

## بررسی تطبیقی عملکرد پایگاه‌های داده CHIRPS و ERA5-Land در آشکارسازی خشک‌سالی‌های ایران

### سروش غلامی

دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### منوچهر فرج زاده اصل\*

استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### یوسف قویدل رحیمی

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۱

### چکیده

هدف پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد دو پایگاه داده بارش ماهواره‌ای CHIRPS و پایگاه داده باز تحلیل ERA5-Land در آشکارسازی خشک‌سالی‌های ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده در محدوده ایران هست. به همین منظور داده‌های رستری دو پایگاه داده با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده در ۱۱ گام زمانی و با استفاده از داده‌های ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی و تحلیل آزمون همبستگی در محدوده کشور ایران مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر دو پایگاه داده در گام‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه در سرتاسر ایران به جز مناطق شمالی کشور، از همبستگی خوبی با داده‌های ایستگاهی ( $R_{CHIRPS} = 0.56$ ,  $R_{ERAS} = 0.76$ ) برخوردار می‌باشند. همچنین پایگاه داده ERA5-Land در گام‌های زمانی بالاتر (۲۴-۷۲ ماهه) نیز عملکرد قابل قبولی در آشکارسازی خشک‌سالی‌ها نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که مساحت مناطق تحت سیطره خشک‌سالی در هر دو پایگاه داده تا گام زمانی ۱۲ ماهه نسبتاً برابر بوده اما در گام‌های زمانی بالاتر در پایگاه داده CHIRPS دچار خطا شده و قابل اعتماد نخواهد بود. همچنین بر اساس نتایج مشخص شد که به طور کلی دقت و قابلیت پایگاه‌های داده در گام‌های زمانی بالا با طول دوره آماری ۳۰-۴۰ سال کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و برای گام‌های زمانی بلندتر می‌بایست از طول دوره آماری طولانی‌تری استفاده شود.

واژگان کلیدی: CHIRPS، ERA5-Land، خشک‌سالی، بارش، SPI

### مقدمه

خشک‌سالی یک پدیده زیان‌بار و مخرب طبیعی است که منجر به کاهش رطوبت موجود در خاک، منابع آب سطحی و زیرزمینی و کاهش تولید محصولات کشاورزی و سایر اثرات منفی بر زیستگاه‌های طبیعی و زندگی انسان می‌شود.

خشک‌سالی می‌تواند در هر نقطه‌ای از کره زمین از مرطوب‌ترین تا خشکی‌ترین نواحی بیابانی اتفاق بیافتد. در یک تعریف علمی، خشک‌سالی با خشکی تفاوت دارد. خشکی ویژگی ثابت آب و هوایی در یک منطقه است؛ اما خشک‌سالی به کاهش غیرمنتظره بارش در مدتی معین، در منطقه‌ای که لزوماً خشک نیست اشاره دارد (علیچانی و کاویانی، ۱۳۸۷). اولین و اصلی‌ترین نمود وقوع خشک‌سالی، کاهش بارش نسبت به نرمال است؛ از این‌رو وجود سری داده‌های دقیق و قابل اعتماد بارش، در مطالعات خشک‌سالی یک ضرورت می‌باشد. دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری بارش، اندازه‌گیری‌های زمینی در قالب دستگاه‌های باران‌سنج و باران‌نگار ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی است؛ اما احداث و نگهداری این ایستگاه‌ها هزینه‌بر و در مناطقی غیرممکن بوده و این مورد باعث کاهش تعداد ایستگاه‌ها و پراکنش نامناسب آن‌ها در ارتباط با نیاز مطالعاتی اقلیم منطقه می‌شود. از این‌رو استفاده از فناوری‌های سنجش از دوری و توسعه مدل‌های باز تحلیلی، بهترین منابع داده‌ای جایگزین، یک ضرورت می‌نماید. امروزه با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و رایانه‌ها، شاهد پیشرفت فناوری‌ها و پایگاه‌های داده‌ای سنجش از دوری و مدل‌های اتمسفری هستیم، اما این پایگاه‌های داده‌ای جهت استفاده در مطالعات خشک‌سالی، نیازمند اعتبارسنجی، بررسی عملکرد و انطباق‌پذیری با اقلیم‌های مختلف می‌باشند؛ تا بتوانند به مدیران و تصمیم‌گیران در برنامه‌ریزی و اتخاذ سیاست‌های مناسب در مواجهه با پدیده خشک‌سالی و عواقب آن کمک کنند. تاکنون تلاش‌های بسیاری جهت ایجاد و توسعه پایگاه‌های داده‌ای بارش در سرتاسر دنیا انجام گرفته است؛ که از جمله آن می‌توان به پایگاه‌های داده بارشی CHIRPS، ERA-Interim، IMERG، GPCC، PERSIANN و... اشاره کرد؛ که عموماً از ترکیب ریاضیاتی داده‌های ماهواره‌های مادون قرمز، مایکروویو، داده‌های ایستگاهی و مدل‌های سطح زمین ایجاد شده‌اند؛ که هرکدام در مناطق مختلف آب و هوایی، دارای عملکردهای متفاوتی بوده و برحسب قدرت تفکیک زمانی و مکانی، دارای نقاط قوت و ضعف متفاوتی نیز هستند. جدای از موضوع عملکرد و دقت، از ویژگی‌های مهم در استفاده از پایگاه‌های داده بارشی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی این داده‌ها است. یکی از جدیدترین پایگاه‌های داده بارشی انتشار یافته، پایگاه داده باز تحلیلی ERA5-Land می‌باشد؛ که ویرایش جدید آن در سال ۲۰۲۲ با طول دوره آماری ۷۳ ساله و قدرت تفکیک مکانی ۰٫۱ درجه‌ای منتشر شد. این پایگاه داده در کنار پایگاه داده CHIRPS با قدرت تفکیک ۰٫۵ درجه، از نظر قدرت تفکیک زمانی و مکانی، بهترین پایگاه‌های داده بارش جهانی تا زمان نگارش این مقاله می‌باشند؛ اما تاکنون مطالعات بسیار کمی در مورد بررسی عملکرد این دو پایگاه داده بارشی، در اقلیم نامتجانس فلات ایران انجام شده است؛ و قابلیت‌ها و عملکرد این داده‌ها نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشند. هدف پژوهش حاضر نیز بررسی تطبیقی عملکرد این دو پایگاه داده در آشکارسازی وضعیت خشک‌سالی‌های منطقه مورد مطالعه، یعنی مرزهای سیاسی کشور ایران؛ و با استفاده از شاخص خشک‌سالی SPI است. از جمله مطالعات مشابهی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: Jinyoung Rhee و همکاران (۲۰۱۰)، در مطالعه‌ای، شاخص مقیاس بندی شده وضعیت خشک‌سالی (SDCI) را با ادغام داده‌های LST و NDVI سنجنده MODIS و داده‌های بارش ماهواره TRMM توسعه دادند و با استفاده از شاخص‌های PSDI، Z-پالمر، SPI-3 و SPI-6 برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۹ مورد ارزیابی قرار دادند نتایج نشان داد شاخص

SDCI بهتر از شاخص‌های موجود مانند NDVI و شاخص سلامت گیاهی (VHI) در منطقه خشک آریزونا و نیومکزیکو و همچنین در منطقه مرطوب کارولینای شمالی و کارولینای جنوبی عمل می‌کند. همچنین تغییرات سال‌به‌سال و توزیع فضایی SDCI در هر دو منطقه خشک و مرطوب به‌طور کلی با تغییرات مستند شده توسط نقشه‌های پایش خشک‌سالی ایالات متحده (USDM) موافق است. Rahmat و همکاران (۲۰۱۲) در یک مطالعه با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش SPI و آزمون‌های نا پارامتریک من-کندال و اسپیرمن به تحلیل روند خشک‌سالی در ویکتوریای استرالیا پرداختند. مقادیر شاخص SPI برای مقیاس‌های زمانی ۳ ماهه و ۱۲ ماهه نشان‌دهنده روند نزولی معنادار برای همه ایستگاه‌ها بوده و همچنین اینکه در طول سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۰ روند نزولی ۱۲ ماهه نشانگر خشک تر شدن شرایط است. Liu و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی برای تحلیل و پیش‌بینی خشک‌سالی اقلیمی حوضه رودخانه سرخ آرکانزاس از دو شاخص خشک‌سالی رایج SPI و PDSI در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۹ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خشک‌سالی‌های گسترده عمدتاً در دهه‌های ۱۹۱۰، ۱۹۳۰، ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ رخ داده است و خشک‌سالی‌های مکرر و شدید در بخش دوم قرن ۲۱ ام تحت سناریوهای انتشار، ظاهر خواهند شد. Shamsnia و Boustani (۲۰۱۴) با استفاده از شاخص هواشناسی RDI و شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، VCI و SAVI به ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در استان فارس کشور ایران پرداختند. بر اساس نتایج پیشنهاد شده است که برای پایش خشک‌سالی در اراضی مرتعی، از مقیاس زمانی ۶ ماهه RDI، در مناطق جنگلی مقیاس ۹ و ۱۲ ماهه و در اراضی دیم از مقیاس زمانی کوتاه مدت (کمتر از ۳ ماه) استفاده شود. Awchi و Kalyana در سال ۲۰۱۷ به تحلیل خشک‌سالی هواشناسی در شمال عراق با استفاده از شاخص SPI و سیستم GIS طی سال‌های ۱۹۳۷ تا ۲۰۱۰ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه در هر دهه با وقوع خشک‌سالی‌های مکرر همراه بوده که اکثر این رویدادها در دسته خشک‌سالی ملایم قرار می‌گیرند و شدیدترین خشک‌سالی نیز طی سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ رخ داده است. Javanmard و همکاران (۲۰۱۷) در یک تحقیق برای تحلیل مکانی - زمانی خشک‌سالی در ایران طی یک دوره ۴۲ ساله (۱۹۶۳ تا ۲۰۰۵) از شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۹ و ۱۲ ماهه) استفاده کردند. با توجه به نتایج، اکثر خشک‌سالی‌های ایران در سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۰، ۱۹۹۸، ۱۹۹۹، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ اتفاق افتاده و بر اساس SPI سه‌ماهه ۹۹ درصد ایستگاه‌ها از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ به‌طور مداوم تحت تأثیر خشک‌سالی قرار گرفته‌اند. Gao و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه، عملکرد پایگاه داده بارش CHIRPS را با استفاده از شاخص SPI داده‌های مشاهداتی ۲۹ ایستگاه باران‌سنجی برای حوزه آبریز رودخانه‌های در کشور چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشانگر عملکرد خوب این پایگاه داده‌ای در شناسایی خشک‌سالی‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه بوده است. اگرچه که پایگاه داده CHIRPS تمایل به برآورد بیشتر بارش در این منطقه نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان داده است، اما در تبیین شاخص خشک‌سالی در مقیاس ماهانه ( $R^2 > 0.70$ ) و مقیاس فصلی و سالانه ( $R^2 > 0.78$ ) عملکرد قابل قبولی دارد. Wenqi Wu و همکاران، (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی کارایی و عملکرد پایگاه داده بارش ماهواره‌ای CHIRPS در آشکارسازی تغییرات خشک‌سالی در استان

یونان چین پرداختند. پس از محاسبه چندین شاخص آماری از داده‌های بارش ۱۲۲ ایستگاه زمینی و محاسبه شاخص SPI از داده‌های CHIRPS نتایج آن‌ها نشان داد که پایگاه داده CHIRPS توانایی خوبی (با همبستگی 0.89 و  $RMSE=44.26$ ) در آشکارسازی خشک‌سالی در مقیاس ماهانه و تغییرات فضایی بارش در منطقه یونان دارد. Navidi Nassaj و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی قابلیت‌های پنج پایگاه داده بارش شبکه‌بندی شده، GPCP، PERSIANN-CDR، CHIRPS، ECMWF ERA5 و NASA MERRA-2 در آشکارسازی خشک‌سالی‌ها برای ۱۳ ایستگاه سینوپتیک در گستره کشور ایران با استفاده از شاخص خشک‌سالی SPI برای دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۱۶ و بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد ضریب همبستگی، ضریب نش-ساتکلیف، RMSE، شاخص توافق اصلاح شده MAI، شاخص نسبت هشدار کاذب FAR، شاخص احتمال تشخیص POD و شاخص موفقیت بحرانی CSI پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که پایگاه‌های داده GPCP، ERA5 و PERSIANN-CDR از نظر شاخص‌های  $RMSE$ ،  $R2$ ، NSE و MAI عملکرد بهتری نسبت به CHIRPS و MERRA-2 در سرتاسر حوزه مطالعاتی دارند. همچنین نتایج نشان داد که این سه پایگاه داده توانایی خوبی در آشکارسازی وقایع خشک‌سالی‌ها در منطقه مورد مطالعه دارند. نتایج تحقیق Kokilavani و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی و تحلیل روند زمانی و الگوی مکانی خشک‌سالی طی دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۹ برای مناطق مختلف کشاورزی-اقلیمی Tamil Nadu هند با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده، بر پتانسیل شاخص SPI در شناسایی خشک‌سالی تأکید دارد. Koochi و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد پایگاه داده جدید SM2Rain/ASCAT با استفاده از شاخص خشک‌سالی SPI در آشکارسازی خشک‌سالی‌ها در ایران پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی (CC) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین SM2RAIN-ASCAT و مشاهدات ایستگاهی در مقیاس‌های زمانی ۱۰ روزه و ماهانه دیده می‌شود. این محصول مقادیر بارندگی را در مناطق بسیار خشک بیش از حد برآورد می‌کند، در حالی که در مناطق آب و هوایی مرطوب و نیمه مرطوب تمایل به برآورد کمتر بارش دارد. همچنین ارزیابی پایایی این محصول برای پایش خشک‌سالی نشان داد که SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه با مشاهدات زمینی در مناطق مختلف آب و هوایی ایران مطابقت دارد. Ojha و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به مقایسه شاخص‌های SPI و PDSI در مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با استفاده از داده‌های بارندگی شبکه‌ای از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که دوره‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ به‌عنوان دوره‌های خشک‌سالی توسط هر دو شاخص برای تمام مقیاس‌های زمانی مشاهده شده است. Dukat و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) به تعیین روند شدت و وقوع خشک‌سالی در اروپا طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج به‌طور کلی نشانگر وجود روند افزایشی معنی‌دار در وقوع ماه‌های خشک بوده و بیشترین تعداد ماه‌های خشک از دهه ۱۹۷۰ در طول ۵ سال گذشته ظاهر شده است. Mianabadi و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد پایگاه داده CHIRPS در شناسایی خشک‌سالی‌ها و روند آن در جنوب شرق کشور ایران پرداختند. نتایج آن‌ها نشانگر عملکرد بهتر این پایگاه داده در شناسایی

خشک‌سالی‌ها در مقیاس‌های ماهانه و فصلی ( $R > 0.8$ ) نسبت به مقیاس روزانه ( $R > 0.4$ ) بود. نتایج همچنین نشان داد که طول خشک‌سالی‌ها و وخامت (Severity) در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۹ ماهه کاهش یافته درحالی که شدت (Intensity) خشک‌سالی‌ها افزایش یافته است. (Priyanko Das, ۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد پایگاه‌های داده CHIRPS و PERSIANN-CDR در محدوده دریاچه ویکتوریا پرداختند. نتایج نشان داد که هر دو پایگاه داده توانایی خوبی در آشکارسازی رفتار شدت خشک‌سالی‌ها در گام‌های زمانی SPI-3، SPI-6 و SPI-12 دارند. با این وجود پایگاه داده CHIRPS با ضریب همبستگی ۰.۶۵ توانایی بهتری نسبت به PERSIANN-CDR با ضریب همبستگی ۰.۵۴ نشان داد. در ایران نیز بخش‌های عمده تحقیقات خشک‌سالی به ترتیب از بیشتر به کمتر شامل: بخش ارزیابی وضعیت موجود و پیامدهای آن، پیش‌بینی و مدیریت آن است. همچنین غالب مطالعات مربوط به خشک‌سالی در استان‌های خراسان، فارس، سیستان و بلوچستان، تهران، اصفهان و کرمانشاه انجام گرفته است (دوستان، ۱۳۹۸). غفوریان و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی مناطق مناسب جهت پایش خشک‌سالی را در استان خراسان رضوی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM و شاخص‌های SPI، CSI، R2 شناسایی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد به غیر از مقیاس زمانی یک‌ماهه، ارتباط بسیار خوبی بین شاخص‌های داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد و میزان مطابقت در بیشتر مناطق مورد مطالعه بیش از ۵۰ درصد است. دهکردی و همکاران (۱۳۹۴)، در یک مطالعه به پایش خشک‌سالی‌ها با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری در مراتع استان یزد پرداختند. نتایج بررسی شاخص در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه نشان داد که نوسانات خشک‌سالی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت در مقایسه با بازه‌های زمانی بلندمدت بیشتر است. همچنین نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که مقادیر شاخص SPI در بازه‌های زمانی کوتاه مدت با شاخص‌های ماهواره‌ای NMDI در سطح یک درصد بیشترین همبستگی را دارد. دارند و همکاران (۱۳۹۵) عملکرد دو پایگاه داده بارش جهانی GPCC و بارش اسفرازی را در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های همدید مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های حاصل از این پژوهش بیانگر هماهنگی و همبستگی زمانی بسیار بالای بارش برآورد شده این پایگاه با دو پایگاه داده ملی اسفرازی و ایستگاهی است. کاربست شاخص‌های ارزیابی دقت بر روی سری زمانی مقادیر بارش پایگاه داده GPCC نشان داد که علاوه بر هماهنگی زمانی در افت و خیزهای بارش، مقادیر بارش برآوردشده این پایگاه بسیار نزدیک به مقادیر بارش مشاهده و ثبت شده است. کله‌هوئی و همکاران (۱۳۹۷) در یک مطالعه به پهنه‌بندی خشک‌سالی جلگه خزر با استفاده از شاخص‌های SPI و ZCI پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین ترسالی برای ایستگاه آستارا در سال ۱۳۷۹ و بیشترین خشک‌سالی برای ایستگاه بابلسر در سال ۱۳۸۹ رخ داده است و روند خشک‌سالی از شرق جلگه خزر به سمت غرب جلگه خزر کاهش یافته است. در یک مطالعه گرجی زاده و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی عملکرد سه پایگاه داده ماهواره‌ای و باز تحلیلی CHIRPS، PERSIANN-CDR و ERA-Interim در محدوده بالادست سد مارون در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که در مقیاس بارش سالانه هر سه پایگاه داده فرو بر آوردی عمل کرده و میزان بارش را کمتر از مشاهدات ایستگاهی برآورد می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که در برآورد بارش ماهانه با توجه به ضریب نش-ساتکلیف

در ایستگاه‌های دهنو، ایدنک و مارگون مدل ERA-Interim و در ایستگاه قلعه ریسی مدل CHIRPS بهترین عملکرد را نسبت به مدل‌های دیگر نشان می‌دهد که این الگو در برآورد بارش‌های روزانه نیز مشاهده می‌شود؛ اما در شناسایی روزهای بارانی، ERA-Interim بهترین عملکرد را داشته است. قربانی و همکاران (۱۳۹۸) در یک تحقیق روند شاخص خشک‌سالی اقلیمی SPI استان اصفهان را با استفاده از آزمون‌های نا پارامتری سن، پتیت و من - کندال مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس آزمون من-کندال در ۵۹ درصد ایستگاه‌ها روند معنی‌دار نزولی وجود دارد و همچنین تحلیل سری زمانی خشک‌سالی با دوره بزرگ‌تر از ۶ ماه بهتر از سری‌های زمانی کوتاه مدت روند تغییرات را نمایان می‌کند. زارع پور و همکاران (۱۴۰۰) در یک مطالعه به تحلیل آماری بلندمدت روند خشک‌سالی هواشناسی استان اصفهان با استفاده از شاخص ZSI و آزمون‌های نا پارامتری من-کندال، پتیت و سن پرداختند. بر اساس نتایج مشخص شد که سری زمانی‌های بلندمدت، روند تغییرات خشک‌سالی را بهتر آشکار می‌کند و خشک‌سالی در استان با روند نزولی مواجه است. نظافت و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد دو پایگاه داده CHIRPS و PERSIANN-CDR در محدوده کشور ایران با استفاده از داده‌های ۸۸ ایستگاه سینوپتیک پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با توجه به شاخص‌های ارزیابی، عملکرد پایگاه داده PERSIANN\_CDR در مناطقی به غیر از شمال و شمال غرب ایران نسبت به CHIRPS بهتر است. در تخمین بارش ماهانه نیز مجموعه داده PERSIANN\_CDR در همه حوضه‌ها به غیر از ارومیه و سرخس دارای خطای کمتر در برآورد بارش ماهانه و بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی نسبت به CHIRPS است؛ اما در برآورد بارش روزانه، داده‌های شبکه‌بندی CHIRPS دارای عملکرد بهتر نسبت به PERSIANN\_CDR بخصوص در حوضه خلیج فارس و دریای عمان است. در مطالعه‌ای دیگر، بابلان و همکاران (۱۴۰۱) به مقایسه عملکرد و دقت چهار محصول ماهواره‌ای بارش TRMM-3B42V7 و GPM-IMERG, CHIRPS, PERSIANN-CDR برای برآورد بارش‌های سنگین از سال ۱۳۹۶ تا سال ۱۴۰۰ در نوار ساحلی مناطق شمالی ایران پرداختند. نتایج نشان داد با توجه به شاخص PC در هشت ایستگاه، بندر انزلی، رشت، رودسر، تالش، آستارا، رشت (کشاورزی)، کیشهر و لاهیجان که همگی در ارتفاعی کم‌تر از ۴۰ متر از سطح آب‌های آزاد و در نوار ساحل دریای خزر پراکنده‌اند، محصول بارش ماهواره‌ای IMERG امتیاز بیشتری نسبت به مابقی محصولات کسب کرد. ضعیف‌ترین عملکرد در شاخص PC در آستانه بیش‌تر از پنج میلی‌متر، مربوط به ماهواره‌های TRMM و PERSIANN-CDR بود که کم‌ترین امتیازات را در همه ایستگاه‌ها کسب کردند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده محصول IMERG نسبت به سه محصول CHIRPS, PERSIANN-CDR و TRMM بهتر عمل کرده است. تاکنون اما مطالعاتی در زمینه بررسی عملکرد پایگاه داده ERA5-Land و مقایسه آن با سایر پایگاه‌های داده‌ای انجام نگرفته است. از این‌رو هدف پژوهش حاضر نیز بررسی عملکرد دو پایگاه داده بارشی ERA5-Land و CHIRPS در آشکارسازی وضعیت خشک‌سالی‌های فلات ایران و با استفاده از شاخص خشک‌سالی SPI می‌باشد.

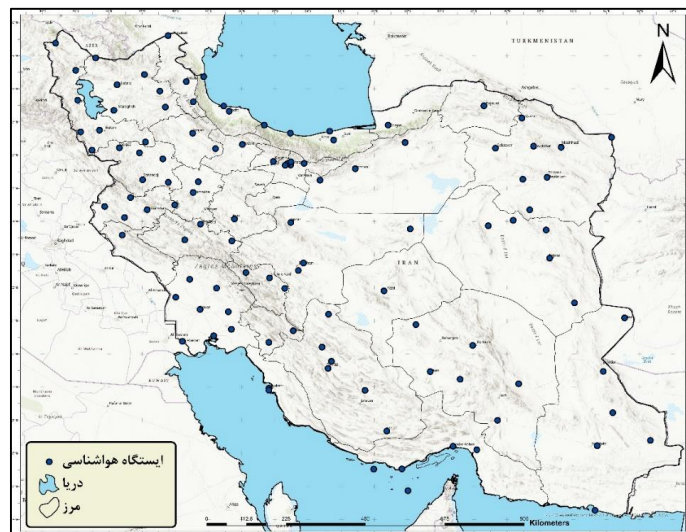
## داده‌ها و روش‌ها

فلات ایران در منطقه جنب حاره و کمربند بیابانی کره زمین قرار گرفته است و خشکی ماهیت ذاتی آب و هوای این منطقه از کره زمین است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در محدوده مرزهای سیاسی کشور ایران است که عموماً منطبق بر فلات ایران و در منطقه خاورمیانه، تحت تأثیر خشک‌سالی‌های بزرگ مقیاس این منطقه قرار دارد. به منظور بررسی عملکرد پایگاه‌های داده بارشی، در این پژوهش از داده‌های بارش تجمعی ماهانه ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اصلی و اقلیم‌شناسی که تا زمان دریافت داده‌ها از سازمان هواشناسی (سپتامبر ۲۰۲۱) دارای حداقل ۳۰ سال داده به صورت ماهانه بوده‌اند، استفاده شده است (بدو تأسیس قدیمی‌ترین ایستگاه‌ها ۱۹۵۱ با ۷۱ سال دوره آماری است). گپ‌های موجود در سری زمانی داده‌ها با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ<sup>۱</sup> و استخراج نقاط مجهول؛ و یا رگرسیون خطی بازسازی شد؛ که البته در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها تعداد داده‌های مفقوده بیشتر از ۵ درصد نبود. جدول ۱ تعداد و مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد طول دوره آماری همه ایستگاه‌ها از بدو تأسیس تا سپتامبر ۲۰۲۱ است.

جدول ۱: ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش و طول دوره آماری هر ایستگاه

| طول دوره | ایستگاه           | طول دوره | ایستگاه           | طول دوره | ایستگاه          | طول دوره | ایستگاه             | طول دوره | ایستگاه     |
|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|------------------|----------|---------------------|----------|-------------|
| 38       | سرخس              | 35       | میانه             | 37       | جلفا             | 33       | بروجرد              | 71       | آبادان      |
| 36       | سراوان            | 37       | میناب             | 32       | کهنوج            | 34       | بشرویه              | 45       | آباده       |
| 35       | سردشت             | 36       | نهبندان           | 35       | کنگاور           | 35       | بوستان              | 39       | آبلی        |
| 36       | سرپل ذهاب         | 31       | نیشابور           | 37       | کرج              | 71       | بوشهر               | 38       | ابوموسی     |
| 57       | سمنان             | 45       | نوشهر             | 55       | کاشان            | 36       | بوشهر-ساحلی         | 36       | اهر         |
| 66       | شهرکرد            | 39       | امیدیه            | 36       | کاشمر            | 59       | چابهار              | 71       | اهواز       |
| 71       | شاهرود            | 71       | ارومیه            | 71       | کرمان            | 37       | دوگنبدان            | 36       | الیگودرز    |
| 71       | شیراز             | 37       | پارس‌آباد         | 71       | کرمانشاه         | 34       | درودزن              | 36       | انار        |
| 37       | سیرجان            | 36       | پیرانشهر          | 35       | خلخال            | 50       | دوشان تپه           | 67       | اراک        |
| 71       | تبریز             | 35       | قائن              | 36       | خاش              | 71       | اصفهان              | 45       | اردبیل      |
| 36       | تکاب              | 63       | قزوین             | 71       | خرم‌آباد         | 45       | اصفهان-<br>فرودگاهی | 36       | آستارا      |
| 31       | تهران<br>ژئوفیزیک | 33       | قروه              | 36       | خرم‌دره          | 35       | اسلام‌آباد غرب      | 71       | بابلسر      |
| 71       | تهران مهرآباد     | 38       | قوچان             | 62       | خوی              | 55       | فسا                 | 33       | بافت        |
| 34       | تهران شمیران      | 34       | رامهرمز           | 36       | خور و<br>بیابانک | 37       | فردوس               | 65       | بم          |
| 63       | تربت‌حیدریه       | 66       | رامسر             | 45       | جزیره کیش        | 36       | گرمسار              | 65       | بندرعباس    |
| 35       | یاسوج             | 66       | رشت               | 35       | کوه‌رنگ          | 38       | قراخیل              | 34       | بندر ماهشهر |
| 69       | یزد               | 34       | روانسر            | 32       | لار              | 35       | گناباد              | 71       | بندر انزلی  |
| 59       | زابل              | 67       | سبزوار            | 37       | مهاباد           | 69       | گرگان               | 56       | بندرلنگه    |
| 71       | زاهدان            | 35       | صفی‌آباد<br>دزفول | 37       | ماکو             | 45       | همدان-<br>فرودگاهی  | 35       | بیجار       |
| 66       | زنجان             | 62       | سنندج             | 38       | مراغه            | 71       | نوزه                | 66       | بیرجند      |
| 32       | زرقان             | 61       | سقز               | 71       | مشهد             | 36       | ایلام               | 45       | بجنورد      |
| 33       | زربنه             | 35       | سراب              | 37       | مسجد<br>سلیمان   | 58       | ایرانشهر            | 34       | بروجن       |

<sup>۱</sup> Kriging Interpolation



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش از دو پایگاه داده رستری ERA5-Land و CHIRPS<sup>۲</sup> استفاده شده است. ERA5\_Land که با ورژن جدید با طول دوره آماری بلندمدت در سال ۲۰۲۲ انتشار یافته، در واقع جزء Land، از مدل باز تحلیل ERA5<sup>۳</sup>، توسعه داده شده در مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مقیاس هواشناسی (ECMWF)<sup>۴</sup> است که با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۱ درجه (بهتر نسبت به مدل اتمسفری ERA5 با ۰٫۲۵ درجه) برای برخی از متغیرهای سطح زمین توسعه یافته است. داده‌های باز تحلیل حاصل ترکیب داده‌های مستخرج از مدل‌های اتمسفری و خروجی پیش‌بینی‌های جوی با داده‌های مشاهداتی اندازه‌گیری شده هستند؛ که در نهایت به تشکیل یک پایگاه داده‌ای منسجم و با طول دوره آماری بالا از پارامترهای اتمسفری و محیطی در مقیاس جهانی منتهی می‌شوند. طول داده‌های ERA5-Land از ۱۹۵۰ تا حال حاضر است؛ که برای تمام کره زمین با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۱ درجه معادل ۹ کیلومتر در دسترس است (JM Sabater, 2021). داده‌های استفاده شده در این پژوهش شامل ۸۷۱ رستر بارش ماهانه ERA5-Land از ژانویه ۱۹۵۰ تا جولای ۲۰۲۲ برای کل ایران است. پایگاه داده بارش رستری بعدی پایگاه داده بارش مادون قرمز و ایستگاهی گروه مخاطرات آب و هوایی (CHIRPS) می‌باشد. این پایگاه داده شبه جهانی حاصل ترکیب داده‌های بارش مستخرج از ماهواره‌های هواشناسی مادون قرمز سنجنده بارش با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی، با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده درونیابی در سرتاسر جهان می‌باشد؛ که با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۰۵ درجه از ژانویه ۱۹۸۱ تا حال حاضر برای مناطق بین دو عرض جغرافیایی 50N و 50S به صورت ماهانه و روزانه در دسترس است (Funk و همکاران ۲۰۱۵). داده‌های استفاده شده از این پایگاه داده، شامل ۴۹۹ رستر بارش تجمعی ماهانه از ژانویه ۱۹۸۱ تا جولای ۲۰۲۲ می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، به منظور بررسی کارایی پایگاه‌های داده ERA5-Land و CHIRPS و همچنین بررسی وضعیت

<sup>2</sup> Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

<sup>3</sup> Reanalysis

<sup>4</sup> the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



پدیده خشک‌سالی از شاخص بارش استاندارد شده SPI استفاده شد. شاخص SPI در ۱۹۹۳ توسط مک کی (McKee, 1993) ارائه شد. این شاخص به دلیل ساده بودن محاسبه و همچنین ملموس بودن خروجی نتایج آن برای مدیران و برنامه ریزان شاخص بسیار سودمند و کارآمد می‌باشد. محاسبه شاخص SPI برای هر منطقه معین بر پایه آمار درازمدت بارندگی (حداقل ۳۰ سال) برای یک دوره سه، شش ماهه و ... است. این آمار درازمدت به یک تابع توزیع احتمال (تابع احتمال گاما) برازش یافته، تابع حاصل برای پیدا کردن احتمال تجمعی بارندگی برای یک ایستگاه و برای ماه معین و مقیاس زمانی مشخص می‌تواند استفاده شود. این احتمال سپس به متغیر تصادفی نرمال  $Z$ ، تبدیل می‌شود. از این رو شاخص SPI مقدار انحرافات استاندارد است که یک رویداد مشخص از شرایط نرمال منحرف می‌شود. مقادیر SPI مثبت نمایانگر بارش بیشتر از مقدار بارش متوسط و مقادیر SPI منفی بیانگر بارش کمتر از مقدار بارش متوسط می‌باشد. چون SPI نرمال است اقلیم‌های خشک و مرطوب را می‌توان به یک روش نشان داد و دوره‌های مرطوب را نیز می‌توان با استفاده شاخص SPI پایش کرد (McKee, 1993). جدول ۲، آستانه‌های طبقات مختلف خشک‌سالی و ترسالی را در شاخص SPI نشان می‌دهد. اساس شاخص SPI بر محاسبه احتمالات بارش در هر پنجره زمانی استوار است از این رو برازش یک توزیع آماری مناسب بر سری زمانی داده‌های بارش ضروری می‌باشد. بر طبق مطالعات (Edwards and McKee, 1997) مشخص شد که توزیع گاما برازش مناسبی بر داده‌های بارش ماهانه ایالات متحده دارد و نظریه شاخص ابتدا بر مبنای این توزیع بیان شده است. بذرافشان (۱۳۸۱). تابع چگالی احتمال گاما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_x(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)}; \text{رابطه ۱-}$$

که در آن  $\alpha$  پارامتر شکل،  $\beta$  پارامتر مقیاس،  $x$  مقدار بارش و  $\Gamma(\alpha)$  تابع گاما است که رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt; \text{رابطه ۲-}$$

از آنجایی که روش گشتاورها تنها در مواردی که مقدار  $\alpha$  بسیار بزرگ باشد کارایی دارد؛ بهتر است برای تخمین پارامترهای توزیع گاما از روش بیشینه شباهت<sup>۵</sup> استفاده شود (Wilks, 2011). برآورد پارامترهای توزیع گاما با روش بیشینه شباهت نیاز به رایانه و الگوریتم تکرار دارد. در عین حال روش‌های تقریبی نیز وجود دارند بدین منظور ابتدا آماره  $D$  طبق معادله زیر از روی داده‌ها محاسبه می‌شود:

$$D = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i); \text{رابطه ۳-}$$

سپس پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  از معادلات زیر برآورد می‌شود.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4D} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4D}{3}} \right]; \text{رابطه ۴-}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}; \text{رابطه ۵-}$$

<sup>5</sup> Maximum Likelihood

که  $\hat{\alpha}$  و  $\hat{\beta}$  به ترتیب برآوردگرهای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $n$  فراوانی داده‌ها است. در مرحله بعد تابع توزیع احتمال تجمعی بارش ( $F_x(x)$ ) محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۶-} F_x(x) = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \int_0^x \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) dx$$

چون تابع گاما به ازای  $x=0$  (بارش صفر میلی‌متر) تعریف نشده است و توزیع بارش ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی کل که دربرگیرنده مقادیر صفر هم باشد، به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{رابطه ۷-} H_x(x) = q + (1 - q)F_x(x)$$

که در آن  $q$  احتمال مقدار بارش صفر است. اگر  $m$  تعداد داده‌های بارش باشد که مقدار آن‌ها در سری زمانی معادل صفر است، آنگاه  $q$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{رابطه ۸-} q = \frac{m}{n}$$

پس از محاسبه تابع تجمعی کل ( $H_x(x)$ ) تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد  $Z$  (یا  $SPI$ ) با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد. برای دستیابی راحت‌تر به مقادیر  $Z$  یا  $SPI$  بهتر است از تقریب آبراموویتز (Abramovitz and Stegun, 1965) استفاده کرد. این تقریب احتمالات تجمعی را به متغیر تصادفی نرمال استاندارد تبدیل می‌کند.

$$\text{رابطه ۹-} Z = SPI = -\left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right], \text{ for } 0 < H_x(x) \leq 0.5$$

$$Z = SPI = +\left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right], \text{ for } 0.5 < H_x(x) \leq 1.0$$

که در آن،

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H_x(x))^2}\right)}, \text{ for } 0 < H_x(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H_x(x))^2}\right)}, \text{ for } 0.5 < H_x(x) \leq 1.0$$

و ضرایب معادلات بالا به صورت زیر است:

$$C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

با توجه به آنچه تاکنون بیان شد، نتیجه گرفته می‌شود که نکته مهم در محاسبه شاخص  $SPI$  انتخاب یک توزیع آماری مناسب است؛ بنابراین بهتر است که قبل از محاسبه این شاخص، برازش توزیع‌های آماری مختلف با استفاده از آزمون نیکویی برازش یا با رجوع به مطالعات گذشته در منطقه مورد نظر، مورد بررسی قرار گیرد. بذرافشان (۱۳۸۱) با مقایسه برازش هفت توزیع احتمال شامل: نرمال، لوگ نرمال دو پارامتری، لوگ نرمال سه پارامتری، گاما دو پارامتری، پیرسون نوع سه، لوگ پیرسون نوع سه و گامبل در اقلیم‌های مختلف ایران به این نتیجه رسید که در چهار گام زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه، توزیع گاما برازش مناسب‌تری بر داده‌های بارش دارد. به منظور مقایسه دو پایگاه داده با رویکردی فضایی، در اولین مرحله، رسترهای بارش پایگاه‌های داده CHIRPS و ERA5-Land پس از دریافت و تغییر مقیاس زمانی به ماهانه و

تغییر واحد از متر به میلی‌متر با استفاده از بسته نرم‌افزاری  $NCO^6$ ، به پروتجهای netcdf تبدیل گردید و با استفاده از بسته نرم‌افزاری Climate\_indices که یک بسته نرم‌افزاری توسعه داده شده، تحت سیستم‌عامل لینوکس، با زبان برنامه‌نویسی پایتون، در مرکز ملی اطلاعات محیطی سازمان جو و اقیانوس‌شناسی آمریکا (NCEI/NOAA) است (Adams, 2017)؛ شاخص SPI با استفاده از توزیع گاما در گام‌های زمانی ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۶۰ و ۷۲ ماهه برای هر دو پایگاه داده به صورت رستری محاسبه گردید؛ تا توزیع فضایی وضعیت خشک‌سالی نمایان شود. در واقع ورودی این نرم‌افزار به صورت رسترهای بارش ماهانه بوده و محاسبات بر روی تک‌تک پیکسل‌ها در قالب سری‌های زمانی انجام گرفته و خروجی آن نیز در قالب پروتجهای رستری دریافت گردید. در مرحله بعد مقادیر SPI در گام‌های زمانی متناظر برای داده‌های بارش تجمعی ماهانه دریافتی از ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی در سرتاسر ایران مورد محاسبه قرار گرفت. در مرحله آخر، با استفاده از مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها، مقادیر عددی SPI، از رسترهای خروجی نرم‌افزار ArcGIS Climate\_indices از هر دو پایگاه داده، برای همه ماه‌ها، در همه گام‌های زمانی متناظر، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید؛ و خروجی‌ها در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel مورد ارزیابی‌های آماری قرار گرفت. در این مرحله شاخص همبستگی پیرسون بین داده‌های ایستگاهی و پایگاه‌های داده CHIRPS و ERA5-Land برای همه ایستگاه‌ها در همه گام‌های زمانی مورد محاسبه قرار گرفت و با استفاده از روش درون‌یابی Kriging مقادیر همبستگی‌ها در محیط ArcGIS مجدداً به ۲۲ نقشه همبستگی به تفکیک گام‌های زمانی برای هر دو پایگاه داده تبدیل گردید. ضریب همبستگی پیرسون از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{رابطه ۱۰-}$$

در رابطه بالا  $r$  ضریب همبستگی پیرسون و  $x$  و  $y$  متغیرهای مستقل و وابسته می‌باشند که مقادیر بالاتر از ۰ بیانگر رابطه مستقیم و مثبت و مقادیر کمتر از صفر بیانگر رابطه معکوس و مقدار ۰ بیانگر عدم وجود رابطه بین دو متغیر مستقل و وابسته است. در محاسبات ضریب همبستگی، داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک به عنوان متغیر مستقل و داده‌های مستخرج از پایگاه‌های داده CHIRPS و ERA5-Land به عنوان متغیر وابسته در محیط نرم‌افزار Excel برای هر ۱۱۰ ایستگاه قرار گرفتند. شکل ۱ نقشه منطقه مورد مطالعه و پراکنندگی فضایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

**جدول ۲: آستانه‌های طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی SPI**

| ترسالی         |             |             | شرایط نرمال   | خشک‌سالی      |               |                |
|----------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| خیلی شدید      | شدید        | متوسط       |               | متوسط         | شدید          | خیلی شدید      |
| ۲,۰ و بیشتر... | ۱,۹۹ تا ۱,۵ | ۱,۴۹ تا ۱,۰ | -۰,۹۹ تا ۰,۹۹ | -۱,۰ تا -۱,۴۹ | -۱,۵ تا -۱,۹۹ | -۲,۰ و کمتر... |

<sup>6</sup> The NetCDF Operator

## بحث و یافته‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هدف این مطالعه بررسی و مقایسه عملکرد دو پایگاه داده CHIRPS و ERA5-Land به‌عنوان دو پایگاه داده جدید با بیشترین قدرت تفکیک مکانی و زمانی، در حوزه داده‌های شبکه‌ای بارش در منطقه فلات ایران؛ و با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون است. شکل‌های ۲ و ۳ نقشه مقادیر همبستگی بین پایگاه‌های داده ERA5-Land<sup>۷</sup> و CHIRPS با مقادیر SPI مستخرج از داده‌های ایستگاهی که با روش Kriging و در ۱۰ طبقه درون‌یابی شده است را برای گام‌های زمانی ۱ تا ۷۲ ماهه نشان می‌دهد.<sup>۸</sup> تفاوت‌های دو پایگاه داده را می‌توان در تغییرات الگوی فضایی، تفاوت در میزان همبستگی با داده‌های ایستگاهی، دامنه تغییرات و همچنین روند تغییرات همبستگی و الگوی فضایی آن در گام‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار داد که در ادامه می‌آید: با توجه به شکل‌ها، اولین نکته‌ای که به دست می‌آید، همبستگی بیشتر پایگاه داده ERA5-Land با داده‌های ایستگاهی نسبت به CHIRPS در تمامی گام‌های زمانی است. به جهت درک بهتر روابط فضایی هر دو پایگاه داده، داده‌ها به تفکیک گام‌های زمانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در شاخص SPI-1، اولین نکته‌ای که در پایگاه داده ERA5-Land دیده می‌شود، این است که تمامی مناطق زاگرس از شمال غرب تا کرمان، سواحل شمالی و البرز مرکزی و همچنین شرق سیستان از همبستگی خوبی با داده‌های ایستگاهی برخوردارند؛ و کمترین مقادیر همبستگی در مناطق پست و کم ارتفاع کویر مرکزی و شرق ایران همچون یزد، خراسان جنوبی و همچنین جلگه خوزستان مشاهده می‌شود. در حالی که در CHIRPS، مناطق با همبستگی کم، بخش‌های بیشتری از فلات ایران را دربرگرفته است؛ به‌طوری که از جنوب تا شمال کشور و تمامی مناطق شرقی کشور از همبستگی‌های کمتر از ۰٫۶ برخوردارند و فقط مناطقی از زاگرس مرتفع و شمال غرب ایران از همبستگی خوبی در پایگاه داده CHIRPS در مقیاس یک‌ماهه برخوردارند. شاید بتوان علت این تفاوت را در خود ماهیت شاخص یک‌ماهه SPI دانست. تفسیر شاخص SPI-1 بدون در نظر گرفتن اقلیم منطقه ممکن است به نتایج اشتباه منجر شود؛ زیرا شاخص SPI-1 به‌نوعی همان اختلاف بارش ماهانه با میانگین بلندمدت است و در مناطق خشک که اغلب ماه‌ها بارش صفر است، نوسانات بسیار کوچک نسبت به میانگین بارش نیز می‌تواند مقادیر SPI بسیار بالا یا پایین و خلاف واقعیتی ارائه دهد (WMO, 2012). در واقع به دلیل خشکی مناطق شرقی و مرکزی ایران، بارش در این مناطق در اکثر ایام سال صفر است و این ویژگی می‌تواند تفسیر این شاخص را در این گام زمانی دچار خطا کند. از طرف دیگر، قدرت تفکیک مکانی بیشتر CHIRPS نسبت به ERA5-Land می‌تواند پراکندگی فضایی داده‌ها را افزایش دهد که در مناطق خشک با بارش‌های رگباری، این موضوع ممکن است بتواند منجر به کاهش سطح همبستگی فضایی بین این پایگاه داده و داده‌های نقطه‌ای ایستگاهی شود. همچنین دامنه مقادیر همبستگی در پایگاه داده CHIRPS در گام زمانی یک‌ماهه در مقایسه با ERA5-Land کمتر می‌باشد.

<sup>۷</sup> برای اختصار به‌جای ERA5-Land از ERA5 استفاده شده است.

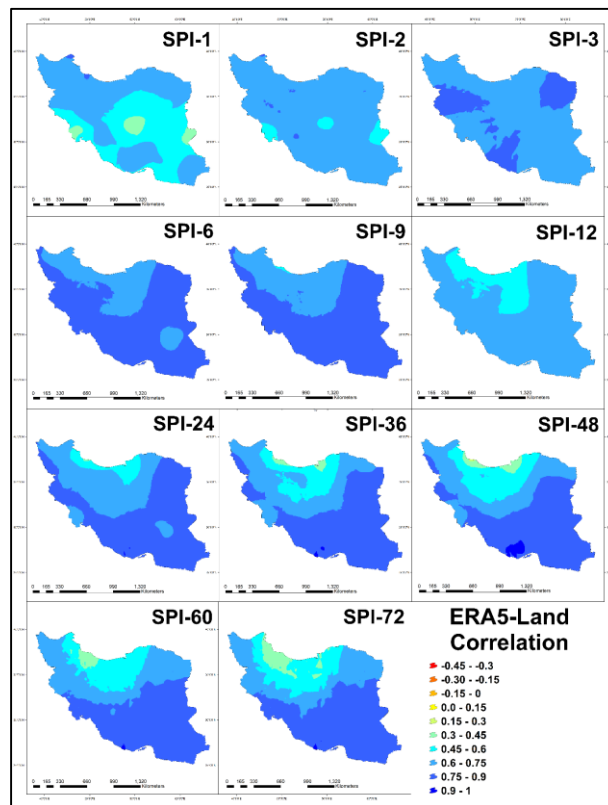
<sup>۸</sup> مقادیر P-Value اکثر ایستگاه‌ها به‌خصوص در گام‌های زمانی کمتر از ۲۴ ماهه در سطح ۰٫۰۵ معنادار بوده و به جهت ازدیاد مطالب و تعداد بالای ایستگاه‌ها از قرار دادن آن در متن مقاله خودداری گردید.

به منظور درک تفاوت عملکرد دو پایگاه داده در میزان همبستگی با داده‌های ایستگاهی، مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین، دامنه تغییرات، انحراف معیار و ضریب تغییرات آماره همبستگی پیرسون برای همه گام‌های زمانی مورد محاسبه شاخص SPI برای میانگین نقاط معادل هر ۱۱۰ ایستگاه ایران در هر دو پایگاه داده ERA5-Land و CHIRPS مورد محاسبه قرار گرفت که در جدول ۳ آورده شده است:

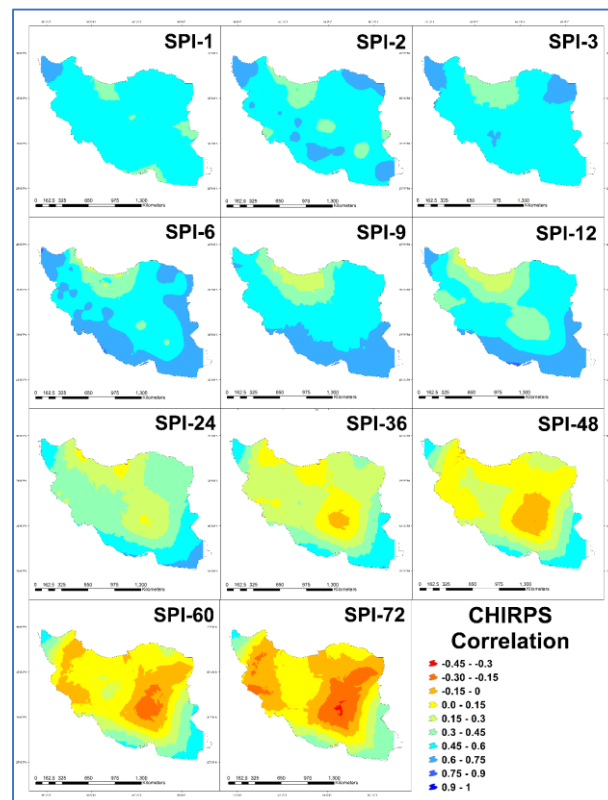
جدول ۳: شاخص‌های تمرکز و پراکندگی میزان همبستگی در منطقه مورد مطالعه

| گام زمانی | ERA5-Land پایگاه داده |       |         |               |              |              | CHIRPS پایگاه داده |       |         |               |              |              |
|-----------|-----------------------|-------|---------|---------------|--------------|--------------|--------------------|-------|---------|---------------|--------------|--------------|
|           | حداکثر                | حداقل | میانگین | دامنه تغییرات | انحراف معیار | ضریب تغییرات | حداکثر             | حداقل | میانگین | دامنه تغییرات | انحراف معیار | ضریب تغییرات |
| SPI1      | 0.82                  | 0.31  | 0.63    | 0.51          | 0.1          | 15.75        | 0.72               | 0.32  | 0.51    | 0.4           | 0.09         | 17.16        |
| SPI2      | 0.83                  | 0.41  | 0.7     | 0.42          | 0.08         | 11.29        | 0.73               | 0.24  | 0.53    | 0.49          | 0.1          | 18.05        |
| SPI3      | 0.86                  | 0.51  | 0.73    | 0.35          | 0.07         | 9.79         | 0.74               | 0.18  | 0.55    | 0.55          | 0.11         | 19.5         |
| SPI6      | 0.93                  | 0.47  | 0.76    | 0.45          | 0.08         | 11.11        | 0.77               | 0.11  | 0.56    | 0.67          | 0.14         | 24.92        |
| SPI9      | 0.94                  | 0.42  | 0.76    | 0.52          | 0.1          | 13.55        | 0.84               | 0     | 0.52    | 0.84          | 0.17         | 32.9         |
| SPI12     | 0.81                  | 0.3   | 0.65    | 0.51          | 0.1          | 15.39        | 0.84               | -0.05 | 0.48    | 0.89          | 0.18         | 38           |
| SPI24     | 0.95                  | 0.1   | 0.73    | 0.84          | 0.15         | 21.06        | 0.82               | -0.17 | 0.35    | 0.99          | 0.23         | 63.75        |
| SPI36     | 0.96                  | -0.05 | 0.7     | 1.01          | 0.19         | 26.62        | 0.81               | -0.39 | 0.25    | 1.2           | 0.27         | 106.55       |
| SPI48     | 0.97                  | -0.19 | 0.69    | 1.15          | 0.21         | 30.72        | 0.83               | -0.52 | 0.19    | 1.35          | 0.31         | 164.59       |
| SPI60     | 0.98                  | -0.32 | 0.67    | 1.29          | 0.24         | 35.09        | 0.85               | -0.62 | 0.12    | 1.48          | 0.35         | 289.07       |
| SPI72     | 0.98                  | -0.41 | 0.66    | 1.39          | 0.26         | 40.06        | 0.87               | -0.71 | 0.05    | 1.58          | 0.39         | 720.5        |

با توجه به اطلاعات جدول ۳ می‌توان دریافت که میزان دامنه تغییرات در پایگاه داده CHIRPS نسبت به ERA5-Land در گستره ایران کمتر بوده و همچنین به‌طور کلی این پایگاه داده همبستگی کمتری را نیز نسبت به ERA5-Land با داده‌های ایستگاهی در گام زمانی SPI-1 از خود نشان می‌دهد. در گام زمانی SPI-2 الگوی فضایی همبستگی‌ها در هر دو پایگاه داده تقویت می‌شود؛ به نحوی که در CHIRPS پوشش مناطق با همبستگی بالا گسترش یافته و تمام مناطق نوار کوهستانی زاگرس، از شمال غرب تا استان‌های فارس و کرمان و همچنین شمال شرق کشور تا خراسان جنوبی را در بر می‌گیرد؛ اما کماکان مناطق شمالی و البرز مرکزی تا محدوده استان مرکزی در گستره مناطق با کمترین میزان همبستگی قرار دارند. در ERA5-Land اما مناطق با همبستگی کم، با حفظ نسبی الگوی SPI-1 ماهه، در نوار شمالی شامل بخش‌های محدودی از استان گلستان، در جنوب غرب، نیمه غربی خوزستان و در شرق کشور در اطراف زاابل می‌شود. در مقابل، سایر مناطق کشور از همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی برخوردارند. از نظر تغییرات مقادیر همبستگی نیز، در پایگاه داده CHIRPS افزایشی در دامنه مقادیر مشاهده می‌شود و در واقع پراکندگی همبستگی در سطح کشور در این گام زمانی افزایش می‌یابد. در مقابل، در پایگاه داده ERA5-Land دامنه مقادیر در گام زمانی SPI-2 کاهش می‌یابد و در واقع عملکرد بهتری نسبت به CHIRPS در همبستگی با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۲: نقشه همبستگی فضایی داده‌های ERA5-Land با داده‌های ایستگاهی



شکل ۳: نقشه همبستگی فضایی داده‌های CHIRPS با داده‌های ایستگاهی

در گام زمانی SPI-3 در CHIRPS کمترین مناطق همبستگی به مناطق شمالی و البرز مرکزی محدود می‌شود در حالی که در ERA5-Land پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود؛ به طوری که الگوی پراکندگی به SPI-2 در پایگاه داده CHIRPS شباهت دارد. کماکان مناطق شمالی کشور، خوزستان، شرق و جنوب شرق کشور دارای کمترین همبستگی با داده‌های ایستگاهی می‌باشند؛ اما مهم‌ترین تفاوت در دو پایگاه داده، در بالاتر بودن مقادیر همبستگی در پایگاه داده ERA5-Land نسبت به CHIRPS است. در ERA5-Land تمامی مناطق ایران از همبستگی بالای ۰٫۶ برخوردارند. با توجه به جدول ۳ نیز مشخص می‌شود که تفاوت فاحشی بین دامنه تغییرات و ضریب تغییرات میزان همبستگی در دو پایگاه داده وجود دارد. کمترین میزان ضریب تغییرات همبستگی در گستره ایران در پایگاه داده ERA5-Land در گام زمانی SPI-3 مشاهده می‌شود. در گام زمانی SPI-6، شباهت الگوی فضایی پراکندگی همبستگی‌ها در هر دو پایگاه داده افزایش می‌یابد. همچنان مناطق با کمترین همبستگی‌ها در نوار شمالی و البرز مرکزی و تا حدودی کویر مرکزی ایران دیده می‌شود. در پایگاه داده ERA5-Land همچنان تمامی منطقه مورد مطالعه از همبستگی خوبی (بالای ۰٫۶) با داده‌های ایستگاهی برخوردار است؛ اما در CHIRPS دامنه مقادیر همبستگی در منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد و مقادیر حداقل همبستگی‌ها تا ۰٫۱۳ کاهش می‌یابد در واقع ضریب تغییرات همبستگی در پایگاه داده CHIRPS از گام زمانی SPI-3 ماهه افزایش می‌یابد. در از گام زمانی SPI-9 تا SPI-24 الگوی فضایی همبستگی‌ها در هر دو پایگاه داده تغییر چندانی نمی‌کند. تنها تفاوت در تغییرات مقادیر همبستگی است به صورتی که در ERA5-Land مقادیر همبستگی افزایش می‌یابد؛ البته از گام زمانی SPI-6 میزان ضریب تغییرات در این پایگاه داده نیز با روندی آهسته‌تر از CHIRPS افزایش می‌یابد؛ اما در CHIRPS ضریب تغییرات همبستگی در منطقه مورد مطالعه با روندی شدید افزایش می‌یابد به نحوی که مقادیر حداکثری همبستگی تا ۰٫۷۸ و مقادیر حداقل همبستگی به اعداد منفی نیز میل می‌کند؛ و این مورد نشان‌دهنده عدم کارایی مناسب این پایگاه داده در گام‌های زمانی بالاتر از SPI-6 در مناطق یاد شده، است. از گام زمانی SPI-36 به بعد در پایگاه داده CHIRPS مناطق با همبستگی کم، از نظر فضایی گسترش یافته و بخش‌های وسیعی از ایران را در برمی‌گیرد و فقط مناطق نوار جنوبی و بخش‌های محدودی از شمال غرب کشور بالاترین همبستگی‌ها را نشان می‌دهند که البته مقادیر حداکثر همبستگی‌ها در گام‌های زمانی بالاتر از SPI-36 در این پایگاه داده از ۰٫۶ فراتر نمی‌رود. در حالی که مقادیر حداقلی همبستگی تا ۰٫۳- نیز کاهش می‌یابد؛ اما در ERA5-Land علیرغم افزایش ضریب تغییرات همبستگی در گستره ایران، به‌جز مناطق شمالی البرز مرکزی سایر مناطق ایران همبستگی خوبی با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهند و البته مقادیر همبستگی ERA5-Land نیز نسبت به CHIRPS بسیار بالا است به صورتی که حداکثر مقادیر همبستگی را در گام‌های زمانی بالاتر از SPI-36 در ERA5-Land می‌توان مشاهده کرد. جدول 4 تعداد شهرهای با همبستگی معنادار در سطح ۰٫۰۵ را برای هر دو پایگاه داده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تعداد ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه، از گام زمانی SPI-9 در CHIRPS و از گام زمانی SPI-36 در ERA5-Land تعداد شهرهای با همبستگی معنادار در

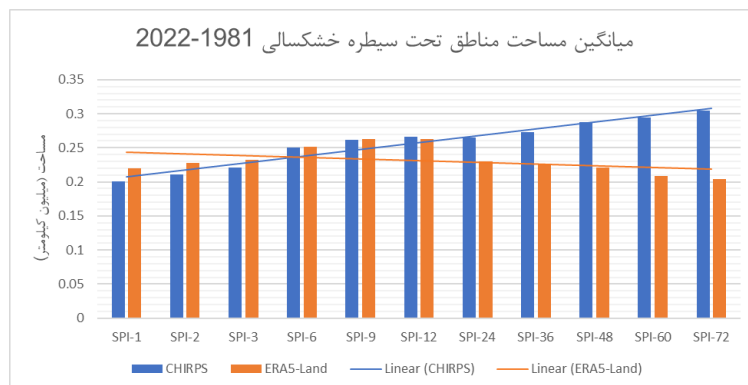
سطح ۰,۰۵ کاهش می‌یابد؛ اما این کاهش در CHIRPS بسیار شدیدتر بوده به صورتی که در گام زمانی SPI-72 تنها ۴۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه با داده‌های CHIRPS همبستگی معناداری نشان داده‌اند.

جدول ۴: تعداد شهرهای با همبستگی معنادار در سطح آلفای ۰,۰۵

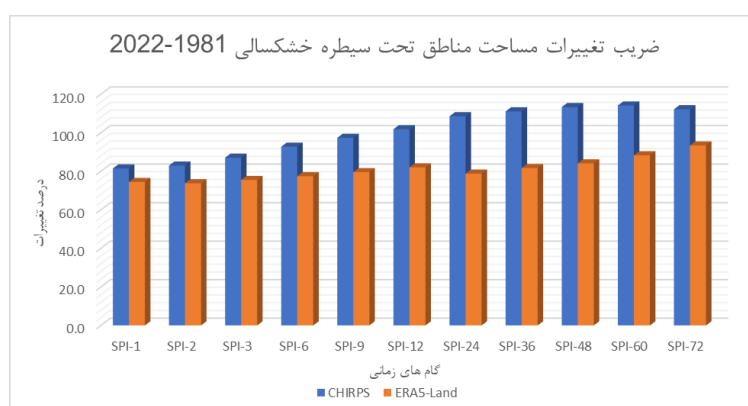
| پایگاه داده | SPI-1 | SPI-2 | SPI-3 | SPI-6 | SPI-9 | SPI-12 | SPI-24 | SPI-36 | SPI-48 | SPI-60 | SPI-72 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CHIRPS      | 110   | 110   | 110   | 110   | 108   | 106    | 99     | 81     | 60     | 53     | 44     |
| ERA5_Land   | 110   | 110   | 110   | 110   | 110   | 110    | 110    | 109    | 109    | 107    | 107    |

در مرحله بعدی مساحت مناطق دارای خشک‌سالی از رسترهای پایگاه‌های داده ERA5-Land و CHIRPS مورد محاسبه قرار گرفت. شکل ۴ میانگین مناطق تحت سیطره خشک‌سالی (SPI کمتر از  $-1,0$ ) را در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۲ برای هر دو پایگاه داده ERA5-Land و CHIRPS نشان می‌دهد. واحد مقادیر نمودار برحسب میلیون کیلومتر مربع است. علت انتخاب این بازه زمانی علیرغم بیشتر بودن طول دوره آماری ERA5-Land، هم‌زمان شدن و مقایسه درست دو پایگاه داده است. همان‌طور که از نمودار نیز مشخص می‌شود، در پایگاه داده ERA5-Land مساحت مناطق تحت سیطره خشک‌سالی با افزایش آهسته تا گام‌های زمانی SPI-9 و SPI-12 به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس با افزایش گام‌های زمانی کاهش می‌یابد که البته از نظر منطقی نیز درست به نظر می‌رسد؛ زیرا در گام‌های زمانی بالاتر خشک‌سالی‌های کوچک مقیاس و کوتاه مدت با دوره‌های ترسالی خنثی شده و طبیعتاً مناطق درگیر خشک‌سالی مساحت کمتری نشان خواهند داد؛ اما در پایگاه داده CHIRPS با افزایش گام زمانی، مساحت مناطق تحت سیطره خشک‌سالی از گام زمانی SPI-24 روندی افزایشی و محسوس در پیش می‌گیرد. به‌طور کلی میزان مساحت محاسبه شده در هر دو پایگاه داده نیز تا گام زمانی SPI-12 نزدیک به هم و نسبتاً برابر است اما از گام زمانی SPI-24 به بعد اختلاف فاحشی بین مساحت محاسبه شده در هر دو پایگاه داده شکل می‌گیرد که با افزایش گام‌های زمانی این اختلاف بیشتر می‌شود. شکل 5 نیز ضریب تغییرات (CV) مناطق تحت سیطره خشک‌سالی به تفکیک گام‌های زمانی یازده‌گانه در دوره مورد مقایسه (۱۹۸۱-۲۰۲۲) برای هر دو پایگاه داده CHIRPS و ERA5-Land را نشان می‌دهد: همان‌طور که در نمودار نیز مشخص است، ضریب تغییرات مساحت مناطق تحت تأثیر خشک‌سالی در ERA5-Land نسبت به CHIRPS کمتر بوده و در گام‌های زمانی مختلف، از ثبات بیشتری برخوردار است و روند تغییرات آن از گام‌های زمانی کوتاه به گام‌های بلند با شیبی آهسته افزایش می‌یابد؛ اما در CHIRPS این تغییرات بیشتر بوده و تا گام زمانی SPI-36 افزایش قابل توجهی می‌یابد و از گام زمانی SPI-48 روند آن ثابت می‌شود. نکته قابل توجه دیگر نزدیک بودن ضرایب تغییرات هر دو پایگاه داده در گام‌های زمانی کوتاه مدت است که در با افزایش گام‌های زمانی فاصله بین آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.





شکل ۴: نمودار میانگین مساحت مناطق تحت سیطره خشکسالی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۲۲



شکل ۵: نمودار ضریب تغییرات مساحت نواحی تحت سیطره خشکسالی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۲۲

## نتیجه گیری

با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و گام‌های زمانی کوتاه تا بلندمدت آن می‌توان اثرات خشکسالی را در بخش‌های مختلف همچون کشاورزی، هیدرولوژی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و... مورد پایش و ارزیابی قرار داد. پایگاه‌های داده CHIRPS و ERA5-Land هر دو با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، امکان خوبی را در مطالعه خشکسالی‌ها به دست می‌دهند؛ اما عملکرد آن‌ها ذاتاً می‌تواند تحت تأثیر اقلیم‌های مختلف، تغییر کند از این‌رو بررسی عملکرد آن‌ها در گام‌های زمانی مختلف و در اقلیم‌های مختلف نیازمند ارزیابی است. شاخص‌های خشکسالی SPI-1 و SPI-2 از جهت کوتاه مدت بودن، غالباً برای مطالعه اثرات خشکسالی‌های هواشناسی، استرس‌های رطوبتی گیاه و کاهش رطوبت خاک خصوصاً در دوره رشد گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که هر دو پایگاه داده ERA5-Land و CHIRPS توانایی خوبی در ترسیم وضعیت خشکسالی‌های کوتاه مدت و استفاده در مطالعات مرتبط دارند. همچنین قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر پایگاه داده CHIRPS (درجه ۰٫۰۵) توانایی‌های این پایگاه داده را در مطالعات مرتبط با پایش وضعیت رطوبت خاک و استرس‌های رطوبتی گیاه در مقیاس‌های محلی آشکار می‌سازد. البته با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از این داده‌ها در مناطق خشک می‌بایست با احتیاط صورت گیرد؛ زیرا محاسبه شاخص‌های

کوتاه مدت خشک‌سالی در مناطق خشک که اغلب ماه‌ها بارش صفر است، ممکن است به نتایج نادرستی منتج شود. همچنین نتایج یافته‌ها نشان داد که پایگاه داده CHIRPS در مناطق شمالی کشور، در گام‌های زمانی کوتاه مدت، نسبت به ERA5-Land عملکرد خوبی نداشته و استفاده از این پایگاه داده در این مناطق نیازمند در نظر گرفتن احتیاط و ملاحظات بیشتر است. شاخص خشک‌سالی SPI-3، بازتابی از وضعیت کوتاه تا میان مدت رطوبت و در واقع شاخص فصلی خشک‌سالی SPI است. شاخص SPI-3 در مناطق کشاورزی اصلی‌ترین شاخص برای اندازه‌گیری وضعیت رطوبت و اثرات آن بر رشد گیاه و محصولات کشاورزی و همچنین در خشک‌سالی‌های هواشناسی و بارش‌های فصلی و موسمی می‌باشد. با توجه به نتایج آشکار می‌گردد که هر دو پایگاه داده ERA5-Land و CHIRPS توانایی بسیار خوبی در آشکارسازی خشک‌سالی‌های فصلی در اغلب نقاط ایران دارند. البته همچنان در پایگاه داده CHIRPS، استفاده از آن در مناطق شمالی و البرز مرکزی می‌بایست با احتیاط بیشتری صورت گیرد. شاخص خشک‌سالی SPI-6، ماهه شاخص مناسبی برای بررسی خشک‌سالی در ایام بارندگی در اقلیم‌های با فصول بارش مشخص همچون اقلیم‌های مدیترانه‌ای است. در اغلب مناطق ایران که بخش اعظم بارش در فاصله ماه‌های مهر تا فروردین ریزش می‌کند، شاخص SPI-6 می‌تواند نشانگر خوبی از وضعیت خشک‌سالی و تأثیر عمومی آن بر بخش کشاورزی و محصولات مختلف آن و همچنین در بحث هیدرولوژی منابع آب‌های سطحی و کارستی باشد. با توجه به نتایج و خروجی نقشه‌ها می‌توان مشاهده کرد که پایگاه داده ERA5-Land قابلیت خوبی در ترسیم وضعیت خشک‌سالی‌های تمامی مناطق فلات ایران در گام زمانی شش‌ماهه دارد؛ اما پایگاه داده CHIRPS در مناطق شمالی و بخش‌هایی از مناطق مرکزی ایران چندان مناسب نخواهد بود. گام زمانی SPI-9 ماهه شاخص خوبی برای نشان دادن خشک‌سالی‌های بین فصلی و در واقع شاخصی میان مدت از ارتباط خشک‌سالی‌های کوتاه مدت با خشک‌سالی‌های بلندمدت‌تر است. در واقع شروع و گذار از خشک‌سالی‌های میان مدت به بلندمدت‌تر را می‌توان در تحلیل خشک‌سالی‌های ۹ ماهه بررسی کرد. در نتایج به دست آمده نیز مشخص شد که هر دو پایگاه داده در ترسیم خشک‌سالی‌ها در فلات ایران، به جز مناطق شمالی کشور و البرز مرکزی عملکرد قابل قبولی دارند؛ و البته توانایی‌های پایگاه داده ERA5-Land در این مقیاس نیز نسبت به CHIRPS قابل اعتماد تر به نظر می‌رسد. در گام‌های زمانی SPI-12 و SPI-24 به بالا مقادیر SPI به سمت ۰ گرایش پیدا می‌کند و خشک‌سالی و ترسالی‌های کوتاه مدت اثرات هم‌دیگر را خنثی می‌کنند. این گام‌های زمانی برای مطالعه خشک‌سالی‌های هیدرولوژی منابع آب‌های سطحی جریانات سطحی و زیرسطحی و حتی آب‌های زیرزمینی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. همان‌طور که در نتایج مشخص شد، از گام زمانی SPI-12 تعداد شهرهای با همبستگی معنادار در سطح معناداری ۰,۰۵ در پایگاه داده CHIRPS رو به کاهش می‌گذارد و مناطق با همبستگی کم به بخش‌های بیشتری از ایران گسترش می‌یابد. به جز مناطق محدودی از نوار جنوب و شمال غرب کشور، بقیه مناطق همبستگی بسیار کمی با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهند و این وضعیت در گام‌های زمانی بالاتر در این پایگاه داده گسترش می‌یابد و همچنین تعداد شهرهای با همبستگی معنادار نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد به طوری که در گام زمانی SPI-72 تنها در ۴۰ درصد از شهرهای مورد مطالعه همبستگی معناداری با داده‌های ایستگاهی مشاهده

می‌شود؛ که این موضوع گویای عدم کارایی این پایگاه داده در ترسیم خشک‌سالی‌های بلندمدت در منطقه فلات ایران است. در مقابل اما در پایگاه داده ERA5-Land مناطق با همبستگی کم کماکان با حفظ الگوی نسبی، به جز در مناطق شمالی و البرز مرکزی و بخش‌هایی از گیلان و اردبیل، در سایر مناطق ایران عملکرد خوبی در ترسیم خشک‌سالی‌های این منطقه از خود نشان می‌دهد. همچنین مقادیر همبستگی نیز نسبت به CHIRPS بسیار بالاتر است. از نظر معناداری همبستگی‌ها در گستره ایران نیز تنها کمتر از ۳ درصد از شهرهای مورد مطالعه از گام‌های زمانی SPI-36 دارای همبستگی معنادار نبوده است. با توجه به اهداف پژوهش و مطالبی که گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو پایگاه داده‌ای ERA5-Land و CHIRPS در ترسیم خشک‌سالی‌ها در گام‌های زمانی کوتاه تا میان‌مدت، در منطقه فلات ایران توانایی خوبی دارند که البته با افزایش طول دوره خشک‌سالی مورد محاسبه، در CHIRPS در گام‌های زمانی بلندمدت این توانایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شاید بتوان این اختلاف عملکرد را در طول دوره آماری کوتاه‌تر پایگاه داده CHIRPS نسبت به ERA5-Land دانست. به‌طور کلی محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI با داشتن ۲۰-۳۰ سال داده و در مقیاس ۱ تا ۷۲ ماهه امکان‌پذیر است؛ اما از نظر آماری بهترین نتایج در مقیاس زمانی ۱-۲۴ ماهه قابل محاسبه است (Guttman, 1994). گاتمن توصیه می‌کند که برای محاسبات آماری بر بارش ماهانه، داشتن حداقل ۵۰-۶۰ سال داده می‌تواند مناسب باشد. با داشتن حداقل ۳۰ سال داده، محاسبات بیشتر از ۲۴ ماه، از نظر آماری نتایجی ضعیف و غیرقابل اعتماد در بر خواهد داشت. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که میزان همبستگی داده‌های CHIRPS با ۴۰ سال داده، در گام‌های زمانی بالا در مقایسه با ERA5\_Land بشدت کاهش می‌یابد و در گام‌های ۵-۶ ساله حتی منفی می‌شود و از نظر آماری نیز معناداری همبستگی‌ها از بین می‌رود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در مطالعات با هدف بررسی خشک‌سالی‌های بلندمدت، در فلات ایران پایگاه داده ERA5-Land نسبت به CHIRPS مناسب‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشد. همچنین با توجه به ضرایب همبستگی به دست آمده در گام‌های زمانی مختلف، کیفیت بهتر داده‌های ERA5-Land آشکار می‌شود. این پایگاه داده در گام‌های زمانی کوتاه تا بلند دارای همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی در اغلب مناطق ایران بوده و برای استفاده در مطالعات خشک‌سالی در مقیاس‌های کوتاه مدت همچون کاهش رطوبت خاک و میان‌مدت در بحث اثرات خشک‌سالی بر کشاورزی و همچنین خشک‌سالی‌های بلندمدت و اثرات آن بر منابع آبی می‌تواند گزینه مناسبی باشد. البته باید در نظر داشت که قدرت تفکیک مکانی ERA5\_Land ۱,۰ درجه، اما CHIRPS ۰,۵ درجه است که در مطالعات با مقیاس کوچک و محلی، با جزئیات بیشتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت با توجه به مطالبی که گفته شد می‌توان گفت که عملکرد پایگاه داده ERA5-Land در آشکارسازی خشک‌سالی‌های ایران بهتر از CHIRPS می‌باشد. تاکنون مطالعاتی در زمینه مقایسه عملکرد پایگاه‌های داده‌های بارش شبکه‌ای در گستره ایران حوزه‌های آبریز انجام شده است؛ اما اغلب این مطالعات صرفاً در زمینه برآورد بارش و نه خشک‌سالی، به مقایسه این پایگاه‌های داده‌ای پرداخته‌اند؛ که البته غالب این مطالعات نیز به‌صورت بررسی‌های ایستگاهی و نقطه‌ای بوده است. همچنین تاکنون در مطالعات گذشته از داده‌های مدل جزء سطح زمین پایگاه داده باز تحلیل ERA5 یعنی پایگاه داده

ERA5-Land استفاده نشده بود؛ که البته این مورد به دلیل جدید بودن این پایگاه داده بارشی می‌باشد؛ که البته نتایج این پژوهش نیز از توانایی خوب این پایگاه داده در آشکارسازی وضعیت خشک‌سالی‌ها در این منطقه پرده برداشت. این پایگاه داده با داشتن طول دوره آماری بسیار طولانی (۷۳ سال) و قابل قبول در کنار قدرت تفکیک مکانی مناسب، گزینه بسیار خوبی جهت انجام مطالعات مرتبط با تغییرات و پراکندگی بارش، خشک‌سالی و سایر پدیده‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. همچنین در پژوهش حاضر میزان مساحت مناطق تحت سیطره خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی مختلف در دو پایگاه داده مورد مطالعه قرار گرفت؛ که تاکنون در سایر پژوهش‌های مرتبط با حوزه خشک‌سالی در ایران به این صورت انجام نشده است. به‌طور کلی می‌توان نوآوری‌های مطالعه حاضر را در ۱- استفاده از پایگاه داده جدید ERA5-Land با طول دوره آماری بیش از ۷۰ سال؛ ۲- محاسبه فضایی شاخص SPI بر روی داده‌های رستری با استفاده از توزیع چگالی احتمال گاما و در نظر گرفتن هر پیکسل به‌عنوان یک سری زمانی؛ ۳- محاسبه مساحت مناطق تحت سیطره خشک‌سالی در طبقات مختلف و مقایسه آن‌ها؛ و همچنین تحلیل فضایی خشک‌سالی‌ها در 11 گام زمانی از کوتاه مدت تا بلندمدت برای فلات ایران دانست. البته کماکان بررسی‌های بیشتری لازم است تا قابلیت‌های این دو پایگاه داده در آشکارسازی خشک‌سالی‌ها مورد آزمون و ارزیابی قرار گیرد؛ که از آن جمله و به‌عنوان موضوعات جدید برای پژوهش، می‌توان به بررسی عملکرد این پایگاه‌های داده در بررسی خشک‌سالی‌های کوتاه مدت چون خشک‌سالی‌های هفتگی و نیم ماهه؛ و همچنین بررسی عملکرد شاخص SPI در صورت استفاده از توزیع پیرسون اشاره کرد. همچنین می‌بایست مطالعات بیشتری در مورد بررسی نقش طول آماری کوتاه‌تر (۴۲ سال) پایگاه داده CHIRPS و نقش آن در عملکرد ضعیف‌تر این پایگاه داده، نسبت به ERA5-Land انجام شود.

## منابع

- ۱- بذرافشان، جواد (۱۳۸۱): مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی. دانشگاه تهران - کرج.
- ۲- دارند، محمد و زند کریمی، سوما. (۱۳۹۵): ارزیابی دقت داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی بر روی ایران. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰(۳)، ۹۵-۱۱۳.
- ۳- زارع پور هادی، ولی عباسعلی، قربانی حمید، ساداتی نژاد سید جواد، علوی‌نیا سیدحسن. (۱۴۰۰): تحلیل آماری بلندمدت روند خشک‌سالی هواشناسی استان اصفهان. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان. سال ۱۱، شماره ۳۴، بهار ۱۴۰۱، صص ۱۱۳-۱۲۶.
- ۴- دوستان رضا. (۱۳۹۸): تحلیلی بر تحقیقات خشک‌سالی در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال ۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صص ۵۳ تا ۹۴.
- ۵- علیجانی بهلول، کاویانی محمدرضا. (۱۳۸۷): مبانی آب و هواشناسی. چاپ ۱۴، تهران، سمت.

۶- غفوریان هادی، سید حسین ثنائی نژاد، داوری کامران. (۱۳۹۳): بررسی تعیین مناطق مناسب جهت پایش خشک سالی با استفاده از داده های ماهواره TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸ (۳)، ۶۳۹-۶۴۸.

۷- فاضل دهکردی لیلا، سهرابی طیبیه السادات، محمودی کهن فرهاد. (۱۳۹۴): پایش خشک سالی با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس در مناطق خشک. مجله علمی-پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان. سال ۴، شماره ۹، زمستان ۹۴.

۸- قربانی حمید، عباسعلی ولی زارع پور هادی. (۱۳۹۸): تحلیل روند خشک سالی هواشناسی با استفاده از آزمون های من-کندال، سن و پیتیت در استان اصفهان. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال ۶، شماره ۲، تابستان ۹۸، صفحات ۱۲۹-۱۴۶.

۹- کله هوئی مهین، کاویان عطاءاله، شاهدی کاکا، سلطانی میلاد. (۱۳۹۶): پهنه بندی خشک سالی جلگه خزر با استفاده از شاخص های SPI و ZCI. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری. سال ۶، شماره ۲۰، بهار ۱۳۹۷.

۱۰- گرجی زاده، علی، آخوند علی، علی محمد، شهبازی، علی و مریدی، علی. (۱۳۹۸): مقایسه و ارزیابی بارش برآورد شده توسط مدل های ERA-Interim, PERSIANN-CDR و CHIRPS در بالادست سد مارون. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱۵ (۱)، ۲۶۷-۲۷۹.

۱۱- محمودی بابان، سجاد، نسترنی عموقین، سعید و رسول زاده، علی. (۱۴۰۱): ارزیابی محصولات بارش ماهواره ای جهت برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۴)، ۱۰۷-۱۲۲.

۱۲- نظافت، آرزو. مریدی، علی. گرجی زاده، علی؛ و یوسفی، حسین. (۱۴۰۰): ارزیابی عملکرد محصولات شبکه بندی بارش با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و توپوگرافی در ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۲)، ۶۲-۸۱.

- 13- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (1965): Handbook Of Mathematical Functions. Dover Publications Inc. New York.
- 14- Adams, J. (2017): Climate\_Indices: An Open-Source Python Library Providing Reference Implementations Of Commonly Used Climate Indices. Retrieved From [https://Github.Com/Monocongo/Climate\\_Indices](https://Github.Com/Monocongo/Climate_Indices)
- 15- Awchi, T. A. & Kalyana M. M. (2017): Meteorological Drought Analysis In Northern Iraq Using Spi And Gis. Water Resources Management, 31(3), 451-463.
- 16- Dai, A. (2011): Characteristics And Trends In Various Forms Of The Palmer Drought Severity Index During 1900-2008. Journal Of Geophysical Research, 116, D12115.
- 17- Dukat, P. Bednorz, E. Ziemblinska, K. & Urbaniak, M. (2022): Trends In Drought Occurrence And Severity At Mid-Latitude European Stations (1951-2015) Estimated Using Standardized Precipitation (Spi) And Precipitation And Evapotranspiration (Spei) Indices. Meteorology And Atmospheric Physics, 134(1), 67-85.
- 18- Funk, C. Peterson, P. Landsfeld, M. Et Al. The Climate Hazards Infrared Precipitation With Stations—A New Environmental Record For Monitoring Extremes. Sci Data 2, 150066 (2015).
- 19- Gao, F. Zhang, Y. Ren, X. Et Al. (2018): Evaluation Of Chirps And Its Application For Drought Monitoring Over The Haihe River Basin, China. Natural Hazards, 92(1), 155-172.
- 20- Guttman, N. B. (1994): On The Sensitivity Of Sample L-Moments To Sample Size. Journal Of Climate, 7(7), 1026-1029.
- 21- Javanmard, S. Emamhadi, M. Bodaghjamali, J. & Didehvarasl, A. (2017). Spatial-Temporal Analysis Of Drought In Iran Using Spi During A Long-Term Period. Earth Sciences, 6(2), 15-29.
- 22- Rhee, J. Im, J. & Carbone, G. J. (2010): Monitoring Agricultural Drought For Arid And Humid Regions Using Multi-Sensor Remote Sensing Data. Remote Sensing Of Environment, 114(12), 2875-2887.
- 23- Kokilavani, S. Ramanathan, S. P. Dheebakaram, G. Sathyamoorthy, N. K. Maragatham, N. & Gowtham, R. (2021): Drought Intensity And Frequency Analysis Using Spi For Tamil Nadu, India. Current Science, 120(5), 885-892.

- 24- Koohi, S. Azizian, A. Brocca, L. (2021): Spatiotemporal Drought Monitoring Using Bottom-Up Precipitation Dataset (Sm2rain-Ascet) Over Different Regions Of Iran. *Science Of The Total Environment*, 779, 146535.
- 25- Liu, L. Hong, Y. Looper, J. Riley, R. Yong, B. Zhang, Z. Hocker, J. & Shafer, M. (2013): Climatological Drought Analyses And Projection Using Spi And Pdsi: Case Study Of The Arkansas Red River Basin. *Journal Of Hydrologic Engineering*, 18(7), 809-816.
- 26- Mckee, T. B. Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993): The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales. 8th Conference On Applied Climatology, Anaheim, California.
- 27- Mianabadi, A. Salari, K. & Pourmohamad, Y. (2022): Drought Monitoring Using The Long-Term Chirps Precipitation Over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(1), 183.
- 28- Muñoz Sabater, J. (2019): Era5-Land Monthly Averaged Data From 1981 To Present. Copernicus Climate Change Service (C3s) Climate Data Store (Cds). Retrieved From <https://Cds.Climate.Copernicus.Eu/Cdsapp#!/Dataset/Reanalysis-Era5-Land?Tab=Overview>.
- 29 Muñoz Sabater, J. (2021): Era5-Land Monthly Averaged Data From 1950 To 1980. Copernicus Climate Change Service (C3s) Climate Data Store (Cds). Retrieved From <https://Cds.Climate.Copernicus.Eu/Cdsapp#!/Dataset/Reanalysis-Era5-Land?Tab=Overview>.
- 30- Navidi Nassaj, B. Zohrabi, N. Nikbakht Shahbazi, A. & Fathian, H. (2021): Evaluation Of Global Gridded Precipitation Datasets For Drought Monitoring (Case Study: Great Karoon Watershed). *Journal Of Water And Soil Resources Conservation*, 10(3), 79-96.
- 31- Ojha, S. S. Singh, V. & Roshni, T. (2021): Comparison Of Meteorological Drought Using Spi And Spei. *Civil Engineering Journal*, 7(6), 1312-1323.
- 32- Das, P. Zhang, Z. & Ren, H. (2022): Evaluating The Accuracy Of Two Satellite-Based Quantitative Precipitation Estimation Products And Their Application For Meteorological Drought Monitoring Over The Lake Victoria Basin, East Africa. *Geospatial Information Science*, 25(3), 500-518.
- 33- Rahmat, S. N. Jayasuriya, N. & Bhuiyan, M. (2012): Trend Analysis Of Drought Using Standardized Precipitation Index (Spi) In Victoria, Australia. In *Hydrology And Water Resources Symposium*. Sydney, Australia.
- 34- Shamsnia, S. A. & Boustani, F. (2014): Application Of Remote Sensing Indices In The Assessment Of Meteorological Drought For Sustainable Development. *Journal Of Civil Engineering And Environmental Technology*, 1(5), 96-101.
- 35- Wu, W. Li, Y. Luo, X. Zhang, Y. Ji, X. & Li, X. (2019): Performance Evaluation Of The Chirps Precipitation Dataset And Its Utility In Drought Monitoring Over Yunnan Province, China. *Geomatics, Natural Hazards And Risk*, 10(1), 2145-2162.
- 36- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods In The Atmospheric Sciences*. Elsevier.
- 37- World Meteorological Organization (Wmo). (2012): *Standardized Precipitation Index User Guide (Wmo-No. 1090)*. World Meteorological Organization (Wmo). Isbn 978-92-63-11091-6.