



سبش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
Vol.13, No. 1, Spring 2021

۷۴-۵۵

مقاله پژوهشی

تحلیل تغییرات زمانی- مکانی شدت، تداوم، فراوانی و گستره خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجش از دور

مائده بهی^۱، عطاله عبدالهی کاکرودی^{۲*}، مجید کیاورز^۳، فرشاد امیراصلانی^۴

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۴. استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

چکیده

خشکسالی از مهم‌ترین بلایای طبیعی کشور است که اثرات مخرب زیست‌محیطی و اقتصادی فراوانی دارد. بیشتر مطالعات انجام‌شده به شدت خشکسالی پرداخته‌اند و معمولاً سایر ویژگی‌های آن بررسی نشده است. در این تحقیق، اولین بار، قابلیت شاخص‌های هواشناسی و داده‌های ماهواره‌ای با یکدیگر ادغام شده و از آن برای مطالعه تمامی ویژگی‌های خشکسالی، در دو حوزه داخلی و ساحلی کشور، استفاده شده است. بدین‌منظور، شاخص SPI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بارش TRMM محاسبه شده و سپس مشخصه‌های خشکسالی مانند شدت، تداوم، بزرگی و گستره خشکسالی، به‌صورت مکانی، در سطح حوزه مطالعه شد. نتایج نشان‌دهنده همبستگی کلی ۰.۹۴ بین SPI محاسبه‌شده از تصاویر ماهواره‌ای ایستگاهی بوده است. حداکثر شدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۴.۱۹- بوده که در آذر سال ۱۳۸۹ اتفاق افتاده است. علاوه‌براین، فراوانی وقوع خشکسالی‌های فرین، در دو مقیاس زمانی شش و دوازده‌ماهه، در حوزه داخلی بیشتر از حوزه ساحلی بوده است. در بازه مورد مطالعه، در مقیاس زمانی شش‌ماهه، ۶۰٪ از رویدادهای خشکسالی حوزه بزرگی خفیف‌تر از ۱۸.۳- داشته‌اند. نتایج نشان داد، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، به‌خوبی می‌توان به مشخصه گستره خشکسالی دست یافت؛ درحالی‌که با استفاده از سایر روش‌ها قابل محاسبه نیست. علاوه‌براین، با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان مشخصه‌های خشکسالی را در سطح حوزه، به‌صورت مکانی، مطالعه کرد و چنین کاری با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. نتایج تحقیق مؤید مزیت به‌کارگیری داده‌های بارش ماهواره‌ای در مطالعه خشکسالی بوده است.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، سنجش از دور، شاخص بارش استانداردشده، گستره خشکسالی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، گروه سنجش از دور و GIS. تلفن: ۰۹۱۲۸۹۵۴۰۵۶

۱- مقدمه

- SPI براساس داده‌های بارندگی محاسبه می‌شود که در دسترس‌اند؛

- امکان محاسبه این شاخص، در مقیاس‌های زمانی متفاوت، وجود دارد و بنابراین، قابلیت بیان مشخصات خشکسالی را برای کاربردهای متفاوت، فراهم می‌آورد؛

- استاندارد بودن شاخص سبب می‌شود نتایج به منطقه مورد مطالعه و زمان مطالعات وابسته نباشد و در مورد مناطق متفاوتی قابل مقایسه باشد.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های SPI آن است که این شاخص با استفاده از داده‌های ایستگاهی محاسبه می‌شود. ماهیت نقطه‌ای این داده‌ها، تعداد کم و توزیع نامناسب این ایستگاه‌ها در نتایج حاصل از مطالعات تأثیر می‌گذارد و دید کاملی از وضعیت واقعی خشکسالی حوزه فراهم نمی‌کند. برای نمونه، تعیین گستره خشکسالی، با استفاده از این اطلاعات، به‌تنهایی میسر نیست و با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه خواهد بود. در مقابل، تصاویر ماهواره‌ای، به‌دلیل ماهیت یکپارچه‌شان، امکان مطالعه یکپارچه حوزه‌های آبخیز را فراهم می‌آورند. شاخص‌های خشکسالی سنجش از دوری متعددی همچون VCI^۶، TCI^۷، VTCI^۸، HSMDI^۹، MIDI^{۱۰} و GIIDI^{۱۱}، برای مطالعه خشکسالی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطرح شده‌اند (Wan et al., 2004; Liu & Kogan, 1996; Sandholt et al., 2002; Park et al., 2017; Zhang & Jia., 2013; Jiao et al., 2019). شاخص‌های سنجش از دوری خشکسالی، برای تعیین کلاس خشکسالی، نیاز به

خشکسالی رویدادی اقلیمی، طبیعی و تکرارشونده است که به‌دفعات، در بسیاری از بخش‌های اجتماع همچون کشاورزی، انرژی، گردشگری و حمل‌ونقل تأثیر منفی می‌گذارد (Rosenberg, 1978; Wilhite, 2000). در مقایسه با دیگر بلایای طبیعی، هزینه‌های ناشی از خشکسالی به‌دلیل عواقب اجتماعی، محیطی و اقتصادی جدی بیشتر است (Wilhite, 1997; NCDC, 2007). خشکسالی یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی کشور محسوب می‌شود که، به‌رغم پایین‌بودن تلفات انسانی آن، در مقایسه با دیگر بلایای طبیعی، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی و اقتصادی فراوانی به‌دنبال دارد. در چهل سال گذشته، حدود ۲۷ پدیده خشکسالی گوناگون در کشور اتفاق افتاده است (غلامی و علی‌بیگی، ۱۳۹۳؛ صباغیان و شریفی، ۱۳۸۸). خشکسالی رویدادی است که با سرعت اندکی توسعه می‌یابد و تعیین محدوده مکانی و زمان آغاز و پایانش، به‌دلیل ماهیت بطئی و پنهان^۱ آن، مشکل (Wilhite, 2000) و به‌علت تغییرپذیری شدید زمانی و مکانی، پایش آن دشوار است. بخش‌های گوناگون کشور رویدادهای متفاوت خشکسالی را تحمل کرده‌اند. هر رویداد خشکسالی با مشخصه‌های شدت، بزرگی، تداوم، فراوانی و گستره مشخص می‌شود (Dracup et al., 1980). بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه خشکسالی شدت^۲ آن را بررسی کرده‌اند و معمولاً سایر ویژگی‌های آن مانند بزرگی^۳، تداوم^۴ و گستره بررسی نشده است (Ghosh, 2018). شدت خشکسالی به‌تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده کمبود آب در منطقه باشد و ضروری است سایر ویژگی‌های خشکسالی نیز بررسی شود.

شاخص‌های هواشناسی خشکسالی، در بسیاری از تحقیقات علمی و گزارش‌های رسمی، استفاده شده‌اند (Hayes et al., 2011; Zhang et al., 2012). شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۵ از متداول‌ترین این شاخص‌هاست. از جمله مزایای این شاخص، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Mishra et al., 2007):

1. Latency
2. Intensity
3. Magnitude
4. Duration
5. Standardized Precipitation Index
6. Vegetation Condition Index
7. Temperature Condition Index
8. Vegetation Temperature Condition Index
9. High resolution Soil Moisture Drought Index
10. Microwave Integrated Drought Index
11. Geographically Independent Integrated Drought Index

زیرحوزه‌های جراحی و زهره، حله، مند، کل و مهران از حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است که در مجموع، دو ناحیه داخلی^۱ و ساحلی^۲ را دربر می‌گیرد. محدوده مطالعه بین مدارهای ۲۶ درجه و ۲۹ دقیقه و ۳۴ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۵۷ درجه و ۶۴ دقیقه طول شرقی واقع شده و از دشت‌های ساحلی خلیج فارس در جنوب آغاز شده است و ارتفاعات جنوبی زاگرس را دربر می‌گیرد و پس از آن، در بیابان‌های مرکزی کشور و در جهت شمال، خاتمه می‌یابد (شکل ۱). این موقعیت سبب شده است، در فصل‌های متفاوت سال، منابع رطوبتی و سیستم‌های باران‌زای متفاوتی در بخش‌های گوناگون منطقه تأثیرگذار باشند.

۲-۲- داده‌ها

۲-۲-۱- تصاویر ماهواره‌ای

در نوامبر سال ۱۹۹۷، ماهواره TRMM^۳، با هدف برآورد بارش سطح زمین، در مدار قرار گرفت. با استفاده از داده‌های اخذشده از سنجنده‌های این ماهواره، محصولات بارش ماهواره‌ای گوناگونی تهیه می‌شود. محصول بارش ماهواره این ماهواره، با نام 3B43، بارش ماهیانه محدوده بین عرض‌های ۵۰ درجه شمالی و جنوبی را در سلول‌هایی با ابعاد ۰.۲۵ درجه، برآورد و ارائه می‌کند. این محصول از ترکیب مشاهدات میکروویو و فرسرخ نزدیک ماهواره‌ای و تعدادی مشاهده زمینی تولید می‌شود (Fleming et al., 2011). در مطالعات گوناگون، دقت برآورد بارش این محصول در مقایسه با داده‌های ایستگاهی بارش ارزیابی شده است (بدایق جمالی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بی‌همتا و همکاران، ۱۳۹۷ (Meng et al., 2014; Fang et al., 2013; Tang et al., 2016). در این تحقیق، محصول بارش ماهیانه 3B43 برای محاسبه شاخص SPI و مطالعه خشکسالی استفاده

تعیین آستانه‌های مناسب دارند. این آستانه‌ها محلی‌اند و با بازه زمانی انجام‌شدن مطالعات مرتبطند و بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده برای مناطق و زمان‌های متفاوت را نمی‌توان مقایسه کرد. این مورد از مهم‌ترین کاستی‌های استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری در مطالعات خشکسالی محسوب می‌شود.

بر این اساس، برای مطالعه خشکسالی، نیاز به استفاده از شاخص‌هایی است که هم‌زمان هر دو ویژگی استاندارد بودن و مقیاس مکانی مناسب را داشته باشند. هدف از این تحقیق به‌کارگیری شاخصی استاندارد است که به داده‌های نقطه‌ای وابسته نباشد و امکان نمایش وضعیت خشکسالی تمامی قسمت‌های حوزه را در مقیاس مکانی مناسب، داشته باشد. به این منظور، شاخص SPI با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای بارش محاسبه شد. این روش اولین بار در ایران اجرا شده و نتایج آن با روش‌های موجود مقایسه شده است. بدین ترتیب، شاخصی استاندارد با مزایای مقایسه‌پذیر بودن، در زمان و مکان‌های متفاوت، در اختیار خواهد بود که دقت مکانی مورد قبولی در سطح حوزه دارد. علاوه بر این، بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینه خشکسالی در کشور بر محاسبه شدت خشکسالی تمرکز داشته‌اند و سایر ویژگی‌های خشکسالی کمتر مطالعه شده است. بنابراین، در ادامه این تحقیق، تمامی مشخصه‌های خشکسالی شامل شدت، تداوم، بزرگی و گستره، در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، در دو حوزه داخلی و ساحلی کشور ایران که دارای مشخصات آب‌وهوایی متفاوت‌اند، مطالعه شده و بدین‌منظور، شاخص خشکسالی محاسبه‌شده از تصاویر ماهواره‌ای به‌کار رفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل زیرحوزه‌های طشک، بختگان، مهارلو، ابرقو، سیرجان، کویر سیاه‌کوه، کویر درانجیر و گاوخونی از حوزه آبریز فلات مرکزی و

1. Inland
2. Coastal
3. Tropical Rainfall Measuring Mission

بدین ترتیب، آثار ناشی از انتخاب، اجرا و دقت روش درون‌یابی در نتایج مطالعات خشکسالی حذف می‌شود.

۲-۲-۲-۲ داده‌های هواشناسی

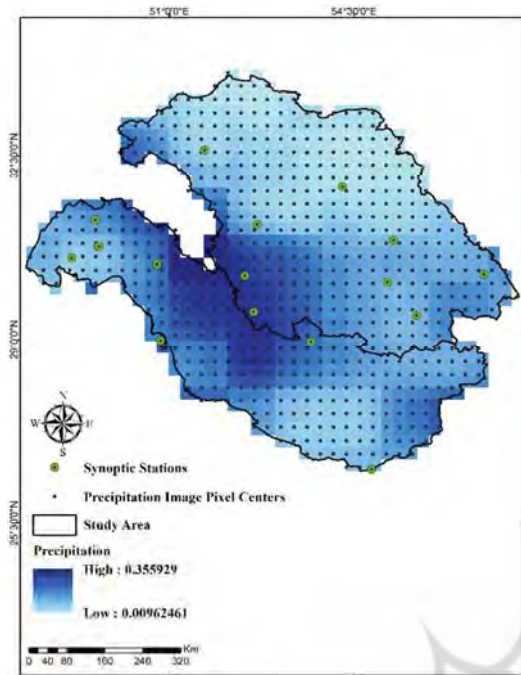
با توجه به طول دوره آماری، موقعیت ایستگاه و قرارگیری آنها در طبقات اقلیمی متفاوت، شانزده ایستگاه به‌منزله ایستگاه‌های مرجع انتخاب شده‌اند. شاخص SPI و معیارهای خشکسالی محاسبه‌شده از تصویر با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ارزیابی شده است. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های منتخب و شکل ۱ نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان داده است. بازه زمانی مطالعات دوره هفده‌ساله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ بوده است.

شکل ۲ نمونه‌ای از تصویر ماهواره‌ای بارش منطقه مورد مطالعه، در ماه دسامبر ۲۰۱۷، را نشان می‌دهد. در این شکل، موقعیت مرکز پیکسل‌های تصویر به‌صورت نقطه نشان داده شده که مؤید تعداد نمونه‌برداری بارش در سطح منطقه مطالعه است.

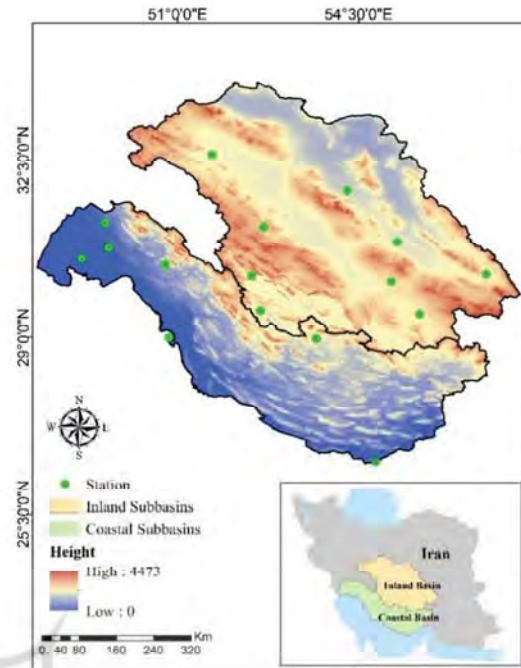
با به‌کاربردن داده‌های بارندگی ماهواره‌ای برای محاسبه شاخص خشکسالی، می‌توان به اطلاعات جامعی از وضعیت خشکسالی در سطح حوزه پی برد و تفاوت وضعیت خشکسالی را در بخش‌های متفاوت حوزه، مطالعه کرد. علاوه‌براین، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای مطالعه خشکسالی به جای استفاده از داده‌های نقطه‌ای، مطالعه خشکسالی تمامی سطح حوزه، بدون نیاز به روش‌های متداول درون‌یابی، میسر می‌شود.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه

استان	موقعیت ایستگاه			کد ایستگاه	سال تأسیس	نام ایستگاه
	ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
اصفهان	1550.4	32.617	51.667	40800	1951	ESFAHAN
خوزستان	150.5	31.267	49.600	40813	1987	RAMHORMOZ
فارس	2030.0	31.183	52.667	40818	1977	ABADEH
یزد	1237.2	31.900	54.283	40821	1952	YAZD
خوزستان	6.2	30.550	49.150	40832	1987	BANDAR MAHSHAHR
خوزستان	27.0	30.767	49.667	40833	1984	OMIDIYEH(AGHAJARI)
کهگیلویه و بویر احمد	699.5	30.433	50.767	40835	1985	DOGONBADAN
کرمان	1408.8	30.883	55.250	40839	1986	ANAR
کرمان	1753.8	30.250	56.967	40841	1951	KERMAN
فارس	1620.0	30.217	52.433	40844	1988	SAD DOROUDZAN
فارس	1484.0	29.533	52.600	40848	1951	SHIRAZ
کرمان	1834.1	30.100	55.133	40849	1987	SHAHR BABAK
کرمان	1739.4	29.467	55.683	40851	1985	SIRJAN
بوشهر	19.6	28.983	50.833	40858	1951	BUSHEHR
فارس	1288.3	28.967	53.683	40859	1966	FASSA
هرمزگان	22.7	26.533	54.833	40883	1966	BANDAR LENGHEH



شکل ۲. نمونه‌ای از تصویر ماهواره‌ای بارش TRMM



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های سینوپتیک

۳-۲- محاسبه شاخص خشکسالی

از این‌رو، نخستین گام در محاسبه SPI برآزش یک توزیع آماری مناسب بر سری زمانی داده‌های بارش است. براساس مطالعات ادواردز و مک‌کی^۱ (۱۹۹۷)، مشخص شده است که توزیع گاما برآزش مناسبی بر داده‌های بارش ایالات متحد دارد و نظریه شاخص براساس این توزیع بیان شد. تابع چگالی احتمال گاما به صورت رابطه (۱) بیان شده است (بذرافشان و حجایی، ۱۳۹۶).

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (1)$$

در این رابطه، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس، x مقدار بارش و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. تابع گاما طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Edwards & McKee, 1997).

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

1. Edwards & McKee

شاخص‌های خشکسالی، با بررسی آمار هواشناسی و هیدرولوژیکی بلندمدت منطقه، وضع موجود را پایش و نتیجه را در قالب اعدادی بدون بعد، توصیف می‌کنند. از پرکاربردترین این شاخص‌ها می‌توان به شاخص SPI اشاره کرد. در سال ۲۰۰۹، در کارگاه منطقه‌ای شاخص‌ها و سیستم هشدار زودرس خشکسالی، شاخص SPI بهترین شاخص مطالعه خشکسالی هواشناسی انتخاب شد (WMO, 2012). این شاخص کاهش بارندگی هر منطقه را به نسبت میانگین بلندمدت منطقه، ارزیابی می‌کند.

- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

ورودی مورد نیاز این شاخص داده‌های بارش ماهیانه یا هفتگی است. شاخص بارش استاندارد شده شاخصی چندمنظوره است و امکان کاربرد آن در مقیاس‌های زمانی متفاوت وجود دارد. اساس این شاخص بر محاسبه احتمال بارش در هر مقیاس زمانی استوار است؛

براساس آنچه تا کنون بیان شد، نتیجه می‌گیریم که اصل مهم شاخص بارش استاندارد، انتخاب یک توزیع آماری مناسب است. بنابراین، پیش از استفاده از این شاخص باید توزیع‌های متفاوت آماری، با استفاده از آزمون نیکویی برازش، ارزیابی شوند. بذرافشان (۱۳۸۱)، با مقایسهٔ برازش هفت توزیع احتمال متفاوت نرمال، لوگ نرمال، لوگ نرمال دوپارامتری، لوگ سه‌پارامتری، گامای دوپارامتری، پی‌رسون نوع III، لوگ پی‌رسون نوع III و گامبل در اقلیم‌های متفاوت ایران نتیجه گرفت که در چهار مقیاس زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه، توزیع گاما برازش مناسب‌تری بر داده‌های بارش دارد.

برای تعیین شدت خشکسالی در سال‌های گوناگون، لازم است آستانه‌هایی بر SPI اعمال شود. جدول ۲ آستانه‌هایی را که مک‌کی و همکارانش (۱۹۹۳) مطرح کرده‌اند، نشان می‌دهد.

جدول ۲. طبقه‌بندی شاخص بارندگی استاندارد شده

شاخص SPI	وضعیت خشکسالی هواشناسی
۲ و بیشتر	ترسالی فرین ^۳
۱.۵ - ۱.۹۹	ترسالی شدید
۱ - ۱.۴۹	ترسالی متوسط
-۰.۹۹ - ۰.۹۹	نزدیک به نرمال
-۱ - ۱.۴۹	خشکسالی متوسط
-۱.۵ - ۱.۹۹	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	خشکسالی فرین

منبع: Mckee et al., 1993

شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی متفاوت (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) محاسبه می‌شود. منابع آب کرهٔ زمین از شدت‌های متفاوت کمبود بارش تأثیر می‌پذیرند. مقیاس‌های زمانی متفاوت SPI امکان محاسبهٔ تأثیرات گوناگون کمبود بارش را فراهم می‌آورد.

1. Maximum Likelihood
2. Abramovitz & Stegun
3. Extreme

برای تخمین پارامترهای توزیع گاما، از روش حداکثر درست‌نمایی^۱ استفاده می‌شود (Wilks, 2011). برای برآورد پارامترهای توزیع گاما با استفاده از روش‌های تقریبی، از روابط (۳) تا (۵) استفاده می‌شود. ابتدا به کمک رابطه (۳)، آمارهٔ D با استفاده از داده‌ها محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از روابط (۴) و (۵)، پارامترهای شکل و مقیاس توزیع گاما برآورد می‌شوند (Edwards & McKee, 1997).

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

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$\hat{\alpha}$ و $\hat{\beta}$ ، به ترتیب، برآوردگرهای α و β و n تعداد مشاهدات است. سپس، تابع توزیع احتمال تجمعی بارش با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Ibid.).

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

چون تابع گاما به ازای $x = 0$ (بارش صفر میلی‌متر) تعریف نشده و توزیع بارش ممکن است مقادیر صفر داشته باشد، تابع احتمال تجمعی کل، که دربرگیرندهٔ مقادیر صفر باشد، به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود (Ibid.).

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad \text{رابطه (۷)}$$

که q احتمال مقدار بارش صفر است. اگر m تعداد داده‌های بارش با مقدار صفر و n تعداد کل مشاهدات باشد؛ آنگاه q از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$q = \frac{m}{n} \quad \text{رابطه (۸)}$$

پس از محاسبهٔ تابع تجمعی کل $H(x)$ ، تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z (SPI)، با میانگین ۰ و واریانس ۱، انجام می‌شود. برای این تبدیل، از تقریب آبراموویتس و استگان^۲ (۱۹۶۵) استفاده می‌شود.

دوره خشکسالی است (Spinoni et al., 2014). رویداد خشکسالی زمانی آغاز می‌شود که مقدار SPI ۱- کمتر شود و پایان آن هم‌زمان با مثبت شدن SPI خواهد بود (Ghosh, 2018). علاوه بر شدت، استمرار حالت خشکسالی نیز عاملی برای تشدید اثر خشکسالی در منطقه محسوب می‌شود (عابدی، ۱۳۹۰).

۲-۴-۴- بزرگی خشکسالی (M_D) و متوسط شدت خشکسالی (MI_D)

بزرگی خشکسالی کمبود تجمعی آب در یک دوره خشکسالی را نشان می‌دهد (Thompson, 1999) و برابر با مجموع مقادیر SPI در طول دوره یک رویداد خشکسالی است. میانگین این کمبود تجمعی در دوره خشکسالی MI_D است و برابر با بزرگی خشکسالی تقسیم بر طول دوره است.

۲-۴-۵- فراوانی خشکسالی (F_D)

فراوانی خشکسالی برای ارزیابی احتمال خشکسالی در یک دوره به کار می‌رود (Wang et al., 2014). با توجه به متفاوت بودن شدت‌های خشکسالی، فراوانی‌ها را می‌توان در مورد هر یک از آنها، به تفکیک، بررسی کرد. تعداد خشکسالی در هر یکصد سال به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

رابطه (۹) $F_{Di,100} = \frac{N_i}{i.n} * 100(\%)$
 $F_{Di,100}$ فراوانی خشکسالی‌های با مقیاس زمانی i در یکصد سال است، N_i تعداد ماه‌های با خشکسالی مقیاس زمانی i در دوره n ساله است و i مقیاس زمانی سه، شش و دوازده‌ماهه و n تعداد سال‌ها در داده‌هاست.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه SPI

در ابتدا، به منظور اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای بارش، این داده‌ها در منطقه مورد مطالعه، در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، ارزیابی شدند و مقدار میانگین مطلق خطای 1.84 میلی‌متر در ماه و ضریب

با استفاده از روش مک‌کی و همکارانش (۱۹۹۳)، شاخص SPI برای تک‌تک پیکسل‌های تصویر TRMM محاسبه شد. حدود 784 پیکسل محصول 3B43، منطقه مطالعه را دربر می‌گیرد. بنابراین، در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، حجم نمونه‌برداری از شانزده نقطه به 784 نقطه افزایش می‌یابد. در این تحقیق، شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی شش و دوازده‌ماهه محاسبه شده است.

۲-۴-۴- معیارهای سنجش خشکسالی

ویژگی‌های مهم مرتبط با خشکسالی، که در طراحی‌ها و برنامه‌ریزی‌های محیطی لازم است، شامل تداوم، شدت، فراوانی و گستره خشکسالی می‌شود.

۲-۴-۱- گستره خشکسالی

برخی از خشکسالی‌ها در گستره‌های وسیع و برخی در گستره محدودی عمل می‌کنند. رخداد خشکسالی ممکن است در منطقه‌ای، با وسعت چندصد کیلومتر، اتفاق افتد ولی امکان دارد شدت و دوره تداوم آن، در سراسر منطقه، یکسان نباشد. بررسی گستره و توزیع مکانی خشکسالی اهمیت بسیاری دارد و به تحقیقات و مطالعات درباره رفتار منطقه‌ای و مکانی خشکسالی نیاز است (Panu & Sharma, 2002).

۲-۴-۲- شدت خشکسالی (I_D)

میزان کاهش در پارامتر اقلیمی مورد مطالعه بیانگر شدت خشکسالی است (عابدی، ۱۳۹۰). شدت خشکسالی انحراف یک شاخص اقلیمی را از مقدار نرمال آن نشان می‌دهد (Dupigny, 2001). در مورد شاخص SPI، دوره‌ای به‌منزله خشکسالی شناخته می‌شود که مقدار این شاخص، به صورت متوالی، کمتر از ۱- باشد (McKee et al., 1993). بنابراین، مقدار شاخص نشان‌دهنده شدت خشکسالی است و هرچه مقدار شاخص از ۱- کمتر باشد، شدت خشکسالی بیشتر است.

۲-۴-۳- تداوم خشکسالی (D_D)

تداوم خشکسالی تعداد ماه‌های بین شروع و پایان یک

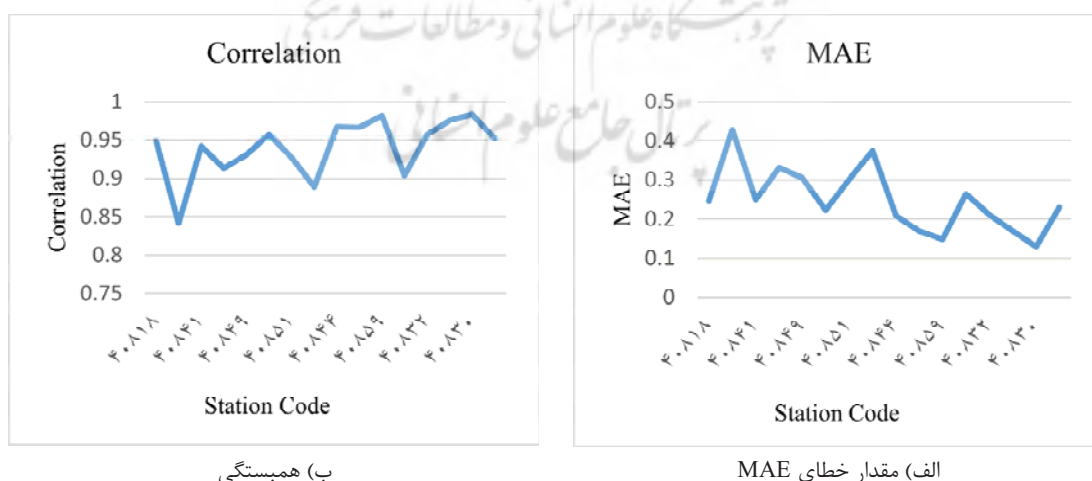
جزئیات مکانی این تصاویر، مطالعه ویژگی‌های خشکسالی در سطح حوزه، با استفاده از این اطلاعات، انجام شده است.

۳-۲- محاسبه معیارهای سنجش خشکسالی

در این بخش، نتایج محاسبه معیارهای شدت (I_D)، تداوم (D_D)، بزرگی (M_D)، متوسط شدت (MI_D) و فراوانی خشکسالی (F_D) آمده است. به این منظور، شاخص‌های SPI شش و دوازده ماهه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بارش، محاسبه شد و سپس مقادیر معیارهای خشکسالی، با استفاده از این شاخص، برآورد شد. به این ترتیب، به ازای هر پیکسل تصویر که معادل سلول ۰.۲۵ درجه از سطح حوزه است، مقدار منحصر به فردی را می‌توان برای معیارهای خشکسالی محاسبه کرد.

یکی از مواردی که معمولاً در مطالعات خشکسالی به آن پرداخته نمی‌شود بررسی مکانی وضعیت خشکسالی در حوزه و مقایسه تنش وارد شده به قسمت‌های متفاوت حوزه است. بنابراین، در این تحقیق، معیارهای سنجش خشکسالی به صورت مکانی مورد مطالعه قرار گرفته است و اختلاف وضعیت بخش‌های متفاوت حوزه، از نظر شدت و تداوم و بزرگی رویداد خشکسالی، مقایسه شده است.

همبستگی ۰.۸۸ را نشان دادند. نتایج این ارزیابی در تحقیق بهی فر^۱ و همکاران (۲۰۱۹) آمده است. سپس، به منظور اعتبارسنجی مقادیر SPI محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای بارش، شاخص SPI حاصل از تصاویر بارش با مقادیر SPI محاسبه شده از داده‌های ایستگاهی مقایسه شده است. شکل ۳ مقدار خطای MAE و همبستگی بین شاخص SPI شش ماهه محاسبه شده از داده‌های ایستگاهی و مقادیر تصاویر ماهواره‌ای بارش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشهود است، حداکثر مقدار خطا از ۰.۴۵ واحد، در طول دوره مطالعات، بیشتر نبوده است. حداکثر مقدار خطا در ایستگاه آباده اتفاق افتاده است. همچنین، مطابق شکل ۳-ب، همبستگی میان مقادیر محاسبه شده از داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای، در همه ایستگاه‌ها، بیشتر از ۰.۸۳ بوده است. در عین حال، به جز ایستگاه‌های انار و یزد، همبستگی ایستگاه‌های دیگر بیشتر از ۰.۹ بوده است که دقت مورد قبول برآورد را می‌رساند. ایستگاه آباده، با ارتفاع ۲۰۳۰ متر از سطح دریا، میانگین بارندگی بلندمدت ۱۳۹ میلی‌متر دارد که همین نکته آن را جزء ایستگاه‌های خشک و کم‌بارش منطقه قرار می‌دهد (دیپیم‌فرد و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین، به دلیل دقت مورد قبول شاخص خشکسالی محاسبه شده طبق تصاویر ماهواره‌ای و



شکل ۳. مقایسه شاخص SPI شش ماهه محاسبه شده طبق داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای بارش

1. Behifar

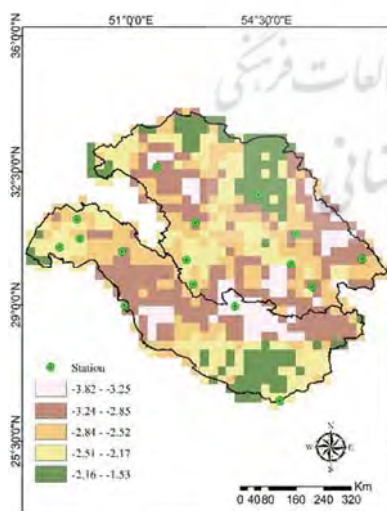
۳-۲-۱- شدت خشکسالی (I_D)

شدت خشکسالی معادل با مقدار SPI در منطقه مورد مطالعه است. جدول ۳ مقدار حداکثر شدت خشکسالی وقوع یافته در بازه زمانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. براساس این جدول، در مقیاس زمانی شش‌ماهه، حداکثر شدت خشکسالی مشاهده شده در دوره مورد مطالعه معادل SPI برابر ۴.۱۹- بوده و این اتفاق در آذر سال ۱۳۸۹ رخ داده است. در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، حداکثر شدت خشکسالی مشاهده شده در دوره مورد مطالعه معادل SPI برابر ۳.۸۲- بوده که در بهمن سال ۱۳۸۷ رخ داده است.

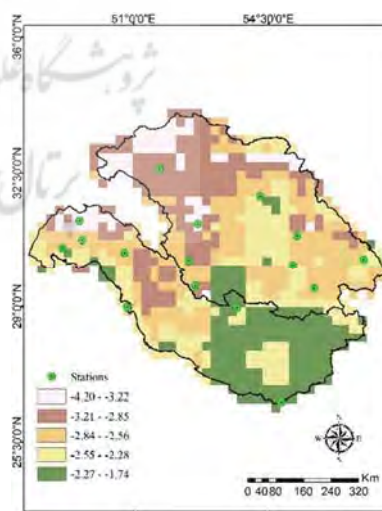
از نظر مکانی، بخش‌های گوناگون حوزه شدت‌های خشکسالی متفاوتی را در دوره مورد مطالعه، از سر گذرانده‌اند. شکل ۴ مقدار حداکثر شدت خشکسالی رخ داده را در بخش‌های گوناگون حوزه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در مقیاس زمانی شش‌ماهه، حداکثر شدت خشکسالی در بخش‌های غرب و شمال غرب منطقه مطالعه و حداقل آن در نیمه جنوب شرق حوزه اتفاق افتاده است. در شکل ۴- ب مشاهده می‌شود که در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، حداکثر شدت خشکسالی در نیمه شرقی حوزه و نوار باریکی در بخش میانی منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است.

جدول ۳. شدت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت در بازه ۲۰۰۰-۲۰۱۷ در منطقه مورد مطالعه

حداکثر شدت مشاهده شده در بازه ($Max I_D$)			مقیاس زمانی
ماه	سال	SPI	
آذر	۱۳۸۹	-۴.۱۹	شش ماه
بهمن	۱۳۸۷	-۳.۸۲	دوازده ماه



ب) مقیاس زمانی دوازده‌ماهه



الف) مقیاس زمانی شش‌ماهه

شکل ۴. حداکثر شدت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت، در دوره مطالعه محاسبه شده، با تصاویر ماهواره‌ای

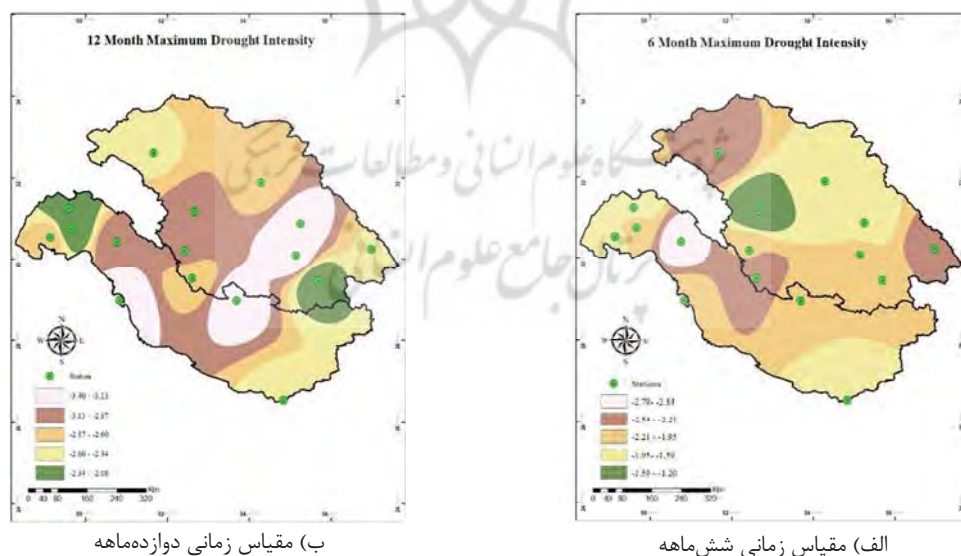
نقطه‌ای، و مزیت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه SPI پی برد. علاوه بر این، دامنه مقادیر شدت خشکسالی محدود‌ای وسیع‌تر از حالت نقطه‌ای را دربر گرفته که دلیل آن از دست رفتن اطلاعات در تمامی سطح حوزه و محدود شدن به مقادیر در موقعیت ایستگاه‌ها، در روش نقطه‌مبناست. با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵، می‌توان به مزیت روش اجرا شده در این تحقیق پی برد.

۳-۲-۲- تداوم (D_D) خشکسالی

تداوم خشکسالی همان تعداد ماه‌هایی است که به صورت متوالی، مقدار SPI طی آنها منفی باشد. استمرار خشکسالی متوسط ممکن است خسارت‌هایی بیشتر از خشکسالی شدید و کوتاه مدت به منطقه وارد کند. هیستوگرام فراوانی تداوم خشکسالی‌های منطقه مورد مطالعه، در بازه سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۰، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل، مشاهده می‌شود که در مقیاس زمانی شش‌ماهه، حدود ۵۰٪ از رویدادهای خشکسالی ۳۹ ماه و کمتر از آن تداوم

چنانکه اشاره شد، با به‌کاربردن تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه شاخص خشکسالی، می‌توان تفاوت ویژگی‌های خشکسالی بخش‌های متفاوت حوزه را مطالعه کرد که این کار از مزایای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، به جای داده‌های ایستگاهی، محسوب می‌شود. به منظور مقایسه نتایج به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های متداول برای تهیه نقشه‌های خشکسالی، نقشه حداکثر شدت خشکسالی حوزه، با استفاده از داده‌های ایستگاهی نیز، محاسبه شد. شکل ۵ نقشه حداکثر شدت خشکسالی محاسبه شده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعه را نشان می‌دهد. پس از محاسبه مقادیر شاخص در موقعیت هر ایستگاه، مقادیر با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)^۱ به نقشه سطح تبدیل شده است.

از طریق مقایسه شکل‌های ۴ و ۵، که پارامتر یکسانی را نمایش می‌دهند، می‌توان به حجم اطلاعات از دست‌رفته در مطالعه خشکسالی، به کمک داده‌های



شکل ۵. حداکثر شدت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت، در دوره مورد مطالعه و محاسبه شده با داده‌های ایستگاهی

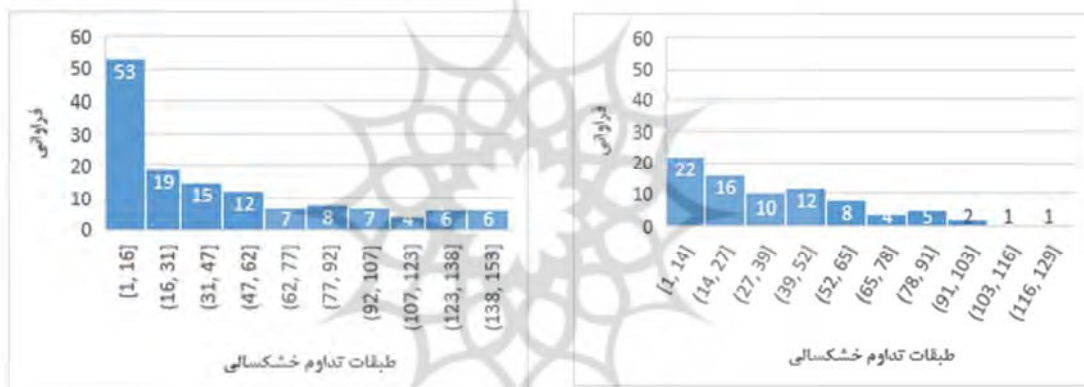
1. Inverse Distance Weighting

تحلیل تغییرات زمانی- مکانی شدت، تداوم، فراوانی و گستره خشکسالی ...

بخش‌های متفاوت حوزه نشان داده شده است و از این طریق، امکان بررسی مکانی تداوم خشکسالی در حوزه میسر می‌شود. طبق این شکل، از نظر مکانی، بخش شرقی دشت‌های ساحلی در مقیاس زمانی شش‌ماهه شاهد بیشترین تداوم خشکسالی بوده است. در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، بخش‌های میانی منطقه تداوم خشکسالی بیشتری را شاهد بوده‌اند و در بخش شمالی منطقه، خشکسالی کمتر تداوم داشته است. نکته شایان توجه آن است که در هر دو مقیاس زمانی، حوزه ساحلی تداوم‌های تقریباً بالاتری را در مقایسه با حوزه داخلی، از سر گذرانده است.

داشته‌اند و بیشترین فراوانی به خشکسالی‌هایی، با تداوم کمتر از ۱۴ ماه، برمی‌گردد. در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، بیش از ۵۰٪ رویدادهای خشکسالی ۱۶ ماه و کمتر تداوم داشته‌اند و حدود ۸۰٪ رویدادهای خشکسالی کمتر از ۴۷ ماه طول کشیده‌اند. در عین حال، در این نمودار به وضوح مشاهده می‌شود که فراوانی وقوع رویدادهای خشکسالی، با تداوم بالاتر، به شدت کاهش می‌یابد و فراوانی رویدادهای کوتاه‌مدت خشکسالی، در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، بسیار بیشتر است.

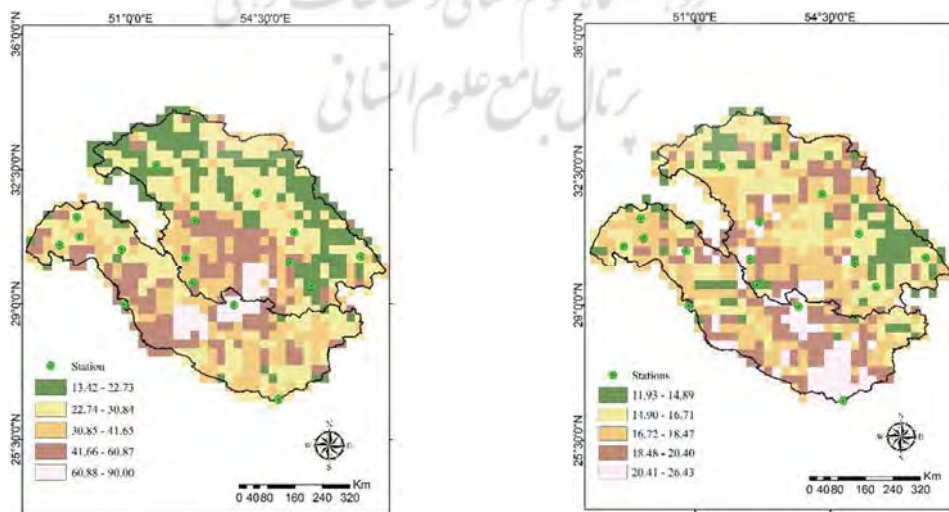
شکل ۷ نقشه تداوم خشکسالی منطقه مورد مطالعه را در مقیاس‌های زمانی شش و دوازده‌ماهه نشان می‌دهد. در این نقشه، میانگین تداوم خشکسالی در



الف) مقیاس زمانی شش‌ماهه

ب) مقیاس زمانی دوازده‌ماهه

شکل ۶. فراوانی وقوع تداوم خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت



الف) مقیاس زمانی شش‌ماهه

ب) مقیاس زمانی دوازده‌ماهه

شکل ۷. میانگین تداوم خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت، در دوره مطالعه

۳-۲-۳- بزرگی خشکسالی (M_D)

ویژگی‌های شدت و تداوم خشکسالی دو ویژگی اولیه خشکسالی شمرده می‌شوند که با مقدار پارامتر بارش ارتباط مستقیمی دارند. بزرگی خشکسالی (M_D) پارامتر ثانویه‌ای است که تحت تأثیر تداوم و شدت خشکسالی قرار دارد. هیستوگرام فراوانی بزرگی خشکسالی‌های منطقه مورد مطالعه، در بازه سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۰، در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در مقیاس زمانی شش‌ماهه، بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی مربوط به بزرگی ۹.۴- (کلاس ۱۱.۲- تا ۷.۶-) بوده است. همچنین، در بازه مورد مطالعه، بزرگی ۶۰٪ از رویدادهای خشکسالی حوزه خفیف‌تر از ۱۸.۳- بوده است. در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی به دو بزرگی ۱۱.۷۵- و ۳۴.۳۵- بازمی‌گردد و سایر بزرگی‌های خشکسالی با فراوانی نسبتاً مشابهی در حوزه رخ داده‌اند. حدود ۴۰٪ رویدادهای خشکسالی در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه بزرگی شدیدتر از ۳۸.۱- داشته‌اند.

هر رویداد خشکسالی بزرگی منحصربه‌فردی دارد. برای بررسی مکانی بزرگی خشکسالی در بخش‌های متفاوت منطقه مورد مطالعه، در شکل ۹، بزرگی

طولانی‌ترین خشکسالی حوزه به صورت مکانی ارائه شده است. مطابق این شکل، در هر دو مقیاس زمانی شش و دوازده‌ماهه، بخش‌های میانی حوزه با بزرگی خشکسالی بیشتری مواجه بوده‌اند. در مقیاس زمانی شش‌ماهه، حداکثر مقادیر بزرگی خشکسالی در حوزه داخلی اتفاق افتاده و در مقایسه با آن، حوزه ساحلی با بزرگی کمتری روبه‌رو بوده است. این در حالی است که در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، هر دو حوزه داخلی و ساحلی مقادیر بزرگی خشکسالی بالایی داشته‌اند.

۳-۲-۴- متوسط شدت خشکسالی (MI_D)

متوسط شدت خشکسالی (MI_D) بهترین معیاری است که می‌تواند میانگین تنش خشکسالی واردشده به منطقه‌ای را در بازه‌ای زمانی، نشان بدهد. همان‌طور که اشاره شد، متوسط شدت خشکسالی برابر است با بزرگی خشکسالی (M_D) تقسیم‌بهر طول دوره. این پارامتر معرف میانگین کمبود آب در یک دوره است. شکل ۱۰ متوسط شدت خشکسالی منطقه مورد مطالعه را در مقیاس‌های زمانی شش و دوازده‌ماهه، نشان می‌دهد. برای سهولت تفسیر، این نقشه، براساس آستانه‌های مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳)، به سه کلاس خشکسالی متوسط و شدید و فرین طبقه‌بندی شده است.

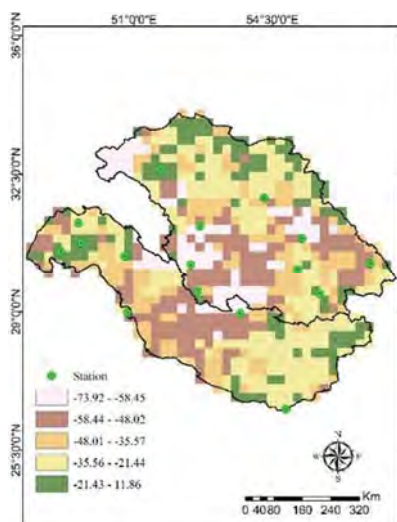


(ب) مقیاس زمانی دوازده‌ماهه

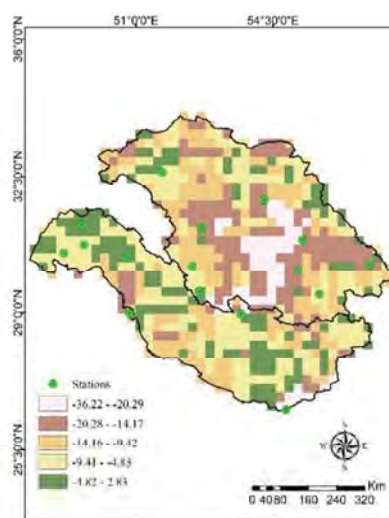
(الف) مقیاس زمانی شش‌ماهه

شکل ۸. فراوانی وقوع بزرگی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت

تحلیل تغییرات زمانی- مکانی شدت، تداوم، فراوانی و گستره خشکسالی ...

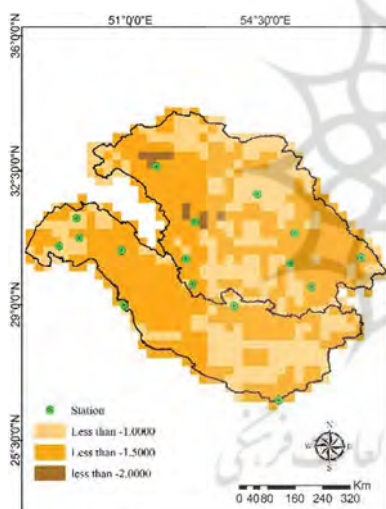


ب) مقیاس زمانی دوازده ماهه

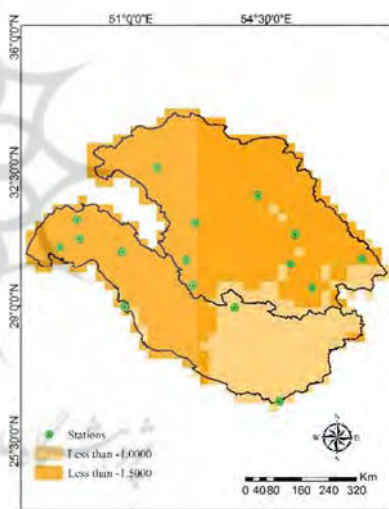


الف) مقیاس زمانی شش ماهه

شکل ۹. بزرگی طولانی ترین خشکسالی در مقیاس های زمانی متفاوت، در دوره مطالعه



ب) مقیاس زمانی دوازده ماهه



الف) مقیاس زمانی شش ماهه

شکل ۱۰. متوسط شدت خشکسالی (MI_D) در مقیاس های زمانی متفاوت، در دوره مطالعه

در مقیاس زمانی دوازده ماهه، متوسط شدت خشکسالی منطقه مورد مطالعه ۱.۵۵- بوده است. مقدار متوسط شدت خشکسالی دوازده ماهه در سطح منطقه بین ۲.۲۰- تا ۱.۱۷- متغیر بوده است. بنابراین، در بازه مورد مطالعه، همه مناطق دست کم یک رویداد خشکسالی را از سر گذرانده اند. در این مقیاس زمانی، ۳۵٪ منطقه مورد مطالعه متوسط شدت خشکسالی کمتر از ۱.۵- داشته است که معادل خشکسالی شدید و

چنانکه در این شکل مشاهده می شود، در طول دوره مطالعه، متوسط شدت خشکسالی در مقیاس های شش و دوازده ماهه متفاوت بوده است. در مقیاس زمانی شش ماهه، متوسط شدت خشکسالی (MI_D) منطقه مورد مطالعه ۱.۵۷- بوده است و ۷۴.۷٪ منطقه MI_D کمتر از ۱.۵- داشته که معادل خشکسالی شدید است. از نظر محلی، متوسط شدت خشکسالی در نیمه شمال غرب منطقه بیشتر از نیمه جنوب شرق آن بوده است.

جدول ۴. فراوانی وقوع کلاس‌های متفاوت خشکسالی

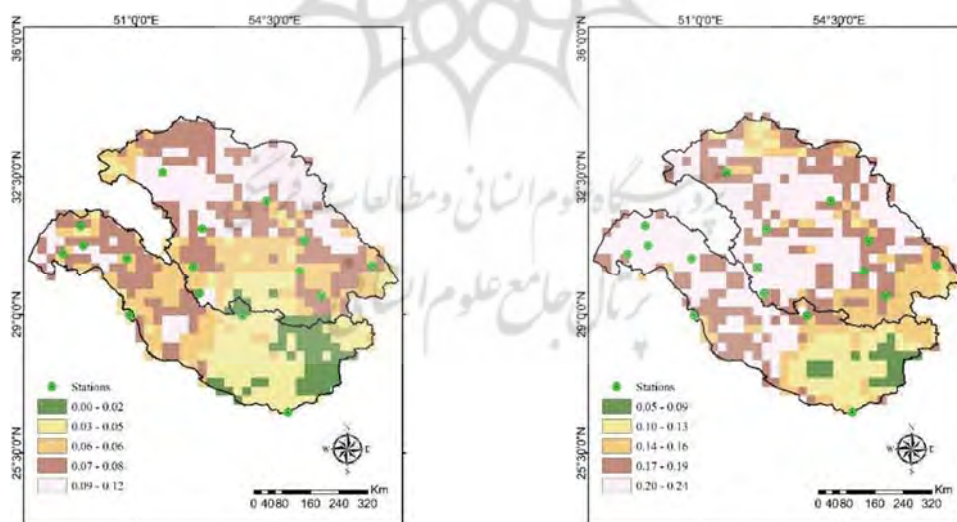
طبقات شدت خشکسالی	مقدار شاخص	۶ ماهه	۱۲ ماهه
خشکسالی متوسط	-۱.۴۹ - -۱.۰	۱۹	۸
خشکسالی شدید	-۱.۹۹ - -۱.۵	۱۶	۶
خشکسالی فرین	> -۲	۵	۲

از نظر مکانی، فراوانی وقوع کلاس‌های متفاوت خشکسالی در سطح منطقه یکسان نبوده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ فراوانی وقوع خشکسالی‌های فرین و شدید را به ترتیب، در مقیاس‌های زمانی شش و دوازده‌ماهه، نشان می‌دهند. در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که در مقیاس زمانی شش‌ماهه، بخش جنوب‌شرق منطقه مورد مطالعه کمترین فراوانی خشکسالی شدید را داشته است و سایر بخش‌های حوزه فراوانی بالاتری داشته‌اند. همچنین، بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی‌های حدی در نیمه شمالی منطقه رخ داده است.

بیشتر می‌شود. از این میان، بیش از ۰.۵٪ از منطقه متوسط شدت خشکسالی کمتر از ۲- داشته که معادل خشکسالی فرین است.

۳-۲-۵- فراوانی وقوع خشکسالی (F_D)

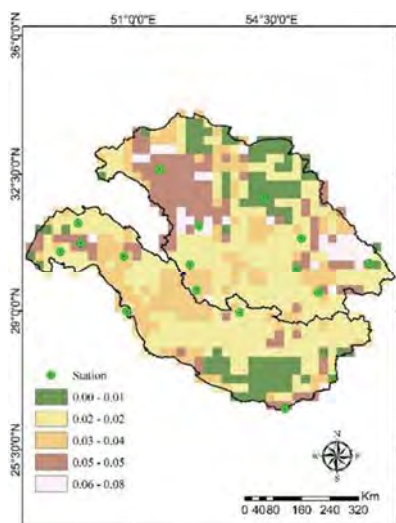
یکی از معیارهای مهمی که در برنامه‌ریزی‌های سازگاری و کاهش تأثیرات خشکسالی مورد توجه قرار می‌گیرد فراوانی وقوع خشکسالی با شدت‌های متفاوت در یک منطقه است. در این تحقیق در ابتدا، فراوانی وقوع کلاس‌های متفاوت خشکسالی، در بازه مورد مطالعه، استخراج شده است. علاوه بر این، فراوانی وقوع کلاس‌های متفاوت خشکسالی، به صورت مکانی، در این منطقه بررسی شده است. به این ترتیب، آسیب‌پذیری بخش‌های گوناگون منطقه در برابر رویدادهای خشکسالی با دقت بیشتری آشکار می‌شود و امکان برنامه‌ریزی مناسب پیش می‌آید. در جدول ۴، درصد فراوانی وقوع کلاس‌های متفاوت خشکسالی، در بازه زمانی مورد مطالعه، نشان داده شده است.



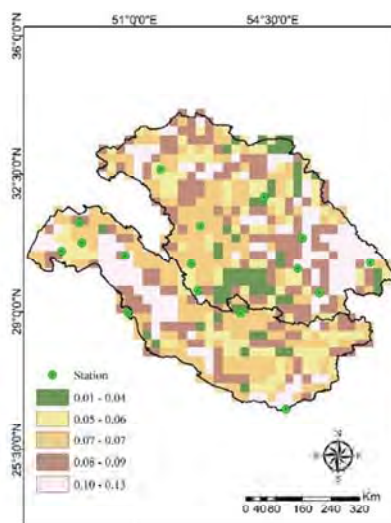
ب) خشکسالی فرین

الف) خشکسالی شدید

شکل ۱۱. فراوانی وقوع خشکسالی‌های فرین و شدید در مقیاس زمانی شش‌ماهه



ب) فراوانی وقوع خشکسالی فرین دوازده ماهه



الف) فراوانی وقوع خشکسالی شدید دوازده ماهه

شکل ۱۲. فراوانی وقوع خشکسالی های فرین و شدید در مقیاس زمانی دوازده ماهه

سانتوس^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، مشابه تحقیق حاضر، از داده های بارندگی TRMM برای محاسبه SPI و مطالعه خشکسالی در حوزه سافرانسیسکوی برزیل استفاده کردند. ژائو^۲ و همکارانش (۲۰۱۸) خشکسالی در حوزه رودخانه زرد چین را با استفاده از تصاویر ماهواره ای TRMM، مطالعه کرده اند. طبق نتایج، داده های TRMM همبستگی مطلوبی با داده های بارش اندازه گیری شده داشته اند.

افزون بر این ها، در تحقیق حاضر، به جای استفاده از شاخص های خشکسالی سنجش از دوری، شاخص های هواشناسی خشکسالی با استفاده از داده های سنجش از دور محاسبه شده است. مهم ترین محدودیت شاخص های خشکسالی سنجش از دوری تعیین آستانه های مناسب برای مشخص کردن کلاس های خشکسالی و مهم تر از آن، نبود امکان مقایسه مقادیر شاخص ها در مناطق گوناگون است. این دو محدودیت، با محاسبه شاخص های استاندارد شده هواشناسی، برطرف می شود. بنابراین، با تلفیق مزایای شاخص های

با افزایش مقیاس زمانی به دوازده ماه (شکل ۱۲)، بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی فرین به قسمت شرقی حوزه منتقل شده و بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی شدید نیز در دو قسمت شرقی و غربی منطقه اتفاق افتاده است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، خشکسالی نیمه جنوبی کشور در دو حوزه داخلی و ساحلی، در بازه سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ و با استفاده از تصاویر ماهواره ای بارش، بررسی شده و ویژگی های شدت، تداوم، بزرگی و گستره خشکسالی استخراج شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد استفاده از تصاویر ماهواره ای بارش برای محاسبه شاخص SPI دقت مورد قبولی دارد و همبستگی میان شاخص های محاسبه شده از تصویر و داده های ایستگاهی مناسب بوده است. این نکته امکان استفاده از تصاویر ماهواره ای بارش را در مناطق بدون ایستگاه، فراهم می کند. در عین حال، تصاویر ماهواره ای اطلاعات بیشتری از جزئیات و تغییرات مکانی خشکسالی در سطح حوزه فراهم می کنند و مناطق در معرض تهدید را به صورت دقیق تری مشخص می نمایند.

1. Santos
2. Zhao

متفاوتی از خود نشان داده‌اند. در حالت کلی، فراوانی وقوع خشکسالی‌های فرین، در هر دو مقیاس زمانی شش و دوازده‌ماهه، در حوزه داخلی بیشتر از حوزه ساحلی بوده است. فراوانی وقوع خشکسالی‌های شدید در دو مقیاس زمانی یادشده متفاوت بوده است. در مقیاس زمانی شش‌ماهه، بیشترین خشکسالی شدید در نیمه غربی منطقه اتفاق افتاده و در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، بیشترین خشکسالی شدید در حوزه داخلی، در نیمه شرقی منطقه و در حوزه ساحلی، در نیمه غربی آن به وقوع پیوسته است.

متوسط تداوم خشکسالی، در هر دو مقیاس زمانی شش و دوازده‌ماهه، در منطقه ساحلی بیشتر از منطقه داخلی بوده است. این واقعیت سبب شده است که در دوره مطالعه، منطقه ساحلی با بزرگی خشکسالی بیشتری، در مقایسه با منطقه داخلی، مواجه شود. بنابراین، با در نظر گرفتن تداوم خشکسالی، برخلاف تصور اولیه، منطقه ساحلی به فرصت بیشتری برای بازسازی سفره‌های آب زیرزمینی و پوشش گیاهی منطقه نیاز دارد و این نکته مهم را نمی‌توان صرفاً، مطابق با مقادیر شدت خشکسالی که با استفاده از شاخص‌ها مطرح شده‌اند، شناسایی کرد.

نکته شایان توجه آن است که تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک دارای دوره آماری مناسب، در بخش ساحلی منطقه مورد مطالعه و به‌ویژه، در نیمه شرقی آن، بسیار محدود است. این نکته را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. لازم است گفته شود که ایستگاه‌های اندک این ناحیه نیز بیشتر در شهرهای بندری واقع شده‌اند که از شرایط آب‌وهوایی خاص خود تبعیت می‌کنند. بنابراین، برای نمایش ویژگی‌های خشکسالی در حوزه ساحلی، استفاده از داده‌های مکمل، همچون تصاویر ماهواره‌ای، ضروری خواهد بود.

نتایج تحقیق نشان داده است که با اندازه‌گیری ویژگی‌های گوناگون خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای،

هواشناسی و داده‌های سنجش از دور، به نتایج استاندارد و قابل مقایسه و دارای توزیع مکانی مناسب در سطح حوزه دست خواهیم یافت که حصول این موارد، در هریک از این روش‌ها، به تنهایی میسر نبود.

نتایج تحقیق نشان داده است که از نظر منطقه‌ای، بخش‌های متفاوت منطقه با خشکسالی‌های متفاوتی، با بزرگی و تداوم‌های متفاوت، مواجه بوده‌اند. در حالت کلی، یک‌سوم میانی منطقه و بخش غربی آن بیشتر تحت تأثیر خشکسالی‌های کشاورزی قرار گرفته است. با حرکت به سمت جنوب و شرق منطقه، بر فراوانی خشکسالی‌های هیدرولوژی افزوده می‌شود. نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش تبوزاده و همکاران (۱۳۹۴) در حوزه آبریز بختگان، که بخشی از منطقه مورد مطالعه این تحقیق نیز به‌شمار می‌رود، هم‌خوانی دارد (شکل ۷). این محققان، در مطالعه خشکسالی حوزه بختگان، نتیجه گرفتند که ایستگاه‌های واقع در مرکز و جنوب حوزه تداوم‌های طولانی‌تری را در قیاس با دیگر ایستگاه‌های واقع در حوزه، دیده‌اند. به همین صورت، مرادی^۱ و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه خشکسالی استان فارس که بخشی از منطقه مورد مطالعه این تحقیق نیز محسوب می‌شود، نتیجه گرفتند شدیدترین شدت خشکسالی در ایستگاه گوزون (شهرستان داراب) اتفاق افتاده است. با توجه به نقشه شکل ۴-ب، مشاهده می‌شود که در مقیاس زمانی دوازده‌ماهه، حداکثر شدت خشکسالی در محدوده شهرستان داراب رخ داده است که با نتایج تحقیق یادشده هم‌خوانی دارد. نتایج تحقیق حاضر نیز حاکی از آن است که با افزایش مقیاس زمانی محاسبه خشکسالی، تداوم و بزرگی خشکسالی افزایش می‌یابد. این نکته با نتیجه‌گیری تبوزاده و همکاران (۱۳۹۴) در حوزه آبریز بختگان، محسنی ساروی و همکاران (۱۳۸۳) در حوزه آبریز کارون و پژوهش نصرتی و آذرینوند (۱۳۸۱) در حوزه رودخانه اترک هم‌خوانی دارد.

از نظر تداوم خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت (شکل ۷)، بخش‌های گوناگون منطقه رفتار

تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم با استفاده از شاخص بارش استاندارد، بوم‌شناسی کشاورزی، دوره هفتم، شماره ۴، صص. ۵۴۶-۵۲۸.

صباغیان، ر.، شریفی، م.، ۱۳۸۸، استفاده از مدل‌های اتفافی در شبیه‌سازی جریان رودخانه و پیش‌بینی دبی متوسط سالانه رودخانه توسط تحلیل سری‌های زمانی، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عابدی کوپایی، ج.، ۱۳۹۰، پهنه‌بندی خشکسالی استان اصفهان و راهکارهای کاهش اثر کم‌آبی، خشکسالی، زاینده‌رود، راهکارها و چالش‌ها، اداره کل مدیریت بحران استانداری اصفهان.

غلامی، م.، علی‌بیگی، ا.، ۱۳۹۳، شناسایی روش‌های بومی مدیریت خشکسالی، مطالعه موردی: شهرستان سرپل ذهاب، پژوهش‌های روستایی، دوره پنجم شماره ۳، صص. ۶۳۸-۶۱۱.

محسنی ساروی، م.، صفدری، ع.، ثقفیان، ب.، مهدوی، م.، ۱۳۸۳، تحلیل شدت، مدت، فراوانی و گستره خشکسالی‌های حوزه کارون به کمک شاخص بارش استاندارد (SPI)، منابع طبیعی ایران، دوره ۵۷، شماره ۴، صص. ۶۲۰-۶۰۷.

نصرتی، ک.، آذرینوند، ح.، ۱۳۸۱، تحلیل منطق‌های شدت مدت دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از داده‌های بارندگی (مطالعه موردی: حوضه آبریز اترک)، بیابان، دوره هفتم، شماره ۱، صص. ۴۹-۶۲.

Abramowitz, M. & Stegun, I.A., 1965, **Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**, Vol. 55, Courier Corporation.

Behifar, M.M., Kakroodi, A.A., Kiavarz, M. & Amiraslani, F., 2019, **Combination of Meteorological Indices and Satellite Data for Drought Monitoring in Two Different Environments in Iran**, 5th International Conference on Sensor Models in Photogrammetry and Remote Sensing (SMPSR, 2019).

می‌توان به اطلاعات جامعی درباره وضعیت منطقه مورد مطالعه، میزان کمبود منابع آب و حساسیت هر یک از بخش‌های منطقه به یکی از ویژگی‌های خشکسالی پی برد و از این‌راه، می‌توان در مورد مدیریت متناسب در هر بخش اقدام کرد. همچنین، قابلیت مناسب تصاویر ماهواره‌ای بارش برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی اثبات شده است. بدین طریق، می‌توان به اطلاعاتی دست یافت که علاوه بر جزئیات مکانی مناسب، استانداردند و در بازه‌های زمانی متفاوت و مناطق گوناگون، می‌توان آنها را مقایسه کرد.

۵- منابع

بداق جمالی، ج.، جوانمرد، س.، تاجبخش، س.، ۱۳۹۸، برآورد نوع و مقدار بارش با استفاده از سنجنده TMI ماهواره TRMM، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال دهم، شماره ۳۷، صص. ۶۲-۳۱.

بذرافشان، ج.، ۱۳۸۱، **مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

بذرافشان، ج.، حجابی، س.، ۱۳۹۶، **خشکسالی روش‌های پایش**، انتشارات دانشگاه تهران.

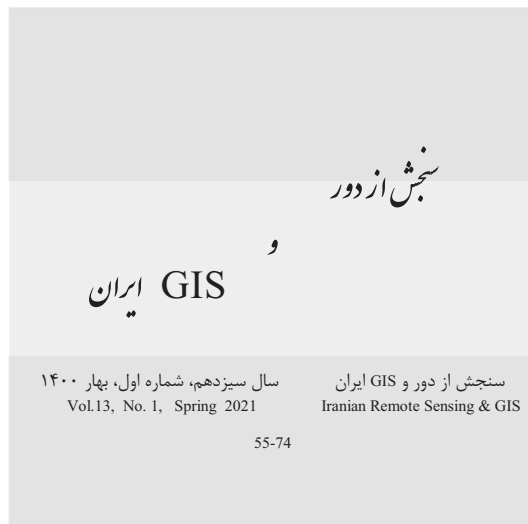
بی‌هتا، آ.، گهرنژاد، ح.، معظمی، ص.، ۱۳۹۷، بررسی داده‌های بارش ماهواره‌های GPM و RMM در مقیاس‌های روزانه، ماهیانه و فصلی در شهر تهران، سنجش از دور و GIS ایران، سال دهم، شماره ۳۸، صص. ۶۰-۴۵.

تب‌زاده، ش.، زارعی، ح.، بذرافشان، ا.، ۱۳۹۴، تحلیل شدت، مدت، فراوانی و گستره خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز بختگان، علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۸، شماره ۴، صص. ۱۲۳-۱۰۹.

دیهیم‌فرد، ر.، عینی نرگسه، ح.، حقیقت، م.، ۱۳۹۳، **پهنه‌بندی وقوع خشکسالی در استان فارس**

- Dracup, J.A., Lee, K.S. & Paulson Jr., E.G., 1980, **On the Definition of Droughts**, Water Resources Research, 16(2), PP. 297-302.
- Dupigny-Giroux, L.A., 2001, **Towards Characterizing and Planning for Drought In Vermont-Part I: A Climatological Perspective 1**, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 37(3), PP. 505-525.
- Edwards, D.C., McKee, T.B., 1997, **characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales (No. AFIT-97-051)**, Air Force Inst of Tech Wright-Patterson.
- Fang, J., Du, J., Xu, W., Shi, P., Li, M. & Ming, X., 2013, **Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Data Based on the Orographical Effect and Meteorological Conditions in a Mountainous Area**, Advances in Water Resources, 61, PP. 42-50.
- Fleming, K., Awange, J., Kuhn, M. & Featherstone, W., 2011, **Evaluating the TRMM 3B43 Monthly Precipitation Product Using Gridded Rain-Gauge Data over Australia**, Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 61.
- Ghosh, K.G., 2018, **Geo-Statistical Assessment of the Intensity, Duration, Frequency and Trend of Drought over Gangetic West Bengal, Eastern India**, In Hydrometeorology, IntechOpen.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. & Widhalm, M., 2011, **The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended**, Bulletin of the American Meteorological Society, 92(4), PP. 485-488.
- Jiao, W., Tian, C., Chang, Q., Novick, K.A. & Wang, L., 2019, **A New Multi-Sensor Integrated Index for Drought Monitoring**, Agricultural and forest meteorology, 268, PP. 74-85.
- Liu, W.T. & Kogan, F.N., 1996, **Monitoring Regional Drought Using the Vegetation Condition Index**, International Journal of Remote Sensing, 17(14), PP. 2761-2782.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J., 1993, **The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales**, Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), PP. 179-183, Boston, MA: American Meteorological Society.
- Meng, J., Li, L., Hao, Z., Wang, J. & Shao, Q., 2014, **Suitability of TRMM Satellite Rainfall in Driving a Distributed Hydrological Model in the Source Region of Yellow River**, Journal of Hydrology, 509, PP. 320-332.
- Mishra, A.K., Desai, V.R. & Singh, V.P., 2007, **Drought Forecasting Using a Hybrid Stochastic and Neural Network Model**, Journal of Hydrologic Engineering, 12(6), PP. 626-638.
- Moradi, H.R., Rajabi, M. & Faragzadeh, M., 2011, **Investigation of Meteorological Drought Characteristics in Fars Province, Iran**, Catena, 84(1-2), PP. 35-46.
- NCDC (National Climatic Data Center), 2007, **Billion Dollar U.S. Weather Disasters**, [http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/reports/billionz.html], accessed September 22, 2007.
- Panu, U.S. & Sharma, T.C., 2002, **Challenges in Drought Research: Some Perspectives and Future Directions**, Hydrological Sciences Journal, 47(S1), PP. S19-S30.
- Park, S., Im, J., Park, S. & Rhee, J., 2017, **Drought Monitoring Using High Resolution Soil Moisture through Multi-Sensor Satellite Data Fusion over the Korean Peninsula**, Agricultural and Forest Meteorology, 237, PP. 257-269.
- Rosenberg, N.J. (Ed.), 1978, **North American Droughts**, Boulder, CO, Westview Press.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J., 2002, **A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status**, Remote Sensing of environment, 79(2-3), PP. 213-224.
- Santos, C.A.G., Neto, R.M.B., de Araújo Passos, J.S. & da Silva, R.M., 2017, **Drought Assessment Using a TRMM-Derived Standardized Precipitation Index for the Upper São Francisco River Basin, Brazil**,

- Environmental Monitoring and Assessment, 189(6), P. 250.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P. & Vogt, J., 2014, **World Drought Frequency, Duration, and Severity for 1951–2010**, International Journal of Climatology, 34(8), PP. 2792-2804.
- Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W. & Hong, Y., 2016, **Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7**, Journal of Hydrometeorology, 17(1), PP. 121-137.
- Thompson, S., 1999, **Hydrology for Water Management**, Rotterdam, The Netherlands: AA Balkema Publication.
- Wan, Z., Wang, P. & Li, X., 2004, **Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index Products for Monitoring Drought in the Southern Great Plains, USA**, International Journal of Remote Sensing, 25(1), PP. 61-72.
- Wang, Q., Wu, J., Lei, T., He, B., Wu, Z., Liu, M., ... & Liu, D., 2014, **Temporal-Spatial Characteristics of Severe Drought Events and their Impact on Agriculture on a Global Scale**, Quaternary International, 349, PP. 10-21.
- Wilhite, D.A., 1997, **Responding to Drought: Common Threads from the Past, Visions for the Future**, Journal of the American Water Resources Association, 33(5), PP. 951-959.
- Wilhite, D.A., 2000, **Preparing for Drought: A Methodology**, in Drought: A Global Assessment, Wilhite, D. A. (Ed.s), London, UK: Routledge, Natural Hazards and Disaster Series.
- Wilks, D.S., 2011, **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, Vol. 100, Academic Press.
- World Meteorological Organization, 2012, **Standardized Precipitation Index User Guide**, (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood), (WMO-No. 1090), Geneva, Switzerland.
- Zhang, A. & Jia, G., 2013, **Monitoring Meteorological Drought in Semiarid Regions Using Multi-Sensor Microwave Remote Sensing Data**, Remote Sensing of Environment, 134, PP. 12-23.
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P. & Bai, Y., 2012, **SPI-Based Evaluation of Drought Events in Xinjiang, China**, Natural Hazards, 64(1), PP. 481-492.
- Zhao, Q., Chen, Q., Jiao, M., Wu, P., Gao, X., Ma, M. & Hong, Y., 2018, **The Temporal-Spatial Characteristics of Drought in the Loess Plateau Using the Remote-Sensed TRMM Precipitation Data from 1998 to 2014**, Remote Sensing, 10(6), P. 838.



Spatiotemporal Assessment of the Intensity, Duration, Frequency and Magnitude of the Drought by Using Remote Sensing Data

Behifar M.¹, Kakroodi A.A.^{2*}, Kiavarz M.³, Amiraslani F.⁴

1. Ph.D. Student, Dep. of Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran
2. Associate Prof., Dep. of Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran
3. Assistant Prof., Dep. of Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran
4. Associate Prof., Dep. of Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran

Abstract

Drought is one of the most important natural disasters in the country, with devastating environmental and economic effects. Most drought studies have focused on drought severity and other drought characteristics have not been usually investigated. In this research, for the first time, the capability of meteorological drought indices and satellite data are combined and applied to study drought in inland and coastal basins. For this purpose, the SPI index was calculated by using TRMM satellite precipitation products and then, the drought characteristics such as severity, duration, magnitude, and extent were spatially studied. The results showed that the correlation coefficient between the SPI calculated from the image and the station data was 0.94. The maximum intensity of drought in the study area was -4.19 which occurred in December 2010. Furthermore, the frequency of extreme droughts in 6- and 12-months timescales was higher in the inland area compared with the coastal area. Moreover, in the six-month timescales, 60 percent of drought events had a magnitude of -18.3 or less. The results showed that it is possible to obtain the extent of drought by using satellite imagery which cannot be calculated by other methods. Besides, by using satellite images, drought characteristics could be studied spatially at the basin scale, which is not possible by traditional methods. The results showed the advantage of using satellite precipitation images in the drought study.

Keywords: Drought, Drought extent, Remote Sensing, Standardized Precipitation Index.