

ارزیابی روابط کمی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از رژیم نرمال ماهانه (مطالعه موردی: حوضه صوفی‌چای)

سهیلا زارعی^{۱*}، احمد فاخری‌فرد^۲ و اسماعیل اسدی^۳

چکیده

هدف در پژوهش حاضر، تعیین شاخص آماری تلفیقی بر مبنای خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای است. داده‌های بارش با استفاده از روش چند ضلعی تیسن به بارش‌های ناحیه‌ای تبدیل شد. با استفاده از رژیم نرمال، مقدار دوره‌های خشک هم برای جریان و هم برای بارش استخراج و تبدیل به مقدار کمبود حجم شدند. تحلیل فراوانی دوره‌های کمبود با استفاده از روش‌های توزیع آماری، انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که توزیع نرمال، با کمترین مقدار مجذور مربعات خطا برای کمبود دوره‌های خشکی بارش برای تداوم‌های یک تا نه ماهه به ترتیب (۱/۰۷۴، ۱/۹۵۰، ۲/۰۴۳، ۱/۹۱۷، ۱/۹۲۴، ۱/۹۸۱، ۲/۶۴۱، ۳/۵۱۵، ۵/۴۸۹) و توزیع پیرسون تیپ ۳ برای کمبود حجم‌های جریان (۱/۱۷۹، ۲، ۲/۶۶۳، ۳/۱۰۱، ۳/۵۰۸، ۳/۸۱۲، ۴/۳۲۱، ۴/۸۲۸، ۵/۰۲۹) بهترین توزیع بودند. با استفاده از توزیع‌های آماری حاصله، منحنی‌های کمبود حجم-مدت-فراوانی استخراج و برای هر یک از آن‌ها معادلات ریاضی مناسب بر اساس ضریب همبستگی و کمترین مقدار خطا استخراج گردید. سپس در انتها ارتباط بین هر دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به صورت مستقل از زمان و مبتنی بر دوره بازگشت در قالب یک شاخص آماری نمایی تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل فراوانی، حوضه صوفی‌چای، خشکسالی، شاخص آماری تلفیقی.

ارجاع: زارعی س.، فاخری‌فرد ا.، اسدی ا. ۱۳۹۵. ارزیابی روابط کمی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از رژیم نرمال ماهانه (مطالعه موردی: حوضه صوفی‌چای). مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۸۵-۹۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: Soheila_Zareie@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۰۷

مقدمه

خشکسالی را می‌توان معلول یک دوره شرایط خشک غیرعادی دانست که به اندازه‌ی کافی دوام داشته باشد تا بی‌تعدالی در وضعیت هیدرولوژی یک ناحیه ایجاد شود. در دهه‌های اخیر در بین حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، تعداد فراوانی پدیده‌ی خشکسالی از نظر درجه شدت، طول مدت، مجموع فضای تحت پوشش، تلفات جانی، خسارات اقتصادی و آثار اجتماعی دراز مدت در جامعه، بیشتر از سایر بلایای طبیعی بوده است.

تحلیل فراوانی خشکسالی و تخمین مقدار کمبود حجم خشکسالی‌ها (شدت خشکسالی) برای یک مدت مشخص و در یک دوره بازگشت معین، از جمله مطالعات مهم در مسایل مربوط به خشکسالی است؛ زیرا سه خصوصیت مهم خشکسالی یعنی مدت، شدت و فراوانی وقوع آن را برای بررسی ریسک خشکسالی تجزیه و تحلیل می‌کند. همچنین این تکنیک تحلیل آماری سری داده‌هایی است که یک توزیع مناسب احتمالاتی بر آن برازش داده شده است؛ برای مثال توزیع احتمالاتی برازش داده شده خلاصه‌ای از اطلاعات در مورد داده‌ها را می‌دهد و اجازه پیش‌بینی رخداد را فراهم می‌کند (خالق و همکاران، ۲۰۰۶)؛ لذا مطالعه خشکسالی مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است؛ از جمله مظفری (۱۳۸۵) وجود یا عدم وجود روند خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی را با استفاده از "تحلیل همبستگی" در سطح دو حوضه‌ی آبریز "اسلامیه" و "فخرآباد" واقع در دامنه شمالی شیر کوه یزد بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد در ایستگاه اسلامی با $R=0/14$ رابطه معناداری بین مقدار بارش و دبی وجود ندارد؛ ولی رابطه معنادار بین مقدار بارش و دبی در ایستگاه فخرآباد با $R=0/43$ وجود دارد و با افزایش میزان بارش دبی نیز افزایش یافته است. شفیعی و همکاران (۱۳۹۰) شدت خشکسالی را بر اساس شاخص پالمیر شبیه‌سازی کردند. با بررسی طول مدت قابل پیش‌بینی با مدل، مشخص شد مدل انتخاب شده در منطقه مورد نظر تنها تا دو ماه آینده را می‌تواند با دقت مناسب پیش‌بینی کند. موهان و رنگاراجاریا (۱۹۹۱) روشی را برای شناختن پارامترهای شروع، خاتمه و شدت خشکسالی از داده‌های تاریخی موجود از جریانات و بارش‌ها با الگوی فصلی پیشنهاد کردند. اوزگر و همکاران

(۲۰۰۹) رابطه بین شاخص‌های آب و هوایی با فرکانس پایین و خشکسالی در ایالت تگزاس را مطالعه کردند. کیم و همکاران (۲۰۰۹) شاخص‌های EDI^1 و SPI^2 را برای دوره‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای بررسی خشکسالی طی دوره ۲۰۰ ساله از ۱۸۰۷ تا ۲۰۰۶ برای شناسایی خشکسالی در سئول پایتخت کره جنوبی و انتخاب یک شاخص خشکسالی مناسب به کار بردند. نتایج حاکی از آن بود که شاخص EDI نسبت به SPI برای هر دو نوع خشکسالی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت بهتر بوده است. یحیووی و همکاران (۲۰۰۹) رژیم خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را در حوضه آود مینا در غرب الجزایر با روش سطح آستانه استخراج و سپس تحلیل فراوانی کردند و نشان دادند توزیع احتمالاتی پارتوی تعمیم یافته^۳ برای توزیع بزرگی رخدادهای خشکسالی برای بسیاری از جریانات بهترین مدل است. کانسالیره و سالاس (۲۰۱۰) درباره‌ی به دست آوردن توزیع احتمالاتی خشکی‌ها با در نظر گرفتن هر دو مورد مدت خشکسالی و کمبود تجمعی و نیز دوره بازگشت، وقتی که متغیرهای هیدرولوژیکی خودهمبسته هستند، کار کردند. آن‌ها خشکسالی را با توزیع کرانه‌ای بررسی نمودند و برای طول خشکسالی مدل $DARMA^4$ میانگین متحرک خودهمبسته مجزا پیشنهاد شد. کوان و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص $SWSI^5$ در جنوب کره جنوبی پرداختند. نتایج نشان دادند که $SWSI$ ماهانه برای تقسیم‌بندی ۱۱۲ حوضه نسبت به ۳۲ حوضه منطقی‌تر است الینور و سیمون (۲۰۱۰) ابزارهایی را برای ارزیابی وقایع خشکسالی منطقه‌ای بر اساس دوره‌های محدود ثبت داده بررسی کردند. برای مشخص کردن دوره‌ی بازگشت یک رخداد خشکسالی با شدت مشخص و مساحت منطقه، از منحنی‌های شدت-مساحت-فرکانس (SAF) و مساحت-احتمال ($Area-P$) استفاده کردند. نیکبخت شهبازی و همکاران (۲۰۱۲) خشکسالی هواشناسی را در حوضه‌ی کارون با استفاده از متغیرهای هواشناسی پیش‌بینی کردند. کوک و همکاران (۲۰۱۲) شدت-مدت-فراوانی (SDF) خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را در بالادست رودخانه نامهان کره تحلیل کردند و به این نتیجه

1- Effective Drought Index (EDI)

2- Standardized Precipitation Index (SPI)

3- Generalized Pareto (GP)

4- Discrete Autoregressive Moving Average (DAMA)

5- Surface Water Supply Index (SWSI)

خروجی حوضه به عنوان عکس العمل حوضه به بارش‌های ناحیه‌ای در نظر گرفته شد.

استخراج خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی

با روش رژیم نرمال ماهانه

دوره‌های خشکی در سری‌های بی‌هنجاری^۱ با استفاده از روش رژیم نرمال ماهانه استخراج می‌شود. سری نرمال ماهانه نشان‌دهنده میانگین دراز مدت هر ماه از سال است که رژیم نرمال ماهانه را برای یک سال نرمال ارائه می‌دهد. سری بی‌هنجاری بارش‌های ماهانه و جریان‌های ماهانه از طریق تفاضل مقدار داده‌های بارش و جریان از سری نرمال ماهانه مربوطه ایجاد شد. در واقع سری نرمال ماهانه به عنوان خط مبنا در نظر گرفته می‌شود و هر یک دوره‌های تر و مقادیر زیر خط مبنا، نشان‌دهنده دوره‌های خشکی است که به صورت ارقام منفی ظاهر می‌شود. به این ترتیب مقادیر کمی خشکی در هر دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک به همراه زمان وقوع آن‌ها استخراج می‌شود. مزیت این روش، این است که تداخل دوره‌های خشکی ذاتی فصول خشک و همین‌طور دوره‌های تر فصول تر در هم انجام نمی‌شود تا خط مبنا یی‌غیرواقعی صورت گیرد و نیز سری بی‌هنجاری ایجاد شده دقت زیادی دارد و اضافه بارش یا کمبود را واقعی‌تر نشان می‌دهد (زارعی و فاخری‌فرد، ۱۳۹۳). سری بی‌هنجاری، به صورت معادله (۱)، ایجاد می‌شود.

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \rightarrow \Delta R_i = R_i - \bar{R} \quad (1)$$

نتایج و بحث

منحنی‌های کمبود حجم - مدت - فراوانی خشکسالی

برای استخراج منحنی کمبود حجم - مدت - فراوانی، ابتدا باید توزیع مناسب برازش داده شده بر مقادیر کمبود حجم تشخیص داده شود؛ بنابراین ابتدا شدت‌های خشکی به دست آمده از روش رژیم نرمال ماهانه که به صورت کمبود حجم بیان می‌شوند، به صورت شدت‌های خشکی یک ماهه، دو ماهه، ... و دوازده ماهه را با حرکت^۲ یک ماهه به دست می‌آورند، سپس مقادیر بیشینه شدت هر یک از مهارهای خشکی یک ماهه را جدا می‌کند و در ستونی

رسیدند که با استخراج منحنی‌های SDF، محاسبه مقدار احتمالاتی خشکسالی ممکن است.

علاوه بر مشکل کمبود بارش، توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش که خشکسالی را نیز می‌توان جزئی از توزیع زمانی نامناسب بارش دانست، بر مشکلات مدیریتی منابع آب کشور می‌افزاید؛ بنابراین ضرورت مطالعه خشکسالی از جنبه‌های مختلف در کشور احساس می‌شود و بر این اساس، تاکنون خشکسالی از جنبه‌های هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی بررسی شده است؛ اما به نظر می‌رسد از نظر شدت مدت فراوانی دو جنبه‌ی متفاوت خشکسالی، یعنی هواشناسی و هیدرولوژیکی در ارتباط با هم تحقیق خاصی صورت نگرفته است. لذا تعیین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از روش رژیم نرمال ماهانه و تعیین رابطه کمی بین آن دو و مدل‌بندی آن‌ها از جمله اهداف مورد بررسی در این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوضه‌ی صوفی‌چای با مساحت ۲۶۵ کیلومتر مربع واقع در استان آذربایجان شرقی است که از شمال به حوضه آبریز لیقوان چای و کند چای، از شرق به حوضه آبریز مردوق، از غرب به حوضه آبریز قلعه عجب‌شیر و دریاچه ارومیه و از جنوب به محدوده سد علویان و دشت ملک کندی منتهی می‌شود. حوضه‌ی مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه و ۴۲ ثانیه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۲۶ دقیقه و ۴۲ ثانیه طول شرقی قرار گرفته است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۴۶۰ و ۱۵۵۰ متر از سطح دریا است. در حوضه‌ی صوفی‌چای هفت ایستگاه بارانسنجی و پنج ایستگاه هیدرومتری وجود دارد که این ایستگاه‌ها و شکل هندسی حوضه را می‌توان در مطالعه زارعی و فاخری‌فرد (۱۳۹۳) مشاهده کرد. سپس به منظور تکمیل خلاءهای آماری (هم برای بارش و هم برای جریان) از روش منحنی جرم مضاعف استفاده شد. با استفاده از روش چند ضلعی تیسن بارش‌های نقطه‌ای در سطح حوضه به بارش‌های ناحیه‌ای تبدیل شدند. برای آمار دبی‌های جریان نیز ایستگاه هیدرومتری تازه کند در

1- Anomaly
2- Moving

توزیع نرمال برای کمبودهای بارش و توزیع پیرسون تیپ ۳ برای کمبودهای جریان بهترین برازش را دارند. مقادیر RMSE در جدول ۱ نشان داده شده است. RMSE از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{e,i})^2}{n}} \quad (2)$$

$x_{o,i}$ داده‌های مشاهداتی، $x_{e,i}$ داده‌های برآورد شده، n تعداد داده‌ها است.

جدید قرار می‌دهند و همین‌طور مقادیر بیشینه شدت هریک از مهارهای خشکی دو ماهه، سه ماهه، ... و دوازده ماهه به دست می‌آید که در اینجا تا تداوم نه ماهه ارائه شده است؛ زیرا تعداد شدت‌های خشکی ده، یازده و دوازده ماهه کم بوده است (کمتر از پنج داده) و نمی‌توان به خوبی توزیع آماری بر آن‌ها برازش داد. پس از مرتب کردن داده‌ها به صورت صعودی با استفاده از نرم‌افزار Smada توزیع‌های مختلف بر داده‌های شدت برازش داده، سپس توزیعی که کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) را داشت، به عنوان توزیع مناسب انتخاب شد.

جدول ۱- مقادیر RMSE برای شدت خشکی در تداوم‌های مختلف

تداوم (ماه)	یک ماهه	دو ماهه	سه ماهه	چهار ماهه	پنج ماهه	شش ماهه	هفت ماهه	هشت ماهه	نه ماهه
شدت خشکی‌های بارش (توزیع نرمال)	۱/۰۷۴	۱/۹۵۰	۲/۰۴۳	۱/۹۱۷	۱/۹۲۴	۱/۹۸۱	۲/۶۴۱	۳/۵۱۵	۵/۴۸۹
شدت خشکی‌های جریان (توزیع پیرسون تیپ ۳)	۱/۱۷۹	۲	۲/۶۶۳	۳/۱۰۱	۳/۵۰۸	۳/۸۱۲	۴/۳۲۱	۴/۸۲۸	۵/۰۲۹

شاخصی که ارتباط بین دو خشکسالی را بیان کند ابتدا به طور جداگانه رابطه‌ای به صورت آماری برای هر کدام از خشکسالی‌ها به دست آمد، سپس با حذف پارامتر زمان از این روابط، شاخص جدیدی حاصل شد که ارتباط بین مقادیر کمبود حجم را به دست آورد. مدل‌های آماری مناسب بر هر کدام از ستون‌های مربوط به یک دوره‌ی بازگشت مشخص، بر اساس بیشترین مقدار ضریب همبستگی و کمترین خطا (SSE)، استخراج و در جدول ۴ ارائه شد.

بنابراین طبق جدول ۵ مدل به دست آمده به صورت تابع نمایی برای هر دو خشکسالی به صورت معادلات (۳) و (۴) است.

$$Ra = a_{Tr} * t^{b_{Tr}} \quad (3)$$

$$d_{Ru} = a_{Tr} * t^{b_{Tr}} \quad (4)$$

d_{Ra} کمبود حجم بارش (میلیون مترمکعب)، d_{Ru} کمبود حجم جریان (میلیون مترمکعب)، Tr فراوانی (سال) و t تداوم خشکسالی (ماه)، a_{Tr} و b_{Tr} ضرایب ثابت بر حسب دوره بازگشت.

ضرایب a و b وابسته به دوره‌ی بازگشت Tr هستند که در جدول‌های ۵ و ۶ این وابستگی نشان داده شده است. همان‌گونه که از این جداول نمایان است، این روابط ضریب

مقادیر کمبود حجم خشکسالی‌های بارش و جریان برای دوره بازگشت‌های مختلف (۲، ۳، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله) که با توجه به روند بودن و فواصل وقوع دور و نزدیک انتخاب شده‌اند، با توزیع‌های نرمال و پیرسون تیپ ۳ به دست آمد که این مقادیر در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. هر کدام از ستون‌های این جداول معرف یک منحنی با دوره بازگشت ثابت است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دوره بازگشت و تداوم خشکسالی‌ها، شدت این خشکسالی‌ها نیز بیشتر شده است. بررسی‌های صورت گرفته در ارتباط با وجود رابطه مستقیم بین مقدار خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به صورت وابسته به زمان، نشان داد ضریب همبستگی پایینی ($R=0.02$) بین این دو سری از مقدار خشکسالی به دلیل عوامل مختلف، از جمله این که بارش به صورت کامل به جریان تبدیل نمی‌شود و مقداری از آن صرف عواملی دیگری مانند تبخیر، نگهداشت، نفوذ و ... می‌گردد، وجود دارد و مقدار جریان حاصل از بارش در حوضه به سایر پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی حوضه بستگی دارد. اگر عامل زمان حذف شود و فقط خشکسالی‌ها بر اساس احتمال وقوع شان یا در دوره‌ی بازگشت‌های مختلف مدل سازی شوند، می‌توان مقادیر کمی و عددی هر خشکسالی را بر اساس مقدار خشکسالی دیگر و احتمال وقوعش به دست آورد؛ بنابراین برای ایجاد

همبستگی بالایی دارند و می‌توانند ارتباط بین هر کدام از کمبودهای بارش و جریان را با دوره تداوم و دوره بازگشت مشخص به خوبی نشان دهند. پس از قرار دادن این ضرایب در روابط (۳) و (۴)، معادله کلی کمبود حجم - مدت - فراوانی برای کمبودهای بارش و جریان به صورت روابط (۵) و (۶) برای حوزه حاصل شد.

$$d_{Ra} = (4.0 * Tr^{0.222}) * t^{(1.04 * Tr^{-0.0643})} \quad (5)$$

$$d_{Ru} = (3.0 * T_r^{0.487}) * t^{(1.1 * T_r^{-0.144})} \quad (6)$$

جدول ۲- مقادیر کمبود حجم - تداوم - فراوانی بارش (بر حسب میلیون متر مکعب) با توزیع نرمال

تداوم خشکی	دوره بازگشت (سال)						
	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۳
یک ماهه	۱۰/۹۵	۱۰/۲۷	۹/۵۱	۸/۶۷	۷/۳۸	۶/۱۶	۵/۰۳
دو ماهه	۲۰/۸	۱۹/۴۸	۱۸/۰۴	۱۶/۴۴	۱۳/۹۶	۱۱/۶۳	۹/۴۷
سه ماهه	۲۶/۳۷	۲۶/۸۳	۲۵/۱۴	۲۳/۲۶	۲۰/۳۵	۱۷/۶۲	۱۵/۰۸
چهار ماهه	۳۴/۳۲	۳۲/۵۹	۳۰/۷۱	۲۸/۶۱	۲۵/۳۶	۲۲/۳۲	۱۹/۴۸
پنج ماهه	۳۷/۳۷	۳۵/۸	۳۴/۱	۳۲/۲	۲۹/۲۶	۲۶/۵	۲۳/۹۳
شش ماهه	۴۰/۴۷	۳۸/۹۱	۳۷/۲۲	۳۵/۳۳	۳۲/۴۲	۲۹/۶۸	۲۷/۱۳
هفت ماهه	۴۷/۸۴	۴۵/۹۲	۴۳/۸۱	۴۱/۴۸	۳۷/۸۶	۳۴/۴۶	۳۱/۲۹
هشت ماهه	۵۷/۲۲	۵۴/۷۷	۵۲/۰۸	۴۹/۱	۴۴/۴۸	۴۰/۱۴	۳۶/۱۱
نه ماهه	۶۹/۸۷	۶۶/۸۲	۶۳/۵	۵۹/۸	۵۴/۰۸	۴۸/۷۱	۴۳/۷

جدول ۳- مقادیر کمبود حجم - تداوم - فراوانی هیدرولوژیکی (بر حسب میلیون مترمکعب) با توزیع پیرسون ۳

تداوم خشکی	دوره بازگشت (سال)						
	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۳
یک ماهه	۲۷/۱۶	۲۳/۵۲	۱۹/۹۱	۱۶/۳۱	۱۱/۵۷	۷/۹۶	۵/۲۴
دو ماهه	۴۷/۷۹	۴۱/۲۸	۳۴/۸۳	۲۸/۴۴	۲۰/۰۶	۱۳/۷۲	۸/۹۹
سه ماهه	۶۳/۳۵	۵۵/۴۹	۴۷/۶۴	۳۹/۷۵	۲۹/۱۸	۲۰/۹۴	۱۴/۶
چهار ماهه	۷۴/۰۱	۶۶/۹۱	۵۸/۶۷	۵۰/۲۴	۳۸/۶۴	۲۹/۲۵	۲۱/۷۲
پنج ماهه	۸۳/۰۶	۷۴/۱۱	۶۵/۰۳	۵۵/۷۶	۴۳/۰۳	۳۲/۷۷	۲۴/۵۷
شش ماهه	۸۶/۶۱	۷۸/۹۷	۷۱/۰۶	۶۲/۷۹	۵۱/۰۱	۴۱/۰۶	۳۲/۷
هفت ماهه	۹۸/۰۴	۸۷/۶۴	۷۷/۱۱	۶۶/۳۶	۵۱/۶۴	۳۹/۸	۳۰/۳۷
هشت ماهه	۹۷/۳۵	۸۸/۲۲	۷۸/۸۶	۶۹/۱۸	۵۵/۶۷	۴۴/۵۲	۳۵/۳۸
نه ماهه	۹۴/۵	۸۷/۸۶	۸۰/۸۵	۷۳/۳۶	۶۲/۳۸	۵۲/۷۳	۴۴/۳

جدول ۴- معادلات کمبود حجم - تداوم - فراوانی حاصل از تحلیل فراوانی خشکسالی

دوره بازگشت	خشکسالی هواشناسی		خشکسالی هیدرولوژیکی	
	رابطه نمایی	آماره‌های ارزیابی	رابطه نمایی	آماره‌های ارزیابی
Tr= 2	$d_{Ra} = 3.8 * t^{1.0458}$	SSE=0.836 and R ² =0.995	$d_{Ru} = 2.75 * t^{1.13853}$	SSE=2.358 and R ² =0.958
Tr= 3	$d_{Ra} = 5.0 * t^{1.0}$	SSE=1.135 and R ² =0.993	$d_{Ru} = 5.1 * t^{0.98}$	SSE=2.378 and R ² =0.976
Tr= 5	$d_{Ra} = 6.2 * t^{0.9}$	SSE=1.580 and R ² =0.987	$d_{Ru} = 8.0 * t^{0.86}$	SSE=2.292 and R ² =0.983
Tr= 10	$d_{Ra} = 7.5 * t^{0.86}$	SSE=2.112 and R ² =0.979	$d_{Ru} = 12.2 * t^{0.76}$	SSE=2.319 and R ² =0.984
Tr= 25	$d_{Ra} = 8.9 * t^{0.82}$	SSE=2.704 and R ² =0.971	$d_{Ru} = 17.8 * t^{0.68}$	SSE=2.939 and R ² =0.978
Tr= 50	$d_{Ra} = 9.9 * t^{0.80}$	SSE=3.094 and R ² =0.966	$d_{Ru} = 22.1 * t^{0.63}$	SSE=3.800 and R ² =0.969
Tr= 100	$d_{Ra} = 10.7 * t^{0.78}$	SSE=3.443 and R ² =0.961	$d_{Ru} = 26.6 * t^{0.60}$	SSE=4.880 and R ² =0.958
Tr= 200	$d_{Ra} = 11.4 * t^{0.77}$	SSE=3.765 and R ² =0.957	$d_{Ru} = 31.1 * t^{0.564}$	SSE=6.104 and R ² =0.946

$$d_{Ru} = 3 * (T_r^{0.487}) * e^{(\frac{1.1}{1.04 * T_r^{0.08075}}) * (\frac{d_{Ra}}{4 * T_r^{0.222}})} \quad (7)$$

سمیعی و همکاران (۱۳۸۵) در تحلیل منطقه‌ای خشکسالی، رابطه‌ی رگرسیونی لگاریتمی را برای شدت خشکسالی‌ها بر مبنای مساحت حوضه مورد مطالعه خود در استان تهران به دست آوردند.

برای بررسی نتیجه به دست آمده، از آماره ضریب همبستگی بین داده‌های کمبود بارش موجود و مقادیر کمبود حجم جریان به دست آمده از معادله (۷) برای هر دوره بازگشت استفاده و نتایج در جدول ۷ نشان داده شد. همان طور که مشاهده می‌شود ضرایب همبستگی بالایی به دست آمده است که مطلوب بودن نتیجه و رابطه به دست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ضرایب معادله کلی

$$a_{Tr} = 4.0 * Tr^{0.222} \quad SSE=4.825 \text{ and } R^2=0.928$$

$$b_{Tr} = 1.04 * Tr^{-0.0643} \quad SSE=0.008 \text{ and } R^2=0.884$$

جدول ۶- ضرایب معادله کلی

$$a_{Tr} = 3.0 * Tr^{0.487} \quad SSE=7.5104 \text{ and } R^2=0.913$$

$$b_{Tr} = 1.1 * Tr^{-0.144} \quad SSE=0.020 \text{ and } R^2=0.921$$

برای به دست آوردن معادله کلی بین دو نوع خشکسالی و حذف پارامتر زمان، رابطه (۵) به صورت زمان وابسته به دوره بازگشت و کمبود حجم بارش به دست آمده و در معادله (۶) جایگذاری شد. مدل آماری کلی به صورت نمایی مطابق معادله (۷) به دست آمد که در آن، پارامتر زمان حذف شده و تنها به دوره بازگشت وابسته است.

جدول ۷- نتایج همبستگی بین داده‌های کمبود حجم بارش موجود با داده‌های کمبود حجم جریان تولید شده از معادله (۷)

دوره بازگشت	۲	۳	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
ضریب همبستگی (R)	۰/۹۸۵	۰/۹۸۸	۰/۹۹۲	۰/۹۹۴	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹

واقعیت‌های پتانسیل آبی منطقه در نظر گرفته شود. در این مطالعه، خط مدیریتی، میانگین در نظر گرفته شده است؛ یعنی مقدار بارش یا جریان کمتر از میانگین، خشکسالی تلقی شده و بررسی‌ها روی این مقادیر، انجام شده است. نتایج حاصل در این پژوهش، برای مدیریت خشکسالی مهم و لازمی برنامه‌ریزی مؤثر برای خشکسالی‌ها جهت مدیریت صحیح خشکسالی است. نمودار دوره‌های خشکی هواشناسی و هیدرولوژیکی نشان می‌دهد در اکثر سال‌ها، در ماه‌هایی که خشکسالی هواشناسی رخ داده، خشکسالی هیدرولوژیکی دیده نشده است و این واقعه در چند ماه بعد رخ داده است که از جمله دلایل آن ذوب برف است که باعث افزایش مقدار جریان بوده و خشکسالی هیدرولوژیکی را به تعویق انداخته است؛ بنابراین زمان بیشتری طول می‌کشد تا اثر کمبود بارش در اجزاء سیستم هیدرولوژیکی نظیر رودخانه، مخازن و آب‌های زیرزمینی ظاهر شود. مقایسه منحنی‌های IDF نشان داد خشکسالی هیدرولوژیکی با شدت بیشتری نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد. سپس پیش‌بینی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با

لذا از طریق احتمالات و با داشتن مقدار کمبود حجم بارش و دوره بازگشت آن، می‌توان مقدار کمبود جریان را نیز به دست آورد. آنالیز خشکی‌ها از دیدگاه جریان مهم‌تر از آنالیز از دیدگاه بارش است؛ زیرا بدون وجود بارش تا مدتی ذخایر مختلف حوضه بروز خشکسالی را به تعویق می‌اندازد. این شاخص در مدیریت مخازن و سدها حائز اهمیت می‌باشد. پس از دوره خشکسالی زمانی که بارش به حالت نرمال برمی‌گردد و شرایط خشکسالی هواشناسی پایان می‌پذیرد تا زمان احیاء مجدد منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی، پیامدهای سوء این پدیده ادامه می‌یابد. در ابتدا ذخایر رطوبت خاک و به دنبال آن جریان‌های سطحی، مخازن، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی جایگزین می‌شود؛ بنابراین آثار خشکسالی در بخش‌هایی که متکی به ذخایر سطحی و یا زیرسطحی آب هستند تا ماه‌ها یا حتی سال‌ها طول می‌کشد.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که خشکی یک پدیده سیال است، خط مدیریتی در بررسی خشکسالی می‌تواند بر اساس

- future. Journal of hydrology. 394(3-4): 471-485.
7. Khaliq M. N. Ouarda T. B. M. J. Ondo J. C. Gachon P. and Bobee B. 2006. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. Journal of Hydrology. 329: 534-552.
 8. Kim D. Byun H. and Choi K. 2009. Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. Journal of hydrology. 378: 1-12.
 9. Kwak J. Kim Y. S. Lee J. S and Kim H. S. 2012. Drought Severity-Duration-Frequency Analysis of Hydrological Drought Based on Copula Theory. Hydrologh Days 2012 Conference. Pp: 82-89.
 10. Kwon H. J. and Kim S. J. 2010. Assessment of distributed hydrological drought based on hydrological unit map using SWSI drought index in South Korea. KSCE Journal of Civil Engineering. 14(6): 923-929.
 11. Mohan S. and Rangacharya N. C. V. 1991. A modified method for drought identification. Hydrological Sciences Journal. 36: 11-21.
 12. Nikbakht Shahbazi A. and Heidarnajhad M. 2012. Meteorological Drought Prediction in Karoon Watershed using Meteorological Variables. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 3(9): 1760-1768.
 13. Ozger M. Mishra A. and singh V. 2009. Low frequency drought variability associated with climate indices. Journal of Hydrology. 364: 152-162.
 14. Yahiaoui A. Touaibia B. and Bouvier C. 2009. Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. Nature and Technology Journal. 1(1): 3-15.

استفاده از خشکسالی‌های هواشناسی، برای حوضه صوفی‌چای با استفاده از آنالیز فراوانی خشکی‌های به دست آمده از روش رژیم نرمال ماهانه بررسی شد. نتایج نشان داد روابط برای هر خشکسالی به صورت نمایی به دست آمد که با توجه به کمترین مقدار خطا (SSE) و بیشترین ضریب همبستگی (R)، مدل مناسب انتخاب شد. سپس شاخصی که مستقل از زمان است برای نشان دادن ارتباط بین خشکسالی‌ها حاصل شد که برای مدیریت خشکسالی‌ها در منطقه مورد مطالعه بسیار مفید است. این شاخص فقط برای حوضه صوفی‌چای قابل استفاده است و نمی‌توان آن را به سایر حوضه‌ها تعمیم داد و پیشنهاد می‌شود این تحقیق برای مناطق دیگر از جمله سایر حوضه‌های دریاچه ارومیه برای مطالعه خشکسالی‌های این دریاچه نیز انجام شود.

منابع

۱. زارعی س. فاخری فرد ا. ۱۳۹۳. ارزیابی ارتباط زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) در حوضه آبریز صوفی‌چای. مجله مهندسی منابع آب. (۲۱): ۳۷-۵۰.
۲. سمیعی م. ثقفیان ب. و مهدوی م. ۱۳۸۵. آنالیز منطقه‌ای شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز استان تهران. مجله منابع طبیعی ایران. (۱): ۲۷-۳۹.
۳. شفیعی م. قهرمان ب. انصاری ح. و شریفی م. ب. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی بر اساس شاخص پالمر. مجله مدیریت آب و آبیاری. (۱): ۱-۱۳.
۴. مظفری غ. ۱۳۸۵. عدم تطابق خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی در دو حوضه آبریز همجوار در دامنه شمالی شیرکوه یزد. فصلنامه علوم انسانی. (۴۸): ۱۰-۱۷۳. ۱۹۰۰.
5. Cancelliere A. and Salas J. 2010. Drought probabilities and return period for annual streamflows series. Journal of hydrology. 391(1-2): 77-89.
6. Eleanor J. and Simon J. 2010. Regional drought over the UK and changes in the

