



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال دوم / شماره مسلسل هفتم / پاییز ۱۴۰۰ / صفحات: ۸۳-۱۰۰

DOI: 10.30488/CCR.2021.317582.1059



واکاوی وردش‌های فضایی - زمانی شدت خشکسالی در حوضه خزر با بهره‌گیری از داده‌های شبکه‌ای GPCC

امیرحسین حلبیان^{۱*}، علی قاسمی سیانی^۲

^۱دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور

^۲کارشناسی‌ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۲

چکیده

یکی از مهمترین این پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم افزایش فراوانی رخداد مخاطرات اقلیمی مانند سیل، خشکسالی، بالا آمدن تراز آب دریا، چرخندهای حاره‌ای، امواج گرمایی و سرمای، بارش سنگین، طوفان گرد و غبار و ... است؛ که متداول‌ترین آنها در ایران رخداد سیل و خشکسالی است. پژوهش حاضر با هدف بررسی وردش‌های فضایی و زمانی شدت خشکسالی در حوضه آبریز خزر صورت گرفته است. در این پژوهش از پایگاه داده بارش جهانی GPCC با تفکیک مکانی ۰/۵ در ۰/۵ درجه قوسی در یک دوره آماری ۶۳ ساله از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۳ در مقیاس زمانی ماهیانه، استفاده شد. از برجستگی‌های این پژوهش بهره‌گیری از داده‌های شبکه‌ای در بازه زمانی بلندمدت جهت واکاوی وردش‌های مکانی و زمانی شدت خشکسالی در حوضه آبریز خزر است. در ادامه، با کدنویسی در نرم‌افزار متلب داده‌های مورد نیاز برای برآورد نمایه خشکسالی RAI در حوضه در طول دوره آماری مذکور تبدیل به آرایه شد. سپس میزان ناهنجاری بارش (RAI) در بازه زمانی ماهیانه، فصلی و سالانه برای واکاوی وردش‌های مکانی و زمانی شدت خشکسالی برآورد شد. برای تحلیل روند زمانی بارش، از داده‌های اخذ شده از این پایگاه داده میانگین سالانه، فصلی و ماهانه تهیه و آزمون ناپارامتری من-کندال در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه انجام شد. نتایج نشان داد که از نظر زمانی خشکسالی با شدت ضعیف، متوسط، شدید و بسیار شدید در طول دوره آماری رخ داده است و از نظر فضایی خشکسالی با شدت ضعیف در در تمامی ماه‌ها، فصول و مقیاس سالانه در بیشتر مناطق سطح حوضه خزر مشاهده می‌شود. در عین حال، در ماه می خشکسالی با شدت متوسط در ارتفاعات جنوب‌شرقی زیرحوضه سفیدرود نمودی آشکار دارد. تحلیل روند بارش حوضه خزر در سری‌های زمانی ماهانه نیز نشان از روند کاهشی معنادار در ماه مارس و مقیاس سالانه در این حوضه دارد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، شاخص ناهنجاری بارش، وردش، GPCC، حوضه خزر

مقدمه

همه نقاط دنیا ممکن است اسیر پدیده خشکسالی شوند. اما این وضعیت در مناطقی که از نظر اقلیمی به طور نامنظم و تصادفی با استفاده از سامانه‌های مختلف آب و هوایی تحت تأثیر قرار می‌گیرند بیشتر مشاهده می‌شوند (رضیئی، ۱۳۸۲: ۴). در دهه‌های اخیر در میان حوادث طبیعی که جماعات انسانی را تحت تأثیر قرار

داده‌اند تعداد و فراوانی خشکسالی بیش از سایر حوادث بوده است. از سوی دیگر با توجه به درجه‌بندی حوادث طبیعی بر اساس برخی از پارامترها از قبیل درجه شدت، تداوم و مجموع فضای تحت پوشش و غیره طی سال‌های گذشته خشکسالی رتبه اول را داشته است. کشور ایران بدلیل قرار گرفتن در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی یکی از کشورهای خشک و نیمه خشک جهان تلقی می‌گردد. به همین دلیل هزار چند گاهی شاهد نابهنجاری شدید جوی به‌ویژه باعث وقوع پدیده

*نویسنده مسئول: halabian_a@yahoo.com

خشکسالی می‌گردد (خلیلی و بذرافشان، ۱۳۸۷: ۱۳). خشکسالی نیز نظیر سیل، قحطی، امراض و آفات توسعه اقتصادی جوامع را در تمامی سطوح به مخاطره انداخته و جامعه را از طریق تغییرات در قابلیت دستیابی به مواد غذایی، پوشاک، منابع آب و ذخایر انرژی تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا تمامی جنبه‌های زندگی و بخش‌های مختلف جامعه به ویژه تغییر محیط طبیعی را به طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهد. نقصان بارش و نوسانات شدید آن موجب عدم اطمینان از دریافت حداقل بارش مورد نیاز برای مصارف کشاورزی، تأمین جریان‌های سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و مصارف انسانی می‌شود (پیرمادیان و همکاران، ۱۳۸۷: ۸). از این رو، ولپهات و گلانتز^۱ (۱۹۸۵) خشکسالی به چهار دسته خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی اجتماعی طبقه‌بندی می‌شود. ادبیات مربوط به خشکسالی متنوع است که برخی به خشکسالی آب و هوایی، برخی به خشکسالی هیدرولوژیکی و نیز برخی به خشکسالی کشاورزی تأکید کرده‌اند.

برای ارزیابی و پایش خشکسالی‌های اقلیمی روش‌های متعددی به وسیله محققان مختلف در سراسر دنیا ابداع و به کار گرفته شده، اما برخی از این روش‌ها بسیار پیچیده و نیازمند اطلاعات گسترده است که در همه‌ی مکان‌ها دسترسی به آن مقدور نبوده و گاهی برای سایر مناطق نیز از کارایی کافی برخوردار نبوده است. شاخص‌های خشکسالی عناصر مهم پایش و برآورد خشکسالی هستند. شاخص‌ها فهم ارتباط اطلاعات را درباره بی‌نظمی‌های اقلیمی برای کاربران گوناگون آسانتر می‌کنند. و به دانشمندان و پژوهشگران اجازه می‌دهند تا کمیت بی‌نظمی‌های اقلیمی را در روابط شدت، تداوم، فراوانی و گسترش مکانی و زمانی مطالعه کنند. شاخص‌ها اطلاعات مهم و مفیدی را برای برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت استفاده از منابع آب در اختیار کاربران قرار می‌دهند. تاکنون شاخص‌های متنوعی برای توصیف شدت خشکسالی پیشنهاد شده و به کار گرفته شده است (جوانمرد و آسیایی، ۱۳۸۳: ۱۱). در این زمینه، فرج‌زاده و همکاران (۱۳۷۳)، با بررسی نمایه‌های مختلف

خشکسالی، نمایه درصد نرمال بارندگی را به علت سادگی، جامعیت و انعطاف پذیری به عنوان نمایه مناسب انتخاب نموده و به بررسی خشکسالی‌ها در داخل کشور پرداختند. و به این نتیجه رسیدند که فراوانی وقوع خشکسالی‌های ضعیف، متوسط و شدید در کشور خیلی بیشتر از خشکسالی‌های بسیار شدید و تعداد آن‌ها تقریباً با هم برابر بوده است. مقدسی و همکاران (۱۳۸۴) با استفاده از شاخص خشکسالی مؤثر (EDI)، وضعیت خشکسالی استان تهران را در سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ که شروع خشکسالی‌های اخیر بوده، در مقیاس زمانی روزانه به صورت نقطه‌های مکانی، پایش و مورد ارزیابی قرار دادند و نقشه‌های خشکسالی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. نتایج نشان داد که از آبان ماه ۱۳۷۷ در حد خفیف خشکسالی آغاز و توسعه یافته، به طوری که از فروردین ۱۳۷۸ بخش‌های مرکزی استان با خشکسالی شدید مواجه می‌گردد و سپس این وضعیت در ماه‌های اردیبهشت و خرداد تشدید می‌شود. رضیئی و همکاران (۱۳۸۶) شدت و تداوم دوره‌های خشک استان سیستان و بلوچستان را با استفاده از شاخص SPI در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داده که با افزایش تداوم از تعداد رخداد‌های خشکسالی کاسته شده و فراوان ترین وقایع خشکسالی در تداوم‌های یک تا ۶ ماهه روی می‌دهد و در نواحی جنوبی استان تداوم خشکسالی‌ها کمتر از سایر نواحی آن بوده است. در حالی که در ناحیه شمالی تداوم دوره‌های خشک بیشتر بوده که باعث می‌شود خشکسالی‌ها اثرات نامطلوب بیشتری در پی داشته باشند.

مساعدی و همکاران (۱۳۸۷)، جهت ارزیابی و تحلیل مکانی خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان از شاخص SPI استفاده کردند و به نتایج مختلفی از جمله وجود یک سیکل ۱۱ ساله ترسالی یا خشکسالی مهم و حاکم بودن شرایط با شدت خشکسالی بیشتر در مناطق مرزی و نوار ساحلی دریای خزر رسیدند. عطایی و همکاران (۱۳۸۸)، پهنه‌بندی خشکسالی استان کرمان با استفاده از شاخص شدت خشکسالی پالمر در محیط GIS طی دوره آماری ۱۷ ساله (۱۳۷۰-۱۳۸۶) را مورد

لوکاس و همکاران^۴ (۲۰۰۳) برای مطالعه خشکسالی‌های هواشناسی در مقیاس‌های زمانی متفاوت در کشور یونان از سه شاخص عدد Z ناهنجاری‌های بارش و بارش استاندارد استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که هر سه شاخص برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه روند یکسانی داشته و همچنین مطابقت خوبی با شاخص پالمر دارد. میسرا و دسای^۵ (۲۰۰۵) از مدل‌های آماری ARIMA و SARIMA به منظور پیش‌بینی خشکسالی‌ها استفاده نمودند. باکانلی و همکاران^۶ (۲۰۰۹) از مدل ANFIS برای پیش‌بینی خشکسالی در ترکیه استفاده نمودند. مقایسات به‌عمل آمده نشانگر برتری مدل‌هایی بود که در آن‌ها از ترکیب مقادیر پیشین بارندگی و شاخص SPI استفاده شده بود. لیانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۴) روند تغییرات خشکسالی در شمال، جنوب و شمال‌غرب چین و همچنین منطقه کیلینگ‌هایه^۸ در این کشور را برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار دادند. میلادی و همکاران (۲۰۱۴) به پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در استان آذربایجان غربی به بهره‌گیری از نمایه SPI پرداختند. نتایج نشان داد که در بازه‌های ۳ و ۶ ماهه بخش‌هایی از غرب و شمال و در بازه‌های ۱۲ و ۴۸ ماهه قسمت‌هایی از شرق استان خشکسالی‌های بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. باتافوکو^۹ و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به ارزیابی خشکسالی و عدم قطعیت آن در جنوب ایتالیا (ناحیه کالابریا) پرداختند.

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی و واکاوی تغییرات فضایی-زمانی شدت خشکسالی در حوضه خزر با استفاده از داده‌های مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهان (GPCC) و شاخص ناهنجاری بارش (RAI) است تا نمایی از وردایی پدیده خشکسالی به عنوان نمادی از تغییر اقلیم در این حوضه مهم که از ناهنگی در نوع، میزان، رژیم بارش به سبب تنوع توپوگرافی،

ارزیابی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده شدیدترین خشکسالی‌ها در چند سال اخیر بخصوص در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۶ در مناطق انار و بم رخ داده است. کاظمی بی‌نیاز (۱۳۹۳)، ضمن بررسی خشکسالی هواشناسی در استان همدان با استفاده از شاخص EDI به این نتیجه رسید که بیشترین سال‌های خشک (۱۱ سال) در ایستگاه خمیگان و کمترین آن (۴ سال) در ایستگاه فرودگاه مشاهده شد. در مجموع نتایج این مطالعه بیانگر استقرار وضعیت خشکسالی در سطح استان همدان طی سال‌های گذشته می‌باشد. وختوری و همکاران (۱۳۹۶)، به مقایسه شاخص‌های خشکسالی اقلیمی در ایستگاه‌های بارش ایران پرداختند و از بین تمامی ایستگاه‌های موجود، ۳۶ ایستگاه که دارای آمار هواشناسی کامل تر و معتبرتری نسبت به بقیه ایستگاه‌ها بودند، انتخاب شدند. سپس از بین شاخص‌های خشکسالی اقلیمی شش شاخص RAI ، $SIAP$ ، $PNPI$ ، DI ، Z و SPI را برگزیده و خشکسالی هر کدام از ایستگاه‌های انتخابی به وسیله این شاخص‌ها تعیین گردید. در پایان مشخص گردید شاخص DI بیشترین رابطه را با بارندگی داشته و در تمامی پهنه ایران این رابطه با ضریب همبستگی بالا و به طور یکسان مشاهده می‌گردد. در سطح جهان نیز به عنوان نمونه هنریکوس و سانتوز^۱ (۱۹۹۸) به منظور تحلیل خشکسالی‌های پرتغال، از یک مدل توزیع منطقه‌ای خشکسالی استفاده و نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی و منحنی‌های شدت، مساحت و فراوانی خشکسالی را ترسیم کردند. داله زیوس^۲ و همکاران (۲۰۰۰) بر اساس تحلیل منحنی‌های شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی، نقشه‌های هم‌شدت خشکسالی را برای یونان ترسیم کردند و نتیجه گرفتند که نواحی شمالی یونان نسبت به نواحی جنوبی آن از خشکسالی شدیدتری برخوردار است. بنجامین و ساندرز^۳ (۲۰۰۲) رابطه فراوانی و تداوم خشکسالی‌های اروپا را در مقیاس‌های زمانی مختلف مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که در مقیاس زمانی کوتاه مدت، فراوانی خشکسالی و در مقیاس زمانی بلند مدت، تداوم خشکسالی‌ها بیشتر است.

4. Loukas et al
5. Mishra & Desai
6. Bacanli
7. Liang
8. Killinghay
9. Buttafuoco

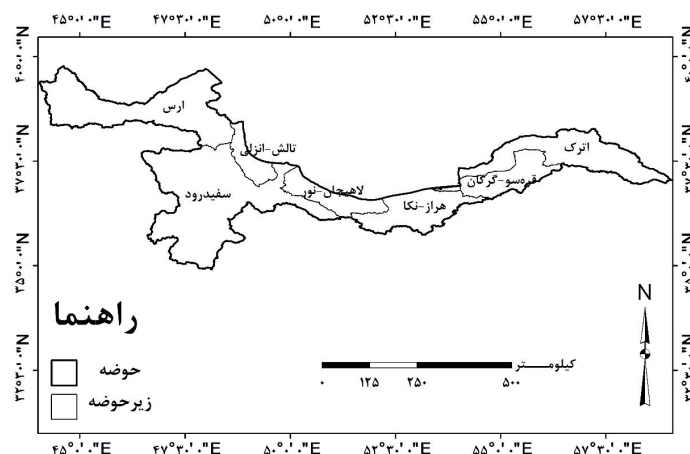
1. Henriques & Santos
2. Dalezios
3. Benjamin & Saunders

پوشش‌های مختلف سطح زمین و وجود توده آبی خزر بر خوردار است فراهم شود.

محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز خزر با مساحت ۱۷۲۱۲۲ کیلومترمربع (۱۱٪ مساحت کشور)، محدوده‌ای میان آزارات در شمال غربی تا سرچشمه‌های اترک و گرگان و خط‌الرأس‌های توده‌های کوهستانی طالش و البرز را در بر می‌گیرد. این حوضه مابین مدار ۳۵ درجه تا ۳۹ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۹ درجه طول شرقی واقع شده است. وجود ناهمواری‌های البرز سبب تنوع گونه‌های اقلیمی مشتمل بر ناحیه معتدل خزری، ناحیه سرد و مرطوب

کوهستانی در این گستره جغرافیایی شده است. در عین حال، فاصله نه چندان زیاد از توده آبی و کوهستان در این پهنه جلگه‌ای از آستارا تا گرگان سبب پدیداری اقلیم مرطوب در بخش شمالی البرز شده است. (Afshin, 1994). در مجموع، بخش‌های غربی این حوضه در مقایسه با شرق و مرکز آن از اقلیم ملایم، معتدل، مرطوب و بارش بیشتری برخوردار است. حوضه خزر در تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، ۷ زیرحوضه ارس، تالش-انزلی، سفیدرود، لاهیجان-نور، هراز-نکا، قره‌سو-گرگان و اترک را از غرب به شرق در بر می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱- زیرحوضه‌های خزر

۶۱۹ × ۷۵۶ (سطرها نماینده ماه‌ها و ستون‌ها نماینده یاخته‌های مکانی) ساخته شد. در مرحله بعد برای برش زدن داده‌ها در درون حوضه خزر از تابع اینپولیگون^۲ در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد و آرایه نهایی در ابعاد ۷۰ × ۷۵۶ (سطرها نماینده ماه‌ها و ستون‌ها نماینده یاخته‌های مکانی) ایجاد شد. در ادامه، با کدنویسی در نرم‌افزار متلب داده‌های مورد نیاز برای برآورد نمایه خشکسالی RAI در حوضه در طول دوره آماری مذکور در این نرم افزار تبدیل به آرایه شد. سپس با کمک نرم‌افزار متلب محاسبات لازم انجام گرفت و میزان ناهنجاری بارش (RAI) در

داده‌ها و روش شناسی

در این پژوهش از پایگاه داده بارش جهانی GPCC^۱ با توان تفکیک مکانی ۰/۵ در ۰/۵ درجه قوسی در یک دوره آماری ۶۳ ساله از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۳ در مقیاس زمانی ماهیانه، استفاده شد. از برجستگی‌های این پژوهش بهره‌گیری از داده‌های شبکه‌ای در بازه زمانی بلندمدت جهت واکاوی وردش‌های مکانی و زمانی شدت خشکسالی در حوضه آبریز خزر است. در این ارتباط، با کدنویسی در نرم‌افزار متلب داده‌های این مرکز در فرمت nc بر روی چارچوب ایران پردازش گردید و آرایه نهایی در ابعاد

2. Inpolygon

1. Global Precipitation Climatology Center

بیشترین مقادیر بارندگی روی داده در دوره بررسی $(\bar{m})$ ، استخراج میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی روی داده در دوره بررسی $(\bar{x})$ و مقایسه داده-های بارندگی (P) با میانگین درازمدت بارندگی $(\bar{P})$ ضروری است. چنان‌چه $P > \bar{P}$ یا ناهنجاری مثبت باشد، از رابطه (۱) و چنان‌چه $P < \bar{P}$ یا ناهنجاری منفی باشد، از رابطه (۲) برای محاسبه این شاخص استفاده می‌شود (سعیدی دهکی، ۱۳۸۹)

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{RAI} = +3 \times \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{m} - \bar{P}} \right]$$

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{RAI} = -3 \times \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{x} - \bar{P}} \right]$$

طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص RAI مطابق جدول ۱ می‌باشد:

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی با شاخص RAI (جوی‌زاده، ۱۳۸۴)

مقدار شاخص RAI	-۰/۳ تا +۰/۳	-۱/۲ تا -۰/۳	-۱/۲ تا -۲/۱	-۲/۱ تا -۳	کمتر از -۳
شدت خشکسالی	آستانه نرمال	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید

رابطه ۵

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18}$$

اگر $n \leq 10$

$$\text{رابطه ۶} \quad \text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که در آن: n تعداد داده‌ها و m معرف تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده‌ی تکراری وجود دارد و t بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است.

۳. استخراج آماره z به کمک رابطه (۷):

رابطه ۷

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases}$$

در یک آزمون دو دامنه برای روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه (۶) برقرار باشد.

$$\text{رابطه ۸} \quad |z_s| \leq z_{\alpha/2}$$

که در آن: α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در

بازه زمانی ماهیانه، فصلی و سالانه برای واکاوی وردش‌های مکانی و زمانی شدت خشکسالی برآورد شد. جهت ارزیابی وردش‌های فضایی شدت خشکسالی از میزان شاخص به دست آمده ماهیانه، فصلی و سالانه طی ۶۳ سال میانگین گرفته شد و به کمک نرم‌افزار GIS با روش کریجینگ معمولی نقشه‌های تغییرات فضایی شدت خشکسالی ماهیانه، فصلی و سالانه با شاخص ناهنجاری بارش حوضه خزر با مجموعه ۷ زیرحوضه ترسیم شد.

اساس شاخص ناهنجاری بارش (RAI)، محاسبه انحراف از نرمال بارندگی بلندمدت است. برای محاسبه این شاخص، محاسبه میانگین درازمدت بارندگی $(\bar{P})$ در ایستگاههای موردنظر، استخراج میانگین ده مورد از

در عین حال برای تحلیل روند زمانی بارش با کدنویسی در نرم‌افزار متلب از داده‌های استخراج شده از این پایگاه بارشی میزان آماره من-کندال در بازه‌های زمانی ماهیانه، فصلی و سالانه برآورد و معناداری روند با احتمال ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. مراحل محاسبه آزمون ناپارامتری من-کندال به شرح زیر است:

۱. محاسبه اختلاف بین تک‌تک جملات سری با همدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر s

$$\text{رابطه ۳} \quad s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k)$$

که در آن: n تعداد جملات سری، X_j و X_k به ترتیب داده‌های z ام و k ام سری هستند. تابع علامت نیز از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است:

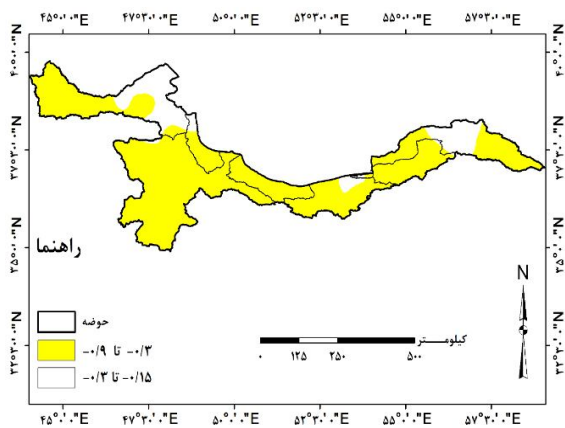
$$\text{رابطه ۴} \quad \text{sgn}(X_j - X_k) =$$

$$\begin{cases} +1 & \text{if } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_k) < 0 \end{cases}$$

۲. محاسبه واریانس با استفاده از یکی از روابط (۵) و (۶):

اگر $n > 10$

و در سایر بخش‌های حوضه، خشکسالی با شدت ضعیف مشاهده می‌شود. وضعیت نرمال در این ماه در حاشیه غربی زیرحوضه ارس، شمال قره‌سو-گرگان و غرب اترک دیده می‌شود. در ماه ژوئن خشکسالی با شدت ضعیف در بیشتر سطح حوضه خزر قابل رویت است. در ماه جولای نیز خشکسالی با شدت ضعیف در نیمه غربی حوضه خزر مشاهده می‌شود. در ماه آگوست عمدتاً در نیمه غربی حوضه خشکسالی با شدت ضعیف ملاحظه می‌شود. در ماه سپتامبر خشکسالی با شدت ضعیف به صورت پراکنده در یک سوم شرقی حوضه، غرب و جنوب زیرحوضه سفیدرود و حاشیه غربی زیرحوضه ارس مشاهده می‌شود. در ماه اکتبر خشکسالی با شدت ضعیف به صورت پراکنده در یک‌سوم شرقی حوضه، شمال، مرکز و جنوب زیرحوضه سفیدرود و غرب زیرحوضه ارس آشکار است. در ماه نوامبر خشکسالی با شدت ضعیف در یک‌سوم شرقی حوضه و بیشتر سطح زیرحوضه سفیدرود مشاهده می‌شود. در ماه دسامبر نیز خشکسالی با شدت ضعیف در نیمه غربی حوضه خزر و مرکز زیرحوضه اترک در شرق حوضه قابل رویت است. به‌طور کلی به جز ماه ژانویه در ۱۱ ماه دیگر سال در بیشتر سطح حوضه خشکسالی با شدت ضعیف نمودی آشکار دارد. در عین حال به نظر می‌رسد خشکسالی‌های ضعیف در نیمه غربی حوضه نسبت به نیمه شرقی آن رخنمونی آشکارتر دارند (اشکال ۱ تا ۱۲).

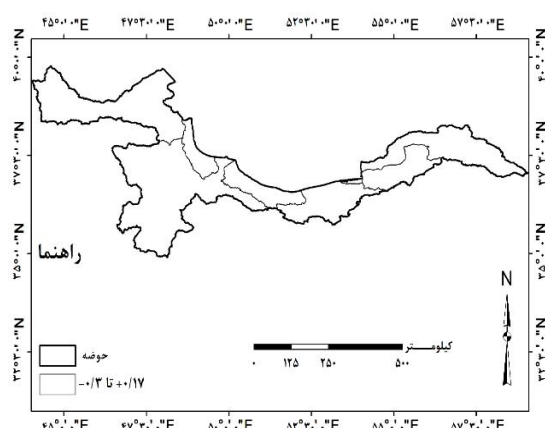


شکل ۲- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه فوریه

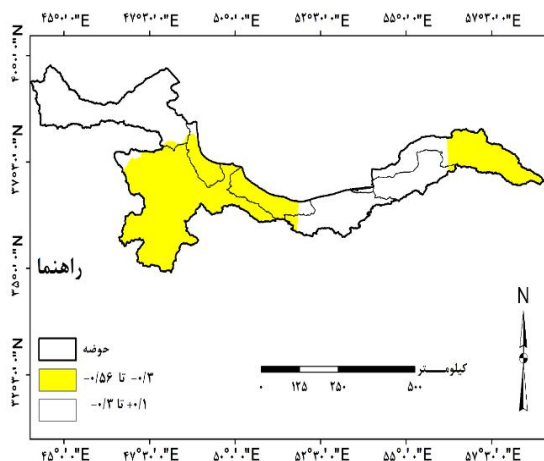
نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌دار α است که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از $\alpha/2$ استفاده شده است. در این پژوهش، این آزمون برای احتمال ۹۵ درصد استفاده شد. فرض مقابل یا یک بر وجود روند دلالت دارد و به این معنی است که Z از نظر آماری معنادار است. وقتی این فرض تأیید می‌شود که $Z < -Z_{\alpha/2}$ یا $Z > Z_{\alpha/2}$ باشد. مقادیر مثبت Z روند صعودی و مقادیر منفی روند نزولی را در داده‌ها نشان می‌دهد (ویوکاناندان، ۲۰۰۷).

الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی ماهیانه

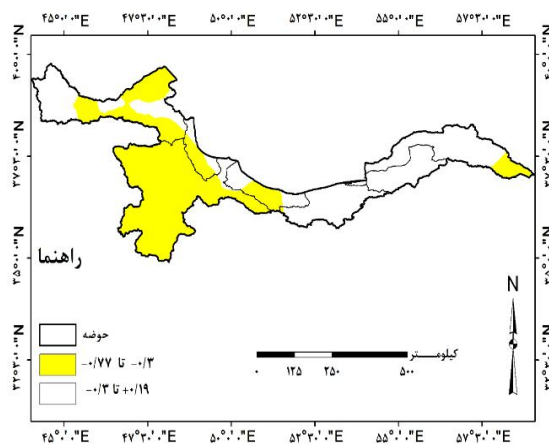
درحوضه خزر: با بررسی اشکال ۱ تا ۱۲ که واکاوی وردش‌های مکانی شدت خشکسالی ماهیانه را با استفاده از شاخص ناهنجاری بارش در حوضه خزر آشکار می‌سازند مشخص شد که در ماه ژانویه در تمام سطح حوضه وضعیت نرمال مشاهده می‌شود. در ماه فوریه با در بیشتر سطح حوضه خشکسالی با شدت ضعیف مشاهده می‌شود. وضعیت نرمال در این ماه به طور پراکنده در نیمه شرقی زیرحوضه ارس، شمال تالش-انزلی، شمال شرقی هراز-نکا و قسمت‌های شمالی و مرکزی زیرحوضه اترک دیده می‌شود. در ماه مارس خشکسالی با شدت ضعیف در نیمه غربی حوضه خزر و شرق زیرحوضه اترک مشاهده می‌شود. در ماه آوریل نیز خشکسالی ضعیف در زیرحوضه‌های سفیدرود، تالش-انزلی، لاهیجان-نور و نیمه شرقی اترک قابل رویت است. در ماه می خشکسالی با شدت متوسط در ارتفاعات جنوب شرقی زیرحوضه سفیدرود



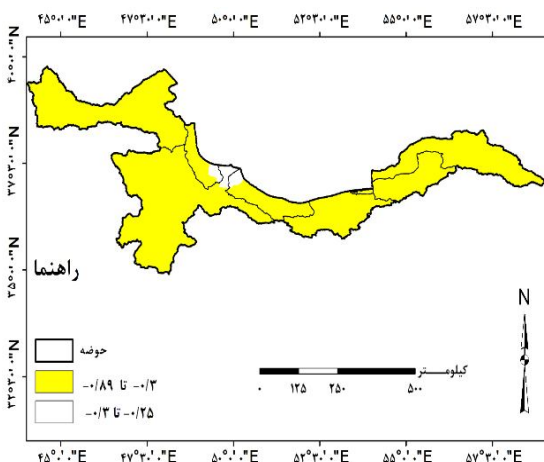
شکل ۱- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه ژانویه



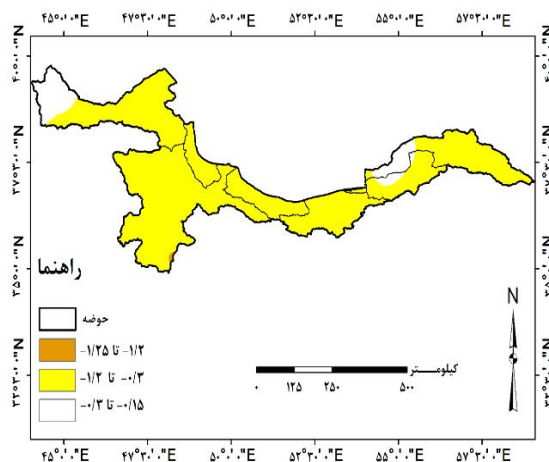
شکل ۴- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه آوریل



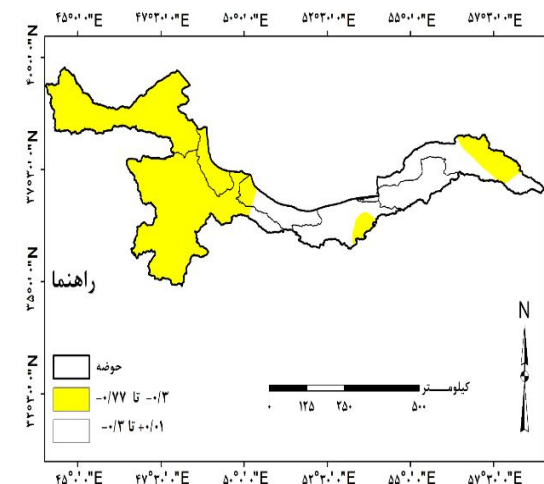
شکل ۳- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه مارس



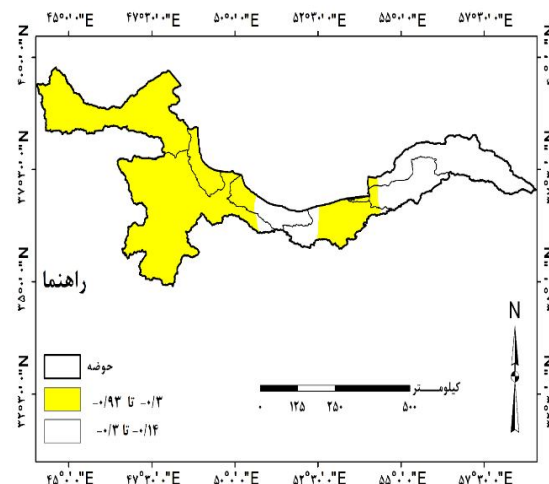
شکل ۶- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه ژوئن



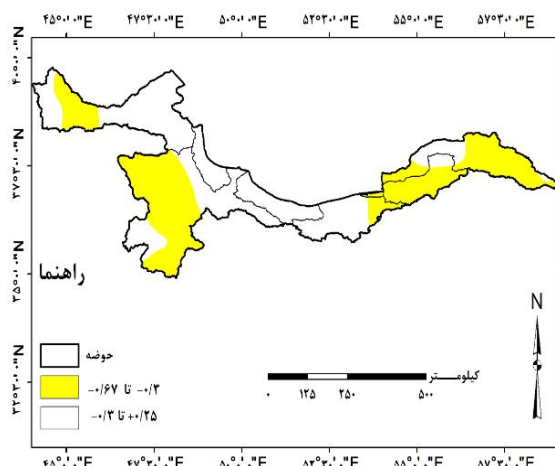
شکل ۵- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه می



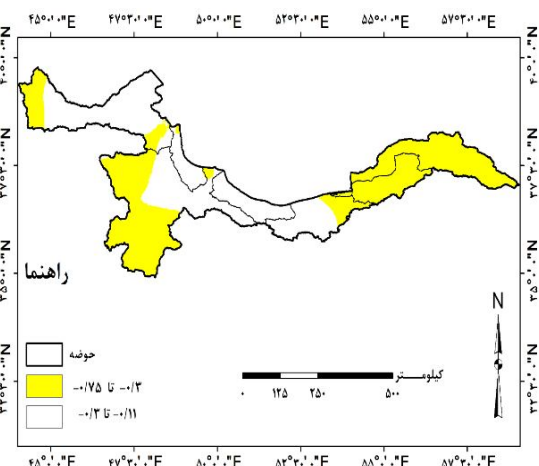
شکل ۸- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه آگوست



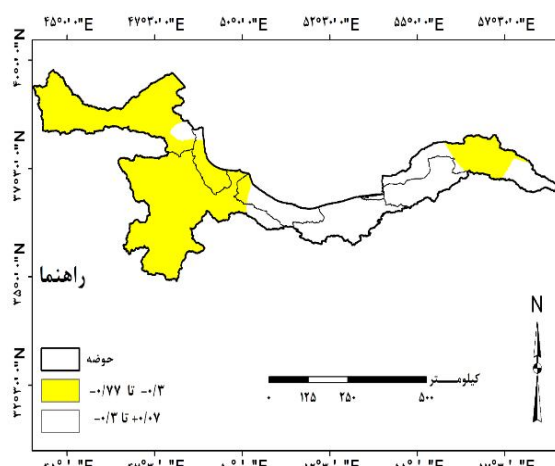
شکل ۷- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه جولای



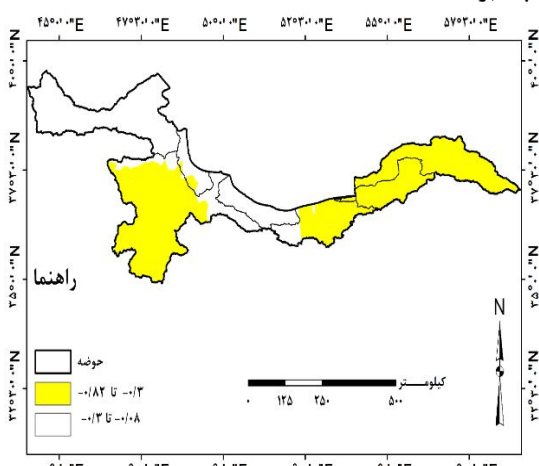
شکل ۱۰- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه اکتبر



شکل ۹- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه سپتامبر



شکل ۱۲- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه دسامبر



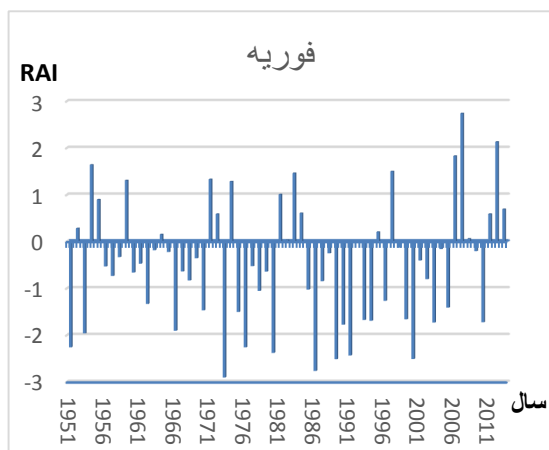
شکل ۱۱- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در ماه نوامبر

بسیار شدید و در همین ماه در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۹۲ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۶۴- و ۲/۲۲- با خشکسالی‌های شدید مواجه بوده است. تغییرات زمانی شدت خشکسالی در ماه آوریل نیز حاکی از بروز خشکسالی بسیار شدید در سال ۱۹۶۶ با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۳/۴۹- و خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۱، ۱۹۸۵، ۱۹۸۹، ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۷-، ۲/۶۸-، ۲/۲۷-، ۲/۱۲-، ۲/۳۲- و ۲/۸۴- بوده است. در ماه می نیز در سال‌های ۱۹۵۱، ۱۹۹۱، ۱۹۹۲، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۱۴-، ۲/۲۲-، ۲/۳۹-، ۲/۸۲- و ۲/۳۳- خشکسالی‌های شدید در این حوضه روی داده است. ارزیابی تغییرات زمانی

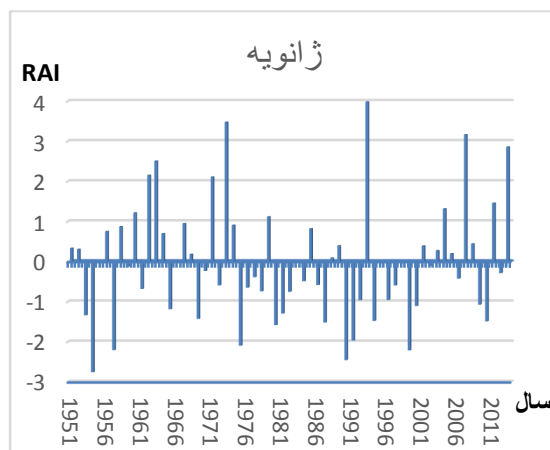
الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی ماهیانه
در حوضه خزر: با بررسی اشکال ۱۳ تا ۲۴ که واکاوی ورودش‌های زمانی شدت خشکسالی در حوضه خزر را آشکار می‌سازند مشخص شد که در ماه ژانویه در سال‌های ۱۹۵۴، ۱۹۵۷، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۹ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۷۶-، ۲/۲۱-، ۲/۴۶- و ۲/۲۱- شدت خشکسالی در حوضه خزر شدید بوده است. در ماه فوریه خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۱۹۵۱، ۱۹۷۳، ۱۹۷۶، ۱۹۸۰، ۱۹۸۶، ۱۹۸۹، ۱۹۹۱ و ۲۰۰۰ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۲۶-، ۲/۹-، ۲/۲۶-، ۲/۳۸-، ۲/۷۶-، ۲/۵۱-، ۲/۴۳- و ۲/۵۱- در این حوضه رخدادی آشکار دارد. حوضه خزر در ماه مارس سال ۲۰۰۰ با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۳/۲۳- با خشکسالی

۲/۶۸، ۲/۵۸، ۲/۳، ۲/۳۱، ۲/۸۴، ۲/۸۸، ۲/۱۲-
 ، ۲/۳۶ و ۲/۸۹- دارد. شدت خشکسالی‌ها در ماه
 اکتبر نیز در سال‌های ۱۹۵۱، ۱۹۸۴، ۱۹۹۵، ۲۰۰۴،
 ۲۰۰۶، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به ترتیب با میزان شاخص
 ناهنجاری بارندگی ۲/۴۴، ۲/۵۱، ۲/۳۳، ۲/۹۶،
 ۲/۴۲، ۲/۱۹ و ۲/۳۸- در این حوضه شدید بوده
 است. این حوضه در ماه نوامبر در سال ۱۹۵۷ با میزان
 شاخص ناهنجاری بارندگی ۳/۱۲- با خشکسالی بسیار
 شدید و در همین ماه در سال‌های ۱۹۵۶، ۱۹۷۰،
 ۱۹۷۴، ۱۹۸۱ و ۱۹۸۹ به ترتیب با میزان شاخص
 ناهنجاری بارندگی ۲/۹۱، ۲/۷۷، ۲/۵۹، ۲/۳۶ و
 ۲/۴۹- با خشکسالی‌های شدید روبرو بوده است. شاخص
 ناهنجاری بارندگی در این حوضه در دسامبر ۱۹۶۹ با
 میزان ۳/۳۸- حکایت از رویداد خشکسالی بسیار
 شدید و در سال‌های ۱۹۵۸، ۱۹۷۰، ۱۹۷۳، ۱۹۸۴،
 ۱۹۸۷، ۱۹۹۷، ۲۰۰۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ به ترتیب با
 میزان ۲/۴۷، ۲/۳، ۲/۱۳، ۲/۴۹، ۲/۶۹، ۲/۲۵-
 ۲/۱۷، ۲/۱۵ و ۲/۴۳- نشان از رخداد خشکسالی-
 های شدید در این ماه دارد (اشکال ۱۳ تا ۲۴).

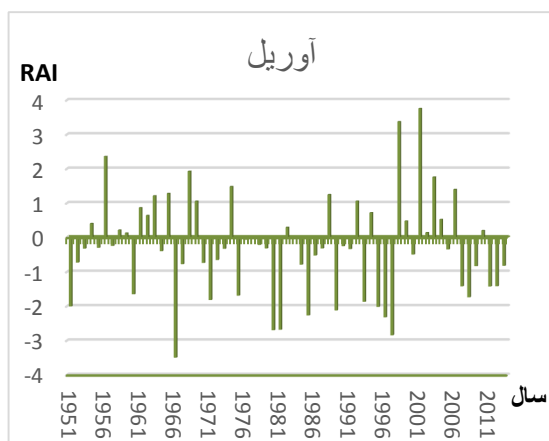
شدت خشکسالی در ماه ژوئن نیز نشان از بروز خشکسالی
 بسیار شدید در سال ۲۰۰۸ با میزان شاخص ناهنجاری
 بارندگی ۳/۱۴- و خشکسالی‌های شدید در سال‌های
 ۱۹۶۰، ۱۹۶۲، ۱۹۸۰، ۱۹۸۱، ۱۹۹۱، ۱۹۹۴، ۲۰۰۷
 و ۲۰۱۲ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی
 ۲/۲۷، ۲/۲۷، ۲/۵۴، ۲/۳۸، ۲/۱۱، ۲/۶، ۲/۳۲-
 و ۲/۴- دارد. در ماه جولای نیز خشکسالی‌های شدید
 در سال‌های ۱۹۶۱، ۱۹۷۱، ۱۹۷۸، ۱۹۸۰، ۱۹۸۱،
 ۱۹۸۲، ۱۹۸۴، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۸ به ترتیب با میزان
 شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۷۹، ۲/۲۲، ۲/۵۴،
 ۲/۱۳، ۲/۱۲، ۲/۳۹، ۲/۷۸ و ۲/۸۹- در
 این حوضه روی داده است. این حوضه در ماه آگوست
 در سال‌های ۱۹۵۶، ۱۹۸۶، ۱۹۹۱، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۹ به
 ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۸-،
 ۲/۱۷، ۲/۳۴، ۲/۷۸ و ۲/۲۳- با خشکسالی‌های
 شدید مواجه بوده است. بررسی تغییرات زمانی شدت
 خشکسالی در ماه سپتامبر در حوضه خزر نیز نشان از
 رخداد خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۱۹۵۵،
 ۱۹۷۷، ۱۹۷۹، ۱۹۸۵، ۱۹۹۴، ۱۹۹۸، ۲۰۰۱، ۲۰۰۴
 و ۲۰۱۳ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی



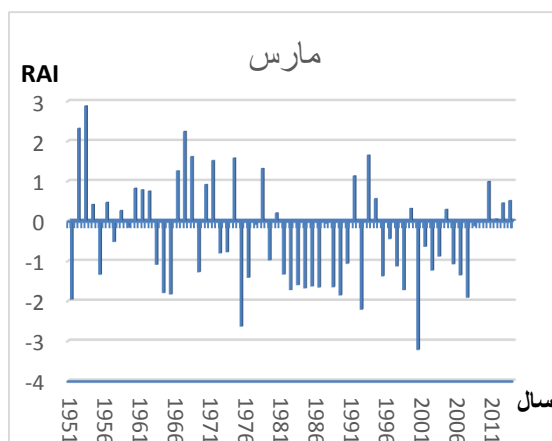
شکل ۱۴- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه فوریه



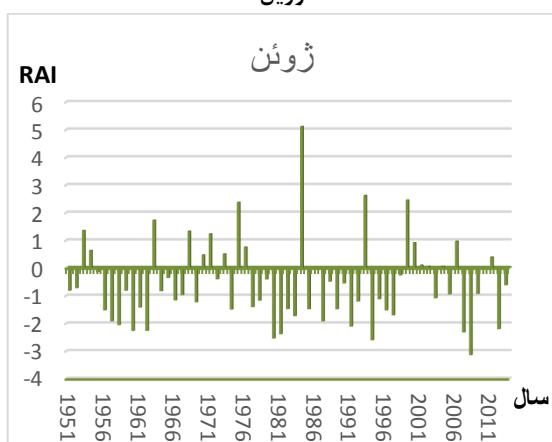
شکل ۱۳- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه ژانویه



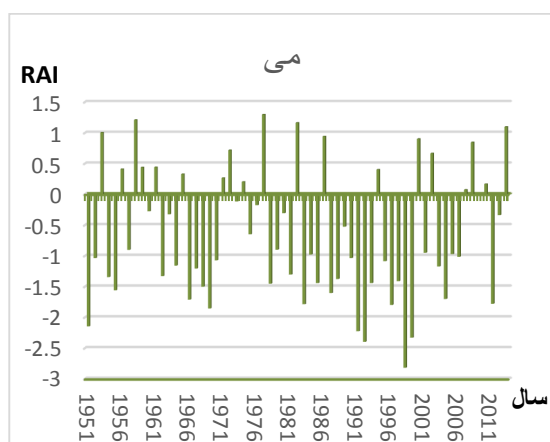
شکل ۱۶- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه آوریل



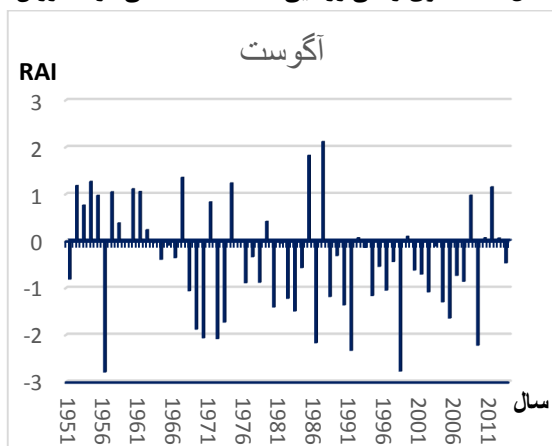
شکل ۱۵- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه مارس



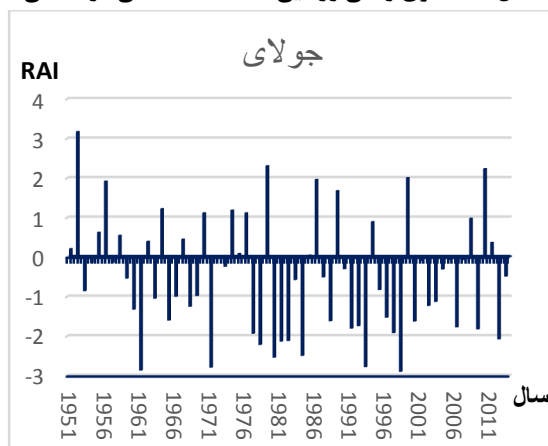
شکل ۱۸- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه ژوئن



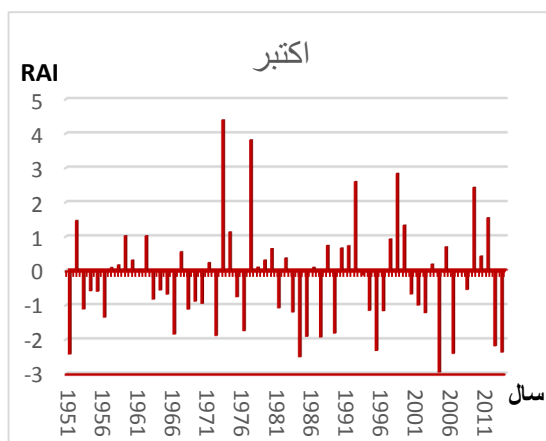
شکل ۱۷- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه می



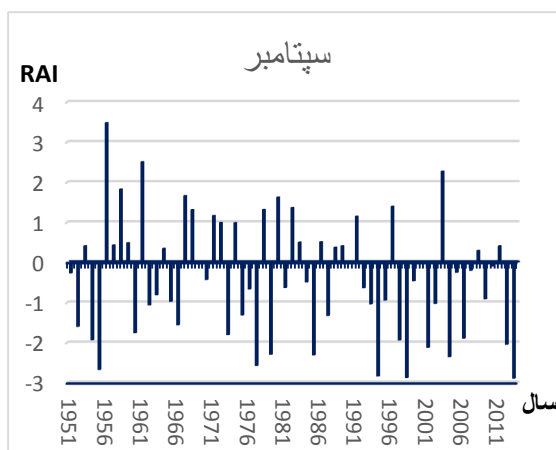
شکل ۲۰- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه آگوست



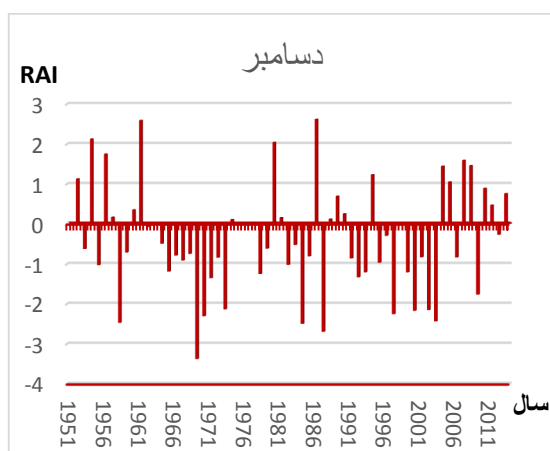
شکل ۱۹- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه جولای



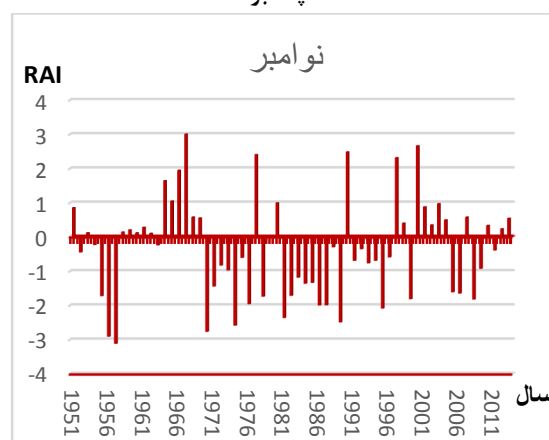
شکل ۲۲- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه اکتبر



شکل ۲۱- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه سپتامبر



شکل ۲۴- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه دسامبر

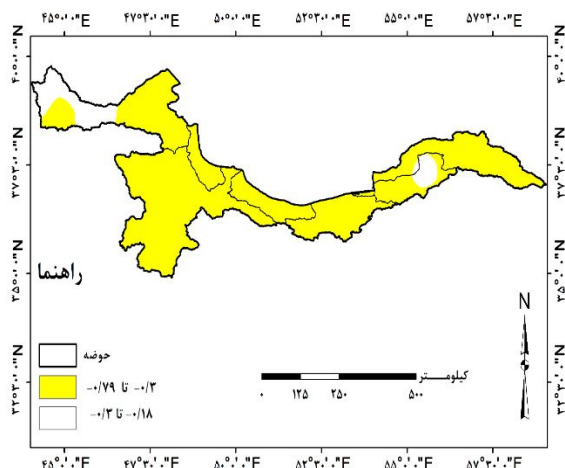


شکل ۲۳- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در ماه نوامبر

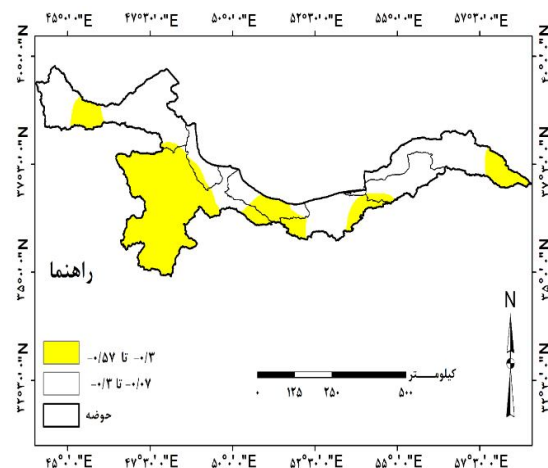
می‌شود. در فصل تابستان زیرحوضه‌های ارس و تالش-انزلی، اغلب زیرحوضه سفیدرود، شرق زیرحوضه‌های هراز-نکا و قره‌سو-گرگان و کل زیرحوضه اترک به جز قسمت‌های کمی در شرق و غرب آن خشکسالی‌های با شدت ضعیف را تجربه کرده‌اند. در فصل تابستان خشکسالی‌های ضعیف در بخش غربی حوضه مورد بررسی نمودی بارزتر داشته است. در فصل پاییز نیز خشکسالی با شدت ضعیف در بخش غربی زیرحوضه ارس، کل زیرحوضه سفیدرود به جز پهنه‌های شمال‌شرقی و شرقی آن، حاشیه جنوب‌غربی زیرحوضه تالش-انزلی، شرق زیرحوضه هراز-نکا، غرب و حاشیه شرقی زیرحوضه قره‌سو-گرگان و بخش مرکزی و نیمه شرقی زیرحوضه اترک مشاهده می‌شود (اشکال ۲۵ تا ۲۸).

الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی فصلی

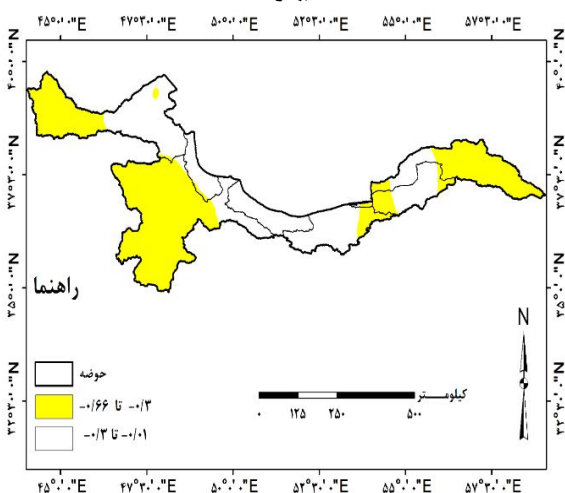
درحوضه خزر: در فصل زمستان خشکسالی با شدت ضعیف در پهنه‌های مرکزی و جنوبی زیرحوضه ارس، تقریباً کل زیرحوضه سفیدرود، جنوب‌غربی زیرحوضه تالش-انزلی، قسمت‌هایی از شمال، مرکز و جنوب زیرحوضه لاهیجان-نور، شرق و جنوب‌شرقی زیرحوضه هراز-نکا، جنوب غربی زیرحوضه قره‌سو-گرگان و شرق زیرحوضه اترک قابل رویت است. در فصل بهار نیز خشکسالی با شدت ضعیف در غالب حوضه به جز پهنه‌های مرکزی، شمال‌غربی و غربی زیرحوضه ارس و بخشی از شرق زیرحوضه قره‌سو-گرگان نمودی مشخص دارد. در این فصل خشکسالی‌ها هرچند با شدت ضعیف نسبت با دیگر فصول در حوضه خزر بخش‌های وسیع‌تری را شامل



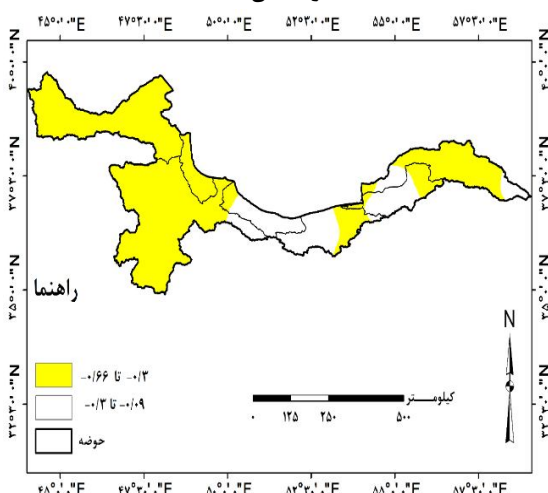
شکل ۲۶- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در فصل بهار



شکل ۲۵- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در فصل زمستان



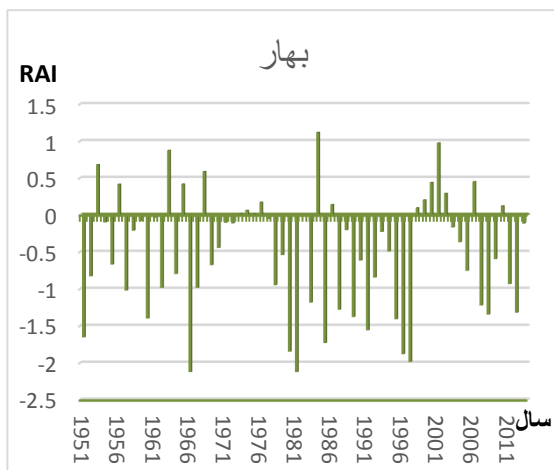
شکل ۲۸- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در فصل پاییز



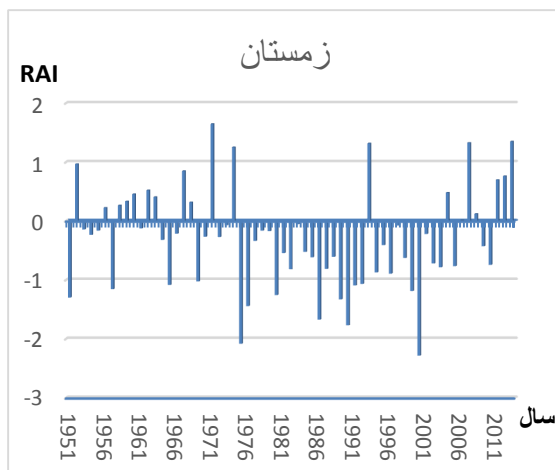
شکل ۲۷- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی در فصل تابستان

تابستان سال ۱۹۹۸ با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۸۵- نیز شدید بوده است. حوضه مزبور در فصل پاییز نیز در سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۸۷ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارش ۲/۱۲- و ۲/۲۱- با خشکسالی‌های شدید مواجه بوده است (اشکال ۲۹ تا ۳۲).

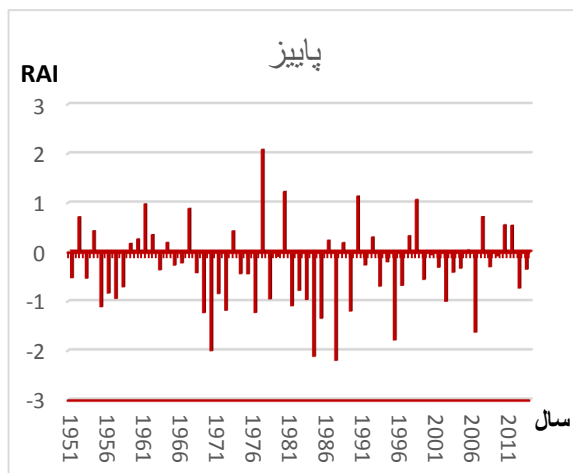
الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی فصلی در حوضه خزر: حوضه آبریز خزر در زمستان سال ۲۰۰۰ با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۲۸- با خشکسالی شدید مواجه بوده است. این حوضه در فصل بهار نیز در سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۸۱ به ترتیب با میزان شاخص ناهنجاری بارندگی ۲/۱۲- و ۲/۱۲- با خشکسالی شدید روبرو بوده است. شدت خشکسالی در



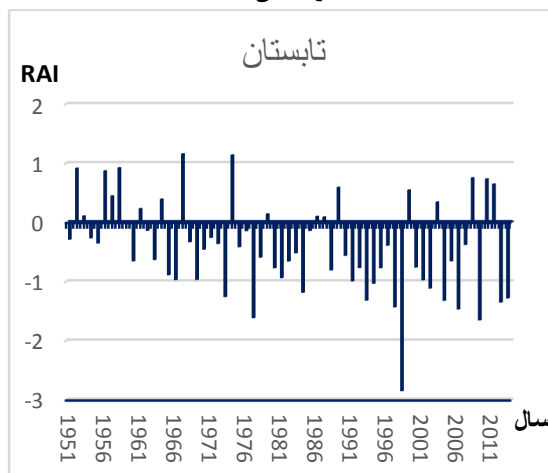
شکل ۳۰- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در فصل بهار



شکل ۲۹- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در فصل زمستان



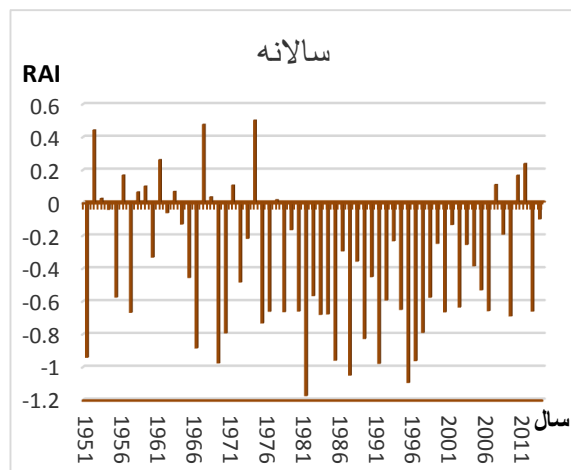
شکل ۳۲- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در فصل پاییز



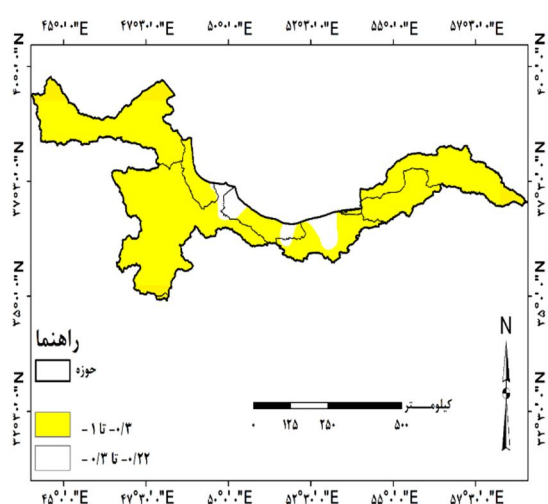
شکل ۳۱- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی در فصل تابستان

کرانه‌ای و پسرانه‌ای را با وضعیت نرمال در بر می‌گیرد نمودی آشکار داشته است (شکل ۳۳). ارزیابی شدت خشکسالی در مقیاس زمانی سالانه با شاخص ناهنجاری بارندگی نیز نشان از رخداد خشکسالی از نوع ضعیف در این قلمرو دارد (شکل ۳۴).

الگوی فضایی و زمانی وردایی شدت خشکسالی سالانه در حوضه خزر: در مقیاس زمانی سالانه در حوضه خزر خشکسالی با شدت ضعیف در تمام این قلمرو جغرافیایی به جز پهنه‌های محدودی در شمال شرق زیرحوضه سفیدرود، غرب و شرق زیرحوضه لاهیجان- نور، شمال و مرکز زیرحوضه هراز- نکا که بخش‌های



شکل ۳۴- الگوی زمانی وردایی شدت خشکسالی سالانه



شکل ۳۳- الگوی فضایی وردایی شدت خشکسالی سالانه

است. البته روند معنادار در هیچ یک از این فصول مشاهده نمی‌شود. واکاوی روند بارش حوضه خزر در سری‌های زمانی ماهانه نیز نشان دهنده روند نزولی و البته معنادار بارش در ماه مارس در این حوضه است. در دیگر ماه‌های سال بارش روند معناداری ندارد ولی تغییرات ناگهانی بارش عمدتاً در جهت کاهشی صورت گرفته است.

واکاوی روند زمانی بارش: بارش در سری زمانی سالانه حوضه خزر، روندی کاهشی تقریباً معنادار دارد. به بیان دیگر مقدار عددی تقریباً $1/96$ - نشان از کاهش بارش در این گستره جغرافیایی دارد. ارزیابی سری‌های زمانی فصلی در این حوضه نیز نشان می‌دهد که بارش در فصول سال نیز روندی کاهشی به استثنای پاییز داشته

جدول ۲- مقادیر آزمون ناپارامتری من-کندال

دوره	سری زمانی بارش	آماره من-کندال	روند
ماهانه	ژانویه	$+0/628695$	بدون روند معنادار
	فوریه	$+0/249106$	بدون روند معنادار
	مارس	$-2/50292$	روند کاهشی معنادار
	آوریل	$-1/58953$	بدون روند معنادار
	می	$-0/56938$	بدون روند معنادار
	ژوئن	$-1/11504$	بدون روند معنادار
	جولای	$+0/35587$	بدون روند معنادار
	آگوست	$-0/11862$	بدون روند معنادار
	سپتامبر	$-0/86594$	بدون روند معنادار
	اکتبر	$-0/0949$	بدون روند معنادار
	نوامبر	$+0/35587$	بدون روند معنادار
	دسامبر	$+1/008285$	بدون روند معنادار
فصلی	زمستان	$-1/18622$	بدون روند معنادار
	بهار	$-1/42346$	بدون روند معنادار
	تابستان	$-1/10318$	بدون روند معنادار
	پاییز	$+0/249106$	بدون روند معنادار
سالانه	سالانه	$-1/95726$	تقریباً روند کاهشی معنادار

نتیجه‌گیری

در این پژوهش وردش‌های مکانی-زمانی شدت خشکسالی در حوضه آبریز خزر با استفاده از شاخص ناهنجاری بارش (RAI) با کدنویسی در محیط نرم‌افزار Matlab مورد ارزیابی و الگوهای تغییرات فضایی و زمانی شدت خشکسالی در بازه‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه استخراج شد. با بررسی نقشه‌های الگوهای فضایی وردش‌های شدت خشکسالی مشخص شد که در ماه ژانویه در تمامی حوضه شرایط نرمال بر سطح حوضه با توجه به مقادیر شاخص ناهنجاری بارش حاکم بوده است. این در حالی است که شرایط خشکسالی با شدت ضعیف در ماههای فوریه (در سراسر حوضه خزر)، مارس (در بخش غربی این حوضه و شرق زیرحوضه اترک)، آوریل (در زیرحوضه‌های سفیدرود، تالش-انزلی، لاهیجان-نورو بخش شرقی اترک)، ژوئن (در غالب سطح حوضه آبریز خزر)، جولای (در نیمه غربی حوضه خزر)، آگوست (در نیمه غربی این حوضه)، سپتامبر (در یک سوم شرقی حوضه مطالعاتی، بخش‌های غربی و جنوبی زیرحوضه سفیدرود و حاشیه غربی زیرحوضه ارس)، اکتبر (در یک سوم شرقی حوضه، شمال، مرکز و جنوب زیرحوضه سفیدرود و پهنه غربی زیرحوضه ارس)، نوامبر (در یک سوم شرقی حوضه و غالب زیرحوضه سفیدرود) و دسامبر (در بخش غربی حوضه خزر و مرکز زیرحوضه اترک) مستولی بوده است. تنها در ماه می ناهمواری‌های جنوب‌شرقی زیرحوضه سفیدرود شرایط خشکسالی متوسط را تجربه کرده است؛ این در حالی است که بخش‌های دیگر این

حوضه آبی مهم با شرایط خشکسالی ضعیف مواجه بوده است. این نتیجه با پژوهش طهماسبی (۱۳۸۸) که از شاخص‌های SPI و RDI استفاده کرده‌اند و اغلب خشکسالی‌ها را در حاشیه دریای خزر از نوع ضعیف تشخیص داده است مطابقت دارد. در عین حال نتایج این پژوهش نشان داد که خشکسالی‌های با شدت ضعیف در بخش‌های غربی قلمرو مطالعاتی در مقایسه با پهنه شرقی آن نمودی ملموس‌تر داشته است. از نظر وردش‌های زمانی نیز خشکسالی‌های بسیار شدید در مارس ۲۰۰۰، آوریل ۱۹۶۶، ژوئن ۲۰۰۸، نوامبر ۱۹۵۷، دسامبر ۱۹۶۹ در این حوضه اتفاق افتاده است. تحلیل روند زمانی بارش با آزمون ناپارامتری من کندال در حوضه خزر نیز بیانگر این است فقط بارش ماه مارس روندی نزولی معنادار دارد. این در حالی است که در دیگر ماه‌های سال و بازه زمانی فصلی نیز بدون روند معنادار بوده است. در خصوص بارش سالانه نیز این نهاد مهم اقلیمی از تقریباً روندی کاهشی معنادار برخوردار است. در عین حال به نظر می‌رسد که روند زمانی بارش در این حوضه آبریز در مقیاس‌های زمانی مختلف رفتار کاهشی را نشان می‌دهد. در مجموع، به نظر می‌رسد در صورت تداوم کاهش بارش و به دنبال آن رخداد خشکسالی‌های متعدد به عنوان پیامد حاصل از آن تنش‌های آبی در حوضه آغاز شود که این مهم می‌تواند از نظر زیست محیطی عوارض ناخوشایندی را در این پهنه مهم که به مهمترین حوضه آبی کشور مطرح است به دنبال داشته باشد.

منابع

۱. آسیایی، مهدی. (۱۳۸۵). شاخص‌های خشکسالی، انتشارات سخن‌گستر مشهد، چاپ اول. ۱۷۶ صفحه.
۲. افشین، یداله. (۱۳۷۴). رودهای ایران، جلد ۲، وزارت نیرو-مهندسين مشاور جاماب، ۱۱۸۷ صفحه.
۳. بری ابرقویی، حسین،، بذاق جمالی، جواد،، توکلی زاده، محمود. (۱۳۸۲). کاربرد برخی از شاخص‌های آماری هواشناسی جهت ارزیابی شدت خشکسالی در مقیاس
- کشوری (بین استان‌ها). مجله‌ی تحقیقات جغرافیایی. شماره ۶۹، ص ۱۰۶-۸۶.
۴. بذرافشان، جواد. (۱۳۸۱). مطالعه بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه تهران.
۵. پیرمادیان، نادر، شمس‌نیا، سیدامیر، بوستانی، فردین، شاهرخ‌نیا، محمدعلی. (۱۳۸۷). ارزیابی دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش

۱۵. فرج‌زاده، منوچهر، قائمی، هوشنگ و موحد دانش، علی اصغر (۱۳۸۳). خشکسالی در ایران، با استفاده از برخی شاخص‌های آماری، مجله دانش کشاورزی جلد ۵، شماره ۱ و ۲، ص ۵۰-۳۱.
۱۶. کردوانی، پرویز (۱۳۸۰). خشکسالی و راه‌های مقابله با آن در ایران، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۳۹۲ صفحه.
۱۷. سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح (۱۳۸۲). فرهنگ جغرافیایی رودهای کشور، حوضه آبریز دریای خزر. جلد دوم.
۱۸. مساعدی، ابوالفضل، خلیلی‌زاده، مجتبی و محمدی، کلایه امین (۱۳۸۷). پایش خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان، نشریه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گرگان، دوره ۱۵ شماره ۲، ص ۱۸۲-۱۷۶.
۱۹. مقدسی، مهرنوش، پایمرد، شهلا، مرید، سعید. (۱۳۸۴). پایش مکانی خشکسالی سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۰-۱۳۷۹ استان تهران. فصلنامه مدرس علوم انسانی. دوره ۹ شماره ۱. ص ۲۱۷-۱۹۷.
۲۰. وخشوری، علی، جعفرپور، زین‌العابدین و کردوانی، پرویز، (۱۳۹۶). مقایسه شاخص‌های خشکسالی اقلیمی در ایستگاه‌های بارشی ایران، جغرافیای طبیعی، شماره ۳۶، ص ۱۰۸-۸۹.
21. Bacanlı, U., Firat, M., and Dikbas, F. (2009). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for drought forecasting, Stoch Environ Res Risk Assess, 23:1143-1154
22. Benjamin, L.H., and Saunders, A. (2002). A drought climatology for Europe, Int. J. climatol. 22: 1571-1592.
23. Buttafuoco, G., Caloiero, T., Ricca, N., and Guagliardi, I. (2018). Assessment of drought and its uncertainly in a southern Italy area (Calabria region), Measurment, 113: 205-210.
24. Dalezios, N.R., Loukas, A., Vasilides, L., and Liakopoulos, E. (2000). Severity duration frequency analysis of droughts and wet periods in Greece, Hydrology Seie, 45(5): 751-768.
25. Henriques, A.G., and Santos, M.J. (1998). Regional drought distribution Model. Phys, Chem, Earth, 24(1-2):19-22.
- (SPI) در استان فارس، دانش نوین کشاورزی، شماره ۱۳، ص ۲۱-۷.
۶. جوانمرد، سهیلا، آسیایی، مهدی. (۱۳۸۳). پیش‌بینی احتمالات وقوع خشکسالی در استان خراسان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۸، شماره ۳، ص ۱۲۸-۱۱۹.
۷. جوی‌زاده، سعید (۱۳۸۴). پایش خشکسالی در استان فارس، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته جغرافیا گرایش اقلیم‌شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران.
۸. جوی‌زاده، سعید و حجازی‌زاده، زهرا (۱۳۹۰). کتاب مقدمه‌ای بر خشکسالی و شاخص‌های آن، سازمان چاپ و انتشارات وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی. انتشارات سمت. تهران، چاپ اول، ۳۷۶ صفحه.
۹. خلیلی، علی و بذرافشان، جواد. (۱۳۸۷). ارزیابی مخاطره تداوم خشکسالی با استفاده از داده‌های بارندگی سالانه قرن گذشته در ایستگاه‌های قدیمی ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۲، شماره ۲، ص ۲۳-۱۳.
۱۰. رضیئی، طیب، شکوهی، علیرضا و ثقفیان، بهرام (۱۳۸۲). پیش‌بینی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از روش‌های احتمالاتی و سری‌های زمانی (مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان). مجله بیابان، دوره ۸، شماره ۲، ص ۳۱۰-۲۹۲.
۱۱. رضیئی، طیب (۱۳۸۲). پایش پدیده خشکسالی در ایران مرکزی با استفاده از SPI، سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، دانشگاه اصفهان.
۱۲. سعیدی دهکی، ناهید، برنا، رضا و عظیمی، فریده. (۱۳۸۹). مقایسه شاخص‌های SIAP، PN و RAI در بررسی خشکسالی‌های استان خوزستان با تأکید بر ایستگاه‌های آبادان و دزفول، مجله جغرافیای طبیعی. دوره ۳، شماره ۹، ص ۷۷-۸۸.
۱۳. علیزاده، امین، انصاری، حسین و ارشادی، سارا. (۱۳۸۷). پایش و پیش‌بینی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره ۱۱، ص ۱۷-۷.
۱۴. عطایی‌زاده، هوشمند، میرحسینی، سیدعباس و اسدی، سعید (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خشکسالی استان کرمان با استفاده از شاخص شدت خشکسالی پالمر در محیط GIS، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، اصفهان.

- Middle East Applied Science and Technology (JMEAST), 12(2), 323-327.
29. Mishra, A.K., and Desai, V.R. (2005). Drought forecasting using stochastic models, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19(5), 326-339.
 30. Vivekanandan, N. (2007). Analysis of trend in rainfall using non parametric statistical methods. International Symposium on Rainfall rate and radio wave Propagation. American Institute of Physics, P: 101-113.
 31. Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water International, 10(3), 111-120.
 26. Liang, L., Shu-he, Z., Zhi-hao, Q., Ke-xun, H., Chong, C., Xing-dong, Z., and Yun-xiao, L., (2014). Drought change trend using MODIS TVDI and Its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010. J. Inte. Agric. 13(7), 1501-1508.
 27. Loukas, A., Vasiliades, L., and Dalezios, N.R. (2003). Inter comparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece, 8 International Conference on Environmental Science and Technology Lemons Island, Greece, 8-10 September.
 28. Milasi, E., Halabian, A.H., and Habibi, A. (2014). Drought monitoring and zoning in western Azerbaijan province using standardized index SPI, Journal of

