۲۰ استخراج شدند. در این مجموعه داده، ماه‌هایی هستند که برای آنها داده وجود ندارد؛ بنابراین داده‌های این ماه‌ها با استفاده از درون‌یابی بازیابی شدند.

داده‌های TWSA در محدوده جغرافیایی ۴۸-۵۲ درجه شرقی و ۳۴-۳۰ درجه شمالی، شامل شانزده سلول $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ است. برای نمونه و به منظور نمایش نتایج مرحله به مرحله استخراج داده‌های تغییرات ذخیره آب زمینی، محاسبه پارامتر S_{def} ، استخراج داده‌های بارش ماهانه و در نهایت، محاسبه پارامتر شاخص پتانسیل سیل در این حوضه، یک

است (عابدی و همکاران، ۲۰۲۰) (شکل ۱). عرض این رودخانه در قسمت‌های کوهستانی بین ۲۵ تا ۴۰ متر و در بالادست دشت اهواز ۲۵۰ تا ۴۰۰ متر است. رودخانه کارون پس از تلاقی رودخانه‌های دز، شطیط و گرگر در منطقه‌ای به نام بند قیر، بالای شهر ملاتانی شکل می‌گیرد (ظهیری و همکاران، ۲۰۲۰). بارش سالانه در این حوضه با توجه به تغییرات مکانی، از ۵۰ تا ۱۸۰۰ میلی‌متر است و یکی از مهم‌ترین منابع آبی واردشده به خلیج فارس و دریای عمان است (عابدی و همکاران، ۲۰۲۰). رودخانه کارون منبع اصلی تأمین آب کشاورزی و آب آشامیدنی چندین شهر و روستا از جمله شهر اهواز است (راست‌منش و همکاران، ۲۰۲۰). تاکنون اغلب برای مدیریت و مهار سیلاب‌ها و همچنین تولید برق و مصارف کشاورزی، سدهای مختلفی از جمله مسجد سلیمان، گتوند و کارون ۱، ۳ و ۴ در حوضه آبریز رود کارون ساخته شده است. در این پژوهش، حوضه آبریز رود کارون منطقه مطالعاتی است.



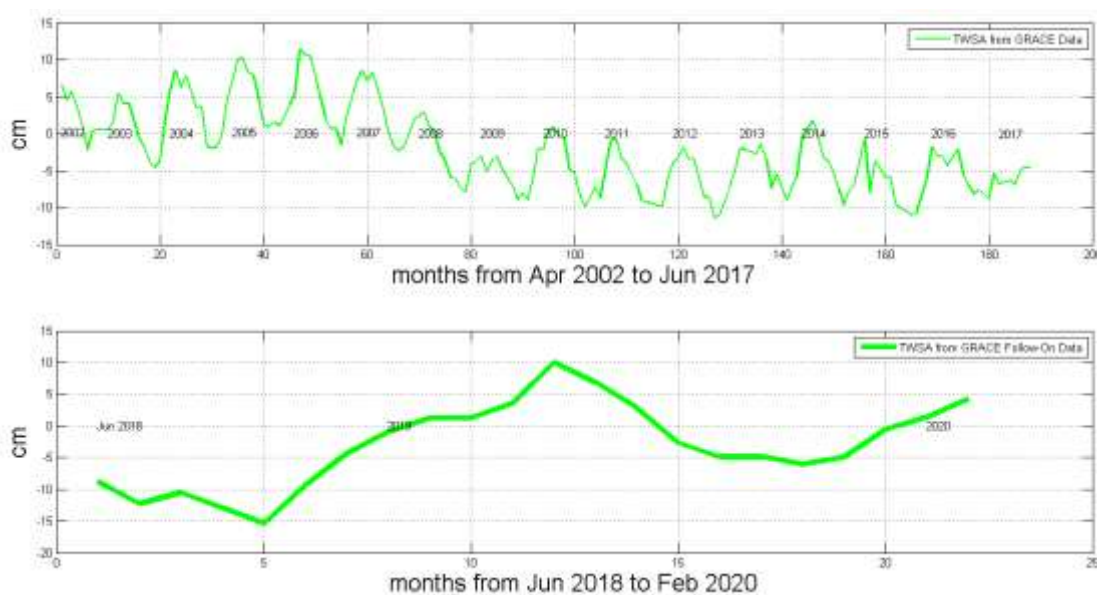
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کارون.



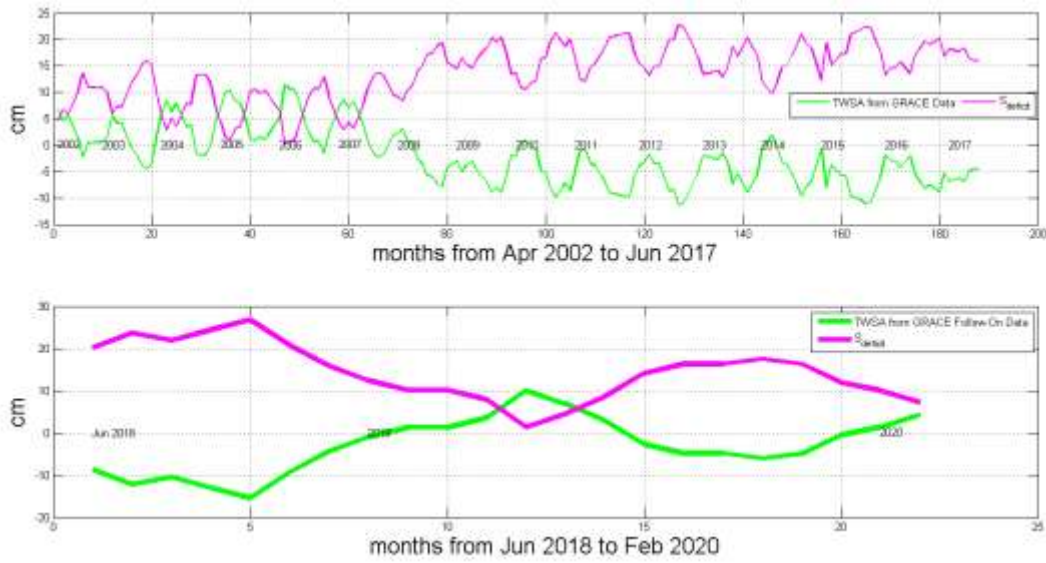
شکل ۲. داده‌های TWSA حاصل از داده‌های ماهواره گریس و گریس فالوآن در گرید با مختصات ۴۸-۴۹ شرقی و ۳۱-۳۲ شمالی.

گرمای یک درجه در یک درجه از این مجموعه، با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ و ۴۸-۴۹ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار TWSA در ماه مارس-آوریل در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ به بیشترین مقدار خود رسیده است.

گرمای یک درجه در یک درجه از این مجموعه، با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ و ۴۸-۴۹ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی بررسی شد. در ادامه، نتایج مرحله به مرحله روش تحقیقاتی در این گرید به نمایش گذاشته می‌شود. این گرید در شهر شوشتر واقع شده است که در سال‌های اخیر، سیل‌های فراوانی در این منطقه رخ داده است.



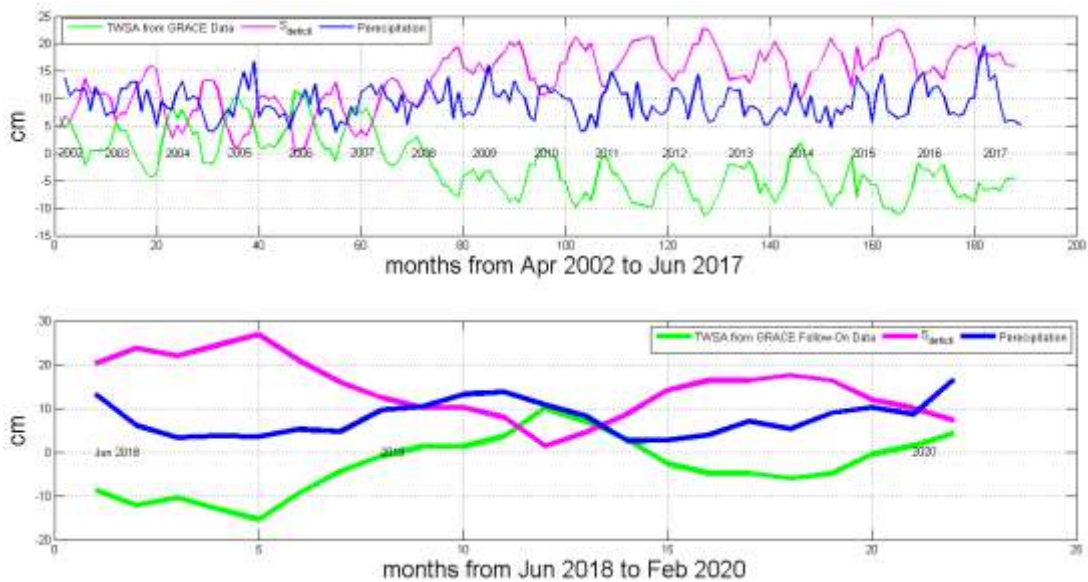
شکل ۳. تغییرات ذخیره آب زمینی (TWSA) به دست آمده از گرید با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ و ۴۸-۴۹ درجه شرقی.



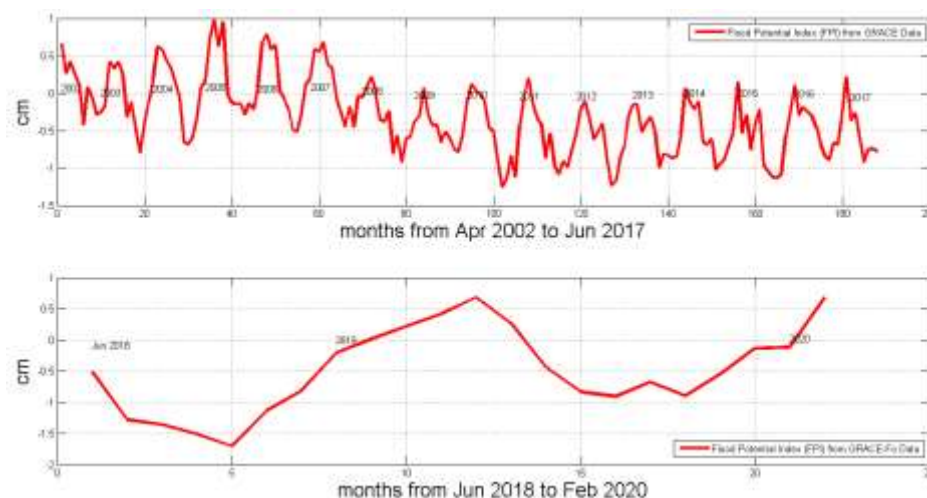
شکل ۴. نتایج مربوط به داده‌های TWSA و پارامتر S_{def} محاسبه‌شده در گرید با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی.

یک درجه در یک درجه هستند؛ بنابراین داده‌های GPCP استخراج‌شده با استفاده از یک الگوریتم تغییر درجه، به شبکه‌های یک درجه در یک درجه تبدیل شد. شکل ۵ نتایج مربوط به داده‌های TWSA و پارامتر S_{def} محاسبه‌شده و داده‌های بارش ماهانه را در گرید مورد نظر نشان می‌دهد.

پس از محاسبه پارامتر S_{def} ، به استخراج داده‌های بارش ماهانه نیاز است. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش برای استخراج و استفاده از داده‌های بارش ماهانه، از داده‌های GPCP استفاده شده است. این داده‌ها در شبکه‌های ۲/۵ درجه در ۲/۵ درجه هستند و داده‌های TWSA استخراج‌شده، به صورت شبکه‌های



شکل ۵. نتایج مربوط به داده‌های TWSA و پارامتر S_{def} محاسبه‌شده و داده‌های بارش ماهانه در گرید با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی.

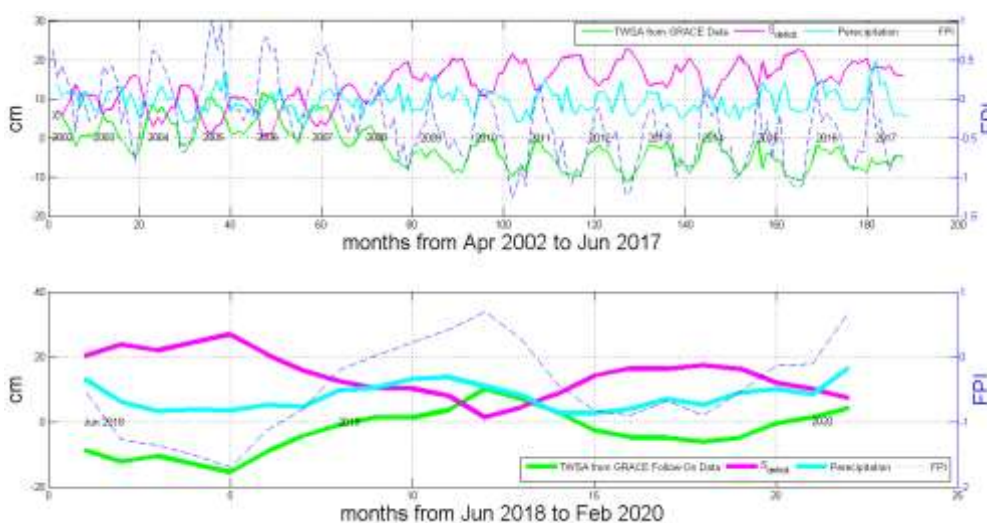


شکل ۶. نتایج مربوط به شاخص پتانسیل سیل محاسبه شده (FPI) در گرید با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی.

به دست خواهد آمد. همان طور که پیش از این گفته شد، مقدار FPI نمی تواند بزرگ تر از یک باشد. هر چه مقدار FPI به یک نزدیک تر باشد، احتمال وقوع سیل بیشتر است. شکل ۶ نتایج مربوط به مقدار FPI در گرید مورد نظر را نشان می دهد.

همچنین برای بررسی دقیق تر نتایج مراحل ذکر شده، شکل ۷ داده های TWSA، پارامتر S_{def} محاسبه شده، داده های بارش ماهانه، مقدار FPA و مقدار FPI را در گرید مورد نظر نشان می دهد.

پس از آنکه پارامتر S_{def} با داده های TWSA، محاسبه و داده های میزان بارش ماهانه از پروژه GPCP استخراج شد، نوبت به تعریف و محاسبه پارامتر مقدار پتانسیل سیل (FPA) خواهد شد؛ زیرا برای محاسبه این پارامتر به داشتن S_{def} و داده های بارش ماهانه نیاز است. مقدار پتانسیل سیل (FPA) با بیشینه های آن در طول دوره مطالعه نرمال می شود تا تغییرات هیدرولوژیکی منطقه ای برای هر شبکه محاسبه شود و سپس شاخص پتانسیل سیل (FPI) از حاصل تقسیم FPA بر $\max[FPA(t)]$



شکل ۷. نتایج مربوط به داده های TWSA، پارامتر S_{def} محاسبه شده، داده های بارش ماهانه، مقدار FPA و مقدار FPI در گرید با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی.

جدول ۱. میزان TWSA، S_{def}، بارش ماهانه، مقدار پتانسیل سیل (FPA)، مقدار شاخص پتانسیل سیل (FPI) با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۹ درجه شرقی در بازه ماه‌های اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹.

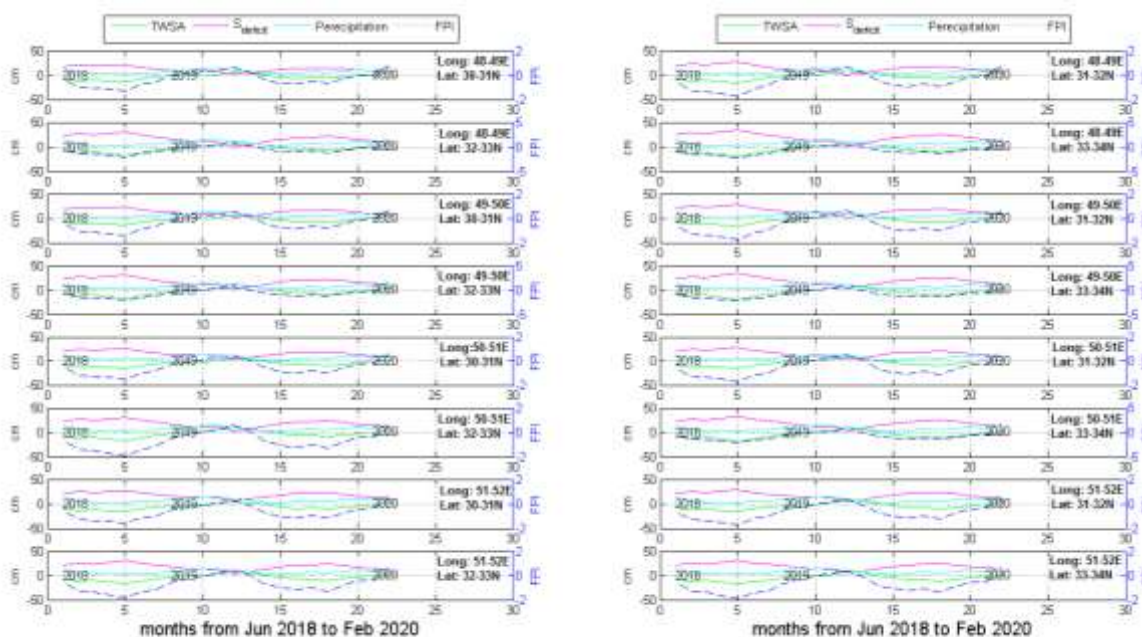
ردیف	ماه	TWSA (cm)	S _{def} (cm)	بارش ماهانه (cm)	FPA	FPI
۱	اکتبر	-۱۵/۴۴	۲۶/۸۶	۰/۳۴۴	-۰/۲۳۴۲	-۱/۷۰
۲	نوامبر	-۹/۳۴	۲۰/۷۶	۰/۵۱۷	-۰/۱۵۵۹	-۱/۱۳
۳	دسامبر	-۴/۳۶	۱۵/۷۹	۰/۴۶۴	-۰/۱۱۱۵	-۰/۸۱
۴	ژانویه	-۰/۹۶	۱۲/۳۸	۰/۹۵۸	-۰/۰۲۸۰	-۰/۲۰
۵	فوریه	۱/۲۵	۱۰/۱۷	۱/۰۳۸	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۵۱
۶	مارس	۱/۲۵	۱۰/۱۷	۱/۳۱۵	۰/۰۲۹۸	۰/۲۱۶۹
۷	آوریل	۳/۵۵	۷/۸۷	۱/۳۶۹	۰/۰۵۸۱	۰/۴۲۳۱
۸	مه	۱۰/۰۲	۱/۴۰	۱/۰۸۵	۰/۰۹۴۵	۰/۶۸۸۱
۹	ژوئن	۶/۹۲	۴/۵۰	۰/۸۲۳	۰/۰۳۷۴	۰/۲۷۱۹
۱۰	ژوئیه	۲/۸۹	۸/۵۳	۰/۲۶۱	-۰/۰۵۹۱	-۰/۴۳۰۵
۱۱	اوت	-۲/۷۰	۱۴/۱۲	۰/۲۶۶	-۰/۱۱۴۶	-۰/۸۳۴۱

۴۸-۴۹ درجه شرقی را در بازه ماه‌های اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹ در حوضه نشان می‌دهد.

در ماه اکتبر ۲۰۱۸ تمام مناطق موجود در حوضه آبریز رود کارون، FPI کم را ثبت کردند؛ زیرا میزان TWSA و میزان بارندگی کم است (شکل ۸). پس از ورود یک جریان مرطوب از ماه اکتبر به بعد، خطر سیل بیشتری در حوضه آبریز رود کارون ایجاد شده است، به طوری که در ماه مارس (FPI=۰/۲۱۶۹) و آوریل (FPI=۰/۴۲۳۱) به بیشترین میزان خطر وقوع سیل می‌رسد. بر اساس مشاهدات و گزارش‌های موجود در این بازه زمانی تمام حوضه دچار سیل‌های وسیعی شده است. گفتنی است با اینکه میزان FPI در ماه‌های مه (FPI=۰/۶۸۸۱) و ژوئن (FPI=۰/۲۷۱۹) نیز مقدار زیاد و مثبت است، اما در ماه‌های مه و ژوئن سیلی رخ نداده است. شکل ۸ نتایج مربوط به داده‌های TWSA، پارامتر S_{def} محاسبه‌شده، داده‌های بارش ماهانه، مقدار FPA و مقدار FPI را در شانزده گرید واقع در حوضه رود کارون نشان می‌دهد.

مقادیر بیشتر شاخص FPI، هشدار برای وقوع سیل‌های شدیدتر است. بر اساس روش پیشنهادی، روند افزایشی مقدار شاخص پتانسیل سیل، بیانگر میزان خطرپذیری بیشتر رخداد سیل است. مقادیر مثبت و بزرگ‌تر شاخص FPI، با بارش‌های بیشتر مرتبط است. همچنین طبق روش پیشنهادی، روند نزولی شاخص FPI نشان‌دهنده میزان خطرپذیری کمتر وقوع سیل در این ماه‌ها است.

از آنجا که توزیع مکانی FPI می‌تواند روند توسعه سیل را نشان دهد، در این پژوهش سیل گسترده ماه مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۱۳۹۸) در حوضه آبریز رود کارون، جهت مطالعه موردی برای تجزیه و تحلیل مکانی انتخاب شده است که در آن الگوی خشک-مرطوب-خشک در یک بازه زمانی از اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹ رخ داده است. جدول ۱ میزان TWSA، S_{def}، بارش ماهانه، FPA و در نهایت، FPI مربوط به سلول نمونه (از بین شانزده سلول موجود) با مختصات جغرافیایی ۳۱-۳۲ درجه شمالی و



شکل ۸. نتایج مربوط به داده‌های TWSA، پارامتر S_{def} محاسبه‌شده، داده‌های بارش ماهانه، مقدار FPA و مقدار FPI در شانزده گرید واقع در حوضه رود کارون.

۳-۱ بررسی آنومالی ذخیره آب (TWSA) حاصل

از داده‌های ماهواره GRACE در حوضه کارون وضعیت اولیه TWSA عامل مهمی است که در تشکیل سیل تأثیرگذار است (ریگر و فامیگلیتی، ۲۰۰۹). TWSA بزرگ ممکن است به این معنی باشد که پتانسیل سیلاب زیادی در فصل بارندگی وجود دارد؛ زیرا سطح زیر زمین نمی‌تواند آب اضافی ذخیره کند. داده‌های گریس برای مطالعه رخداد‌های هیدرولوژیکی در مقیاس‌های بزرگ مفید است؛ با این حال، برای مقیاس‌های کوچک‌تر و به‌ویژه برای مطالعات زیست‌محیطی شهری، داده‌های کافی به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌توانند برای مطالعه شرایط هیدرولوژیکی مطمئن‌تر باشند. اگر چنین داده‌هایی در دسترس نبود، به داده‌های TWSA دقیق‌تر یا سایر داده‌های سنجش از دور نیاز است (سان و همکاران، ۲۰۱۷).

نتایج روش پیشنهادی در منطقه مطالعاتی نشان‌دهنده این است که مقادیر بیشتر شاخص FPI، هشدار برای وقوع سیل‌های شدیدتر است. روند افزایشی مقدار شاخص پتانسیل سیل، بیانگر میزان خطرپذیری بیشتر رخداد سیل است. همچنین بر اساس روش پیشنهادی، روند نزولی شاخص FPI، نشان‌دهنده میزان خطرپذیری کمتر وقوع سیل در این ماه‌ها است. نتایج حاکی از آن است که مقادیر مثبت و بزرگ‌تر شاخص FPI با بارش‌های بیشتر مرتبط است و مقادیر کوچک‌تر شاخص FPI با بارش‌های کمتر مرتبط است. بر اساس نتایج، در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹، با توجه به مثبت شدن و افزایش عدد شاخص پتانسیل سیل در ماه‌های فوریه، مارس و آوریل، خطر وقوع سیل بیشتر بوده است و بر اساس مشاهدات و گزارش‌های موجود، در این زمان سیل‌های وسیعی در این منطقه رخ داده است.

بررسی نتایج S_{def} نشان می‌دهد در بازه زمانی نوامبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹، میزان پارامتر S_{def} در ماه‌های مارس، آوریل و مه که میزان TWSA افزایش داشته است، کاهش چشمگیری داشته است. بر اساس تعریف پارامتر S_{def} ، کاهش مقدار S_{def} نشان‌دهنده این است که حوضه در این ماه‌ها، مقدار آب زیادی دارد و مقدار آب اضافی بیشتری که بتواند وارد حوضه شود و از آن سرریز نشود، مقدار کمی خواهد بود. به همین دلیل است که پس از بارش‌هایی که در این ماه‌ها رخ داد، ظرفیت حوضه تکمیل و موجب بروز سیل شده است.

۳-۳ بررسی سیل در حوضه آبریز کارون با استفاده از شاخص پتانسیل سیل (FPI)

میزان FPI می‌تواند پتانسیل وقوع یا عدم وقوع سیل را در یک حوضه به‌وضوح نشان دهد. با افزایش مقدار FPI حوضه مستعد وقوع سیل می‌شود و با کاهش آن، خطر وقوع سیل نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که در بخش نتایج نشان داده شد، در بازه زمانی بررسی شده (اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹)، میزان FPI در ابتدا منفی و به‌تبع آن، میزان خطرپذیری وقوع سیل نیز بسیار کم بوده است. پس از آن، میزان FPI یک روند افزایشی را طی می‌کند که نشان‌دهنده وقوع سیلاب است (سیل‌های گسترده در نوروز ۱۳۹۸). سپس میزان FPI روند نزولی داشته که حاکی از خطرپذیری کمتر در وقوع سیل بوده است. شایان ذکر است در برخی موارد ممکن است FPI نیز افزایش پیدا کند و به‌اشتباه سیل تشخیص داده شود. همچنان که در منطقه مورد مطالعه و در بازه زمانی بررسی شده، FPI در ماه‌های مه ($FPI=0/68$) و ژوئن ($FPI=0/27$) مثبت بوده اما سیلی رخ نداده است.

FPI حاصل از داده‌های ماهواره گریس، می‌تواند پتانسیل سیل را شناسایی کند و برای بهبود پیش‌بینی سیل بسیار ارزشمند است (لانگ و همکاران، ۲۰۱۴)؛ زیرا

ضرایب همبستگی زیاد ($96/66$) درصد در داده‌های گریس و $98/66$ درصد در داده‌های گریس فالوآن) که برای سه محصول شبکه‌بندی‌شده از مراکز پردازش داده‌های ماهواره گریس (CSR, GFZ, JPL) به‌دست آمده‌اند، مطمئن بودن داده‌های گریس را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج حاکی از دقت و اطمینان زیاد در به‌کارگیری این داده‌ها برای استفاده در منطقه مطالعاتی است.

بررسی داده‌های TWSA در حوضه آبریز رود کارون در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۸ (که سیل‌های وسیع در آن رخ داده است) حاکی از آن است که حوضه پس از یک دوره خشک، روند افزایشی در داده‌های TWSA داشته است، به‌طوری‌که در ماه‌های مارس، آوریل و مه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس روند نزولی آن آغاز می‌شود. با توجه به داده‌های بارش ماهانه، می‌توان نتیجه گرفت میزان TWSA با مقدار بارش ماهانه مرتبط است؛ یعنی میزان بارش ماهانه در روند افزایشی یا کاهش TWSA تأثیر دارد.

از نظر توزیع مکانی، نتایج ثبت‌شده مقدار TWSA در این بازه زمانی نشان داد تمامی سلول‌های موجود روی حوضه رود کارون پس از یک دوره خشک، یک دوره مرطوب را با توجه به افزایش بارندگی سپری کرده‌اند و در این بازه زمانی، حوضه رود کارون مقدار فزاینده‌ای از آب را در خود جمع کرده که همین موضوع پتانسیل وقوع سیل و رواناب را ایجاد کرده است. پس از گذر از دوره مرطوب، مقدار آب موجود در حوضه روند کاهشی داشته است و بنابراین مقدار TWSA نیز کاهشی بوده است. یکی از عوامل مهم و مؤثر که سبب کاهش مقدار TWSA بوده است، کاهش میزان بارندگی است.

۲-۳ بررسی S_{def} محاسبه‌شده برای حوضه آبریز رود کارون

کمتر در وقوع سیل بوده است. شایان ذکر است میزان بارندگی در افزایش و کاهش میزان FPI مؤثر بوده است. بنابراین با بررسی و پایش تغییرات ذخیره آب زمینی در یک بازه زمانی، می توان به روند افزایشی یا نزولی آن پی برد و در پی آن، به ظرفیت ذخیره سازی حوضه آبریز دست یافت و در نهایت، با استفاده از شاخص پتانسیل سیل، خطر وقوع یا عدم وقوع سیل را از چند ماه قبل پیش بینی کرد، اما در برخی موارد ممکن است FPI نیز افزایش پیدا کند و به اشتباه سیل تشخیص داده شود. همچنان که در منطقه مورد مطالعه و در بازه زمانی بررسی شده، FPI در ماه های مه ($FPI=0.068$) و ژوئن ($FPI=0.27$) مثبت بوده اما سیلی رخ نداده است؛ بنابراین به طور قطعی نمی توان اظهار کرد که این شاخص به تنهایی می تواند سیل را پیش بینی کند و به اطلاعات مکمل با استفاده از منابع و روش های دیگر برای پایش و پیش بینی دقیق تر سیلاب ها نیاز است. با توجه به توان تفکیک کم داده های TWSA حاصل از گریس و داده های بارش ماهانه GPCP، می توان به محدودیت های استفاده از این داده ها به خصوص در مناطق کوچک تر پی برد؛ بنابراین استفاده از داده های TWSA با توان تفکیک بیشتر حاصل از سایر سامانه ها، مدل های پیش بینی هواشناسی و اطلاعات بارش دقیق تر حاصل از ایستگاه های هواشناسی موجود در منطقه مطالعاتی که توان تفکیک بیشتری نسبت به داده های GPCP دارند و همچنین بررسی پوشش گیاهی منطقه، می تواند نتایج بسیار دقیق تر و بهتری را برای بررسی و پایش رخداد های هیدرولوژیکی از جمله سیل در اختیار کاربران قرار دهد.

منابع

Abedi, M., Moghadam, H., Morid, S., Booi, M., and Delavar, M., 2020, Evaluation of ECMWF mid-range ensemble forecasts of precipitation for the Karun River basin: Theoretical and Applied Climatology, **141**,

می تواند به طور مناسب ویژگی های چنین حوادثی را در مقیاس های بزرگ مکانی و زمانی از جمله فصلی ثبت کند (سان و همکاران، ۲۰۱۷)؛ با این حال برخی از سیل های کوتاه مدت و در مقیاس کوچک، در حال حاضر با گریس شناسایی نمی شوند و در این موارد، FPI کارایی کمتری دارد (سان و همکاران، ۲۰۱۷ و دات ویشواکارما و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین در برخی موارد ممکن است به دلایل گوناگون از جمله آب های جاری ناشی از سیل های ماه قبل، TWSA افزایش و در نتیجه، FPI آن نیز افزایش پیدا کند و به اشتباه سیل تشخیص داده شود.

۴ نتیجه گیری

در این پژوهش، شرایط هیدرولوژیکی در حوضه آبریز رود کارون با استفاده از داده های جفت ماهواره GRACE و همچنین داده های میزان بارش ماهانه حاصل از داده های GPCP، جهت شناسایی سیلاب های رخ داده، به ترتیب زیر بررسی شد:

- بررسی داده های TWSA در حوضه آبریز رود کارون در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۸ حاکی از آن است که حوضه پس از یک دوره خشک، روندی افزایشی در داده های TWSA داشته است، به طوری که در ماه های مارس، آوریل و مه به بیشترین مقدار خود می رسد و سپس روند نزولی آن آغاز می شود. با توجه به داده های بارش ماهانه، می توان نتیجه گرفت میزان TWSA با مقدار بارش ماهانه مرتبط است و این به آن معناست که میزان بارش ماهانه در روند افزایش یا کاهش TWSA تأثیر دارد.

- میزان FPI در بازه زمانی بررسی شده (اکتبر ۲۰۱۸ تا اوت ۲۰۱۹)، در ابتدا منفی و به تبع آن، میزان خطر پذیری وقوع سیل نیز بسیار کم بوده است. سپس میزان FPI یک روند افزایشی را طی می کند که نشان دهنده وقوع سیلاب است (سیل های گسترده در نوروز ۱۳۹۸). پس از آن، میزان FPI روند نزولی داشته که نشان دهنده خطر پذیری

- 61-70. Doi:10.1007/s00704-020-03160-0.
- Dutt Vishwakarma, B., Jain, K., Sneeuw, N., Devaraju, B., 2013, Mumbai 2005, Bihar 2008 flood reflected in mass changes seen by grace satellites: *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **41**(3), 687–695.
- Gupta, D., and Dhanya, C. T., 2020, The potential of GRACE in assessing the flood potential of Peninsular Indian River basins: *International Journal of Remote Sensing*, **41**(23), 9009-9038, DOI: 10.1080/01431161.2020.1797218.
- Long, D., Shen, Y., Sun, A., Hong, Y., Longuevergne, L., Yang, Y., Li, B., and Chen, L., 2014, Drought and flood monitoring for a large karst plateau in southwest china using extended grace data: *Remote Sensing Of Environment*, **155**, 145–160.
- Long, D., Yang, Y., Wada, Y., Hong, Y., Liang, W., Chen, Y., Yong, B., Hou, A., Wei, J., Chen, L., 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**, 177–193.
- Maggioni, V., and Massari, C., 2019, *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment*: Elsevier.
- Molodtsova, T., Molodtsov, S., Kirilenko, A., Zhang, X., and Vanlooy, J., 2015, Evaluating flood potential with GRACE in the United States: *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, **3**, 6977-6996, Doi:10.5194/nhessd-3-6977-2015.
- Rastmanesh, F., Barati-haghighi, T., and Zarasvandi, A., 2020, Assessment of the impact of 2019 Karun River flood on river sediment in Ahvaz city area, Iran: *Environmental Monitoring and Assessment*, **192**, Doi:10.1007/s10661-020-08607-5.
- Reager, J. T., and Famiglietti, J. S., 2009, Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE: *Geophysical Research Letters*, **36**, L23402, Doi:10.1029/2009GL040826.
- Rodell, M., Chao, B. F., Au, A.Y., Kimball, J. S., and McDonald, K.C., 2005, Global biomass variation and its geodynamic effects: *Earth Interact*, **9**(2), 1-19.
- Rodell, M., and Famiglietti, J. S., 2001, An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE): *Water Resource Research*, **37**(5), 1327-1339.
- Sun, Z., Zhu, X., Pan, Y., and Zhang, J., 2017, Assessing terrestrial water storage and flood potential using GRACE data in the Yangtze River Basin, China: *Remote Sensing*, **9**(10), 1011.
- Wang, Z., Chao, N., Jiang, W., and Chao, D., 2016, Combination GRACE and TRMM estimate of water storage capacity and flood potential in Afghanistan: *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **41**(1), 58-65, doi: 10.13203/j.whugis20150495
- Zahiri, J., Mollaei, Z., and Ansari, M., 2020, Estimation of suspended sediment concentration by M5 model tree based on hydrological and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data: *Water Resources Management*, **34**, Doi:10.1007/s11269-020-02577-6.
- Zhou Y., et al., 2016, Water storage variations in the Poyang Lake Basin estimated from GRACE and satellite altimetry: *Geodesy and Geodynamics*, **7**, 108e116, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2016.04.003>.

Feasibility study of forecasting the flood occurrence using GRACE satellite gravity data in the Karun river basin, Iran

Rahim Rezvani Faezifar^{1*}, Abdolreza Safari², Abbas Bahroudi³ and Sabah Ramouz¹

¹ M.Sc. Graduate, College of Engineering School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, College of Engineering School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, College of Engineering / School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 25 August 2021, Accepted: 23 November 2021)

Summary

Flood is one of the natural disasters which leaves behind many humans, financial and ecosystem losses. Consideration of situations and conditions in the basins has a high priority in reducing the effects of these losses. Study and research on Terrestrial Water Storage (TWS) point out the capacity of water storage in a basin and consider its potential for occurring possible floods. TWS is defined as the summation of all water stored above and below on the earth's surface (e.g., lakes, rivers, soil moisture, snow, ice and waters inside the vegetation). In this study, using Terrestrial Water Storage Anomaly (TWSA) data attained from twin GRACE satellites and using monthly precipitation data acquired from Global Precipitation Climatology Project (GPCP), the capacity of water storage in basin and the Flood Potential Index (FPI) are calculated. FPI is defined as a storage capacity quantity of basin and has been utilizing in assessing the potential of flood occurrence. The more FPI is near to 1.0, the more possibility of flood event will be. Regarding previous flood events happened during March 2019 in Iran, FPI values related to Karun basin within interval of October 2018 and August 2019 are considered specially. FPI values of 0.21 in March and 0.42 in April show flood events in March and April (2019), respectively. Based on the proposed method, rising value of FPI causes more potential for occurring a flood event. On the contrary, falling value of FPI makes flood events less likely. Concerning results point out higher positive values of FPI connected to more precipitations and in reverse, lower values of FPI related to lower precipitations. Therefore, using study of FPI during desired time interval and regarding the increasing of its index value, forecasting the flood event is possible even several months before its happening and prevents the possible losses. However, temporary and small-scaled floods are not recognized by GRACE data and FPI is less effective. By the way, in some cases it is possible that FPI increases and causes a wrong flood forecasting. For example, in our case study within specific time intervals in May (FPI = 0.68) and June (FPI = 0.27) the FPI values are positive, while there has not occurred any flood. Therefore, definitely, this index is not merely capable of flood forecasting and it is necessary to use supplementary information utilizing other sources and methods to forecast it more precisely.

Keywords: Flood, forecasting, terrestrial water storage anomaly, GRACE, flood potential index, Karun basin

*Corresponding author:

rahim.rezvani@ut.ac.ir