

## تعیین اثر شدت و مدت خشکسالی بر زمان تأخیر بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و بررسی عدم قطعیت‌ها (مطالعه موردی: حوضه تالاب انزلی)

فهیمه رضی<sup>۱</sup>، علیرضا شکوهی<sup>۲\*</sup>

۱. دانش‌آموخته دکترای مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی<sup>(ره)</sup>، قزوین، ایران

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>، قزوین، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۵/۲۷)

### چکیده

جای خالی آنچه در تحقیقات گذشته به چشم می‌خورد، یافتن ارتباط معنادار میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و سپس، تعیین باند اعتماد احتمال تأخیر زمانی میان رخ دادن دو فاز خشکسالی است. در تحقیق حاضر، سعی شد تا با استفاده از روش شمارش فرکانس، زمان تأخیر میان دو فاز خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، براساس مشاهدات موجود، برای حوضه تالاب انزلی با ۹ ایستگاه هواشناسی و ۲۰ ایستگاه هیدرومتری طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ تعیین شود. با توجه به آنکه در دوره مشاهداتی ۳۰ ساله امکان رخداد خشکسالی‌های حدی کم است، برای تولید شرایط خشکسالی هواشناسی با بزرگی، تداوم و شدت‌های مختلف فراتر از آنچه تا کنون دیده شده، به کمک روش مونت‌کارلو به شبیه‌سازی مصنوعی بارش اقدام شد. برای شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی در سناریوهای مختلف خشکسالی هواشناسی از مدل بیلان آب SWAT استفاده شد. برای بررسی اثر تداوم و شدت خشکسالی هواشناسی بر تأخیر زمانی بین دو فاز خشکسالی، از ماتریس همبستگی تقاطعی استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش تداوم خشکسالی هواشناسی، تأثیرات آن تا مدت طولانی‌تر بر رودخانه به صورت خشکسالی هیدرولوژیکی مشاهده می‌شود. از طرفی، افزایش شدت خشکسالی هواشناسی، موجب کاهش زمان تأخیر میان دو فاز خشکسالی خواهد شد. باند اعتماد احتمال تأخیر زمانی میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی نیز نشان داد با احتمال حدود ۷۰ درصد، تأخیر زمانی یک‌ماهه و کمتر میان دو خشکسالی وجود دارد.

**کلیدواژگان:** تأخیر زمانی، خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، شدت خشکسالی، عدم قطعیت، مدت خشکسالی.

## مقدمه

نکته‌ای که به‌خصوص برای مدیران حوضه‌های آبریز می‌تواند مهم باشد، تعیین فاصله زمانی میان رخداد خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی و به بیان بهتر، تعیین زمان تأخیر میان دو فاز خشکسالی و میزان عدم قطعیت نتایج به‌دست‌آمده برای این زمان تأخیر است. این مسئله را می‌توان به زبانی دیگر و از دیدگاه مدیریت منابع آب حوضه این طور مطرح کرد که چه مدت بعد از وقوع پدیده خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی به مفهوم کمبود آب در دسترس جامعه اتفاق می‌افتد. دیگر اینکه بزرگی، مدت زمان و شدت خشکسالی هواشناسی چه تأثیری بر زمان تأخیر میان دو پدیده خشکسالی دارد. بدیهی است که پاسخ به این دو سؤال و کمی کردن آثار عوامل یادشده بسیار اهمیت دارد.

طولانی شدن مدت زمان خشکسالی هواشناسی می‌تواند به شروع خشکسالی نوع دوم یا خشکسالی هیدرولوژیک منجر شود. برای تعیین فاصله زمانی میان دو نوع خشکسالی می‌توان از روش‌های رگرسیونی، سری زمانی و بیلان آب استفاده کرد. برای اینکه بتوان به تأخیر زمانی میان دو نوع خشکسالی دست یافت، باید برای هر دو فاز خشکسالی از روش تولید اعداد مصنوعی با توجه به تابع چگالی احتمال حاکم بر داده‌ها استفاده کرد. با توجه به اینکه هر دو سری داده بارش و دبی جریان در دسترس است، می‌توان از این تکنیک برای شبیه‌سازی خشکسالی در هر دو فاز هواشناسی و هیدرولوژی استفاده کرد. مشکلی که این روش در بر خواهد داشت، آن است که ارزیابی زمان تأخیر دو فاز خشکسالی و فراتر از آن، بررسی اثر شدت و مدت خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدرولوژیکی، نیازمند برقراری رابطه علت و معلولی بین بارش و رواناب است که تحلیل آماری و تولید اعداد تصادفی بر حسب چگالی احتمال داده‌ها چنین رابطه‌ای را برقرار نخواهد کرد. در این حالت، بهترین راه حل آن است که نتایج حاصل از تولید داده‌های حدی بارش کمینه را از طریق یک مدل بارش رواناب به جریان تبدیل کرد. البته، با توجه به ماهیت قضیه این مدل نمی‌تواند هر نوع مدل بارش - روانابی باشد. مدل مناسب مدلی است که بتواند به صورت پیوسته بارش را دریافت کند و جریانی پیوسته در رودخانه را به وجود آورد. از میان مدل‌های موجود،

SWAT یکی از بهترین مدل‌های پیوسته و نیمه‌توزیعی هیدرولوژیکی است که سابقه استفاده از آن در اقلیم‌های گوناگون وجود دارد. به این ترتیب، با داشتن بارش با دوره تداوم معین می‌توان جریان ناشی از آن را با تداومی که مشخصات حوضه آن را مشخص می‌کند، به دست آورد. مسئله مهم دیگر، آن است که مقایسه دوره‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به منظور محاسبه بزرگی، مدت و شدت آنها و در نهایت، تعیین زمان تأخیر ظهور خشکسالی هیدرولوژیکی بعد از ظهور خشکسالی هواشناسی با استفاده از داده‌های خام بارش و جریان، فقط با استفاده از شاخص‌های بدون بعد امکان‌پذیر است. نکته مهم دیگری که در مطالعه حاضر مورد توجه قرار گرفت، مسئله انکارناپذیر وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی حوادث طبیعی است. بر این اساس، بررسی عدم قطعیت‌های پیش‌بینی حوادث آبی خشکسالی و تعیین باند اعتماد برای پیش‌بینی‌ها نیز در دستور کار مطالعه حاضر قرار گرفت.

همان‌طور که گفته شد، موضوع و روش مطالعه حاضر سابقه قبلی ندارد، ولی به طور مجزا و برای هر یک از مدل‌های تحقیق می‌توان سوابق پژوهشی منتشرشده را یادآوری کرد. با توجه به آنکه در هر دو مورد خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به اندازه قابل قبول مطلب ارائه شده و نیازی نیست که اثبات شود، استفاده از شاخص‌هایی نظیر SPI یا SDI مرسوم است و نتایج مناسبی از آنها در کار دیگران گزارش شده است. در این بخش فقط به اشاره به برخی تجربیات استفاده از مدل بیلان استفاده‌شده در تحقیق یعنی SWAT پرداخته شده و به برخی از محدود کارهای انجام‌شده برای تعیین تأخیر فاز میان دو نوع خشکسالی بسنده خواهد شد.

غلامی و نصیری (۲۰۱۴) با استفاده از مدل بیلان آب SWAT به شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه اترک بر اساس داده‌های حوضه مراوه‌تپه استان گلستان پرداختند. نتایج پژوهش آنها، کارایی مدل را در برآورد رواناب مناسب نشان داد [۱]. رضی و شکوهی (۲۰۲۰) با استفاده از مدل بیلان آب SWAT به تعیین و پیش‌بینی فاصله زمانی میان دو فاز خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه فومنت پرداختند. در پژوهش یادشده تحلیل حساسیت مدل، به روش OAT انجام شد و واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از مدل SCH صورت گرفت و دقت شبیه‌سازی

آب زیرزمینی GRI قوی‌تر می‌شود. ایشان همچنین، نتیجه گرفتند اعمال تأخیر زمانی در شاخص SPI، سبب بهبود عملکرد این شاخص در پیش‌بینی شاخص منبع آب زیرزمینی GRI خواهد شد [۹]. شفيعی و رائینی‌سرجاز (۲۰۱۷) در مطالعه روند خشکسالی و ترسالی هواشناسی بر افت تراز سطح آب دریاچه پریشان اعلام کردند که نمایه‌های خشکسالی هواشناسی SPI، MCZI، CZI، ZSI در مقیاس زمانی میان‌مدت و بلندمدت رابطه معناداری با تغییرات تراز سطح آب دریاچه دارد؛ و با رفع اختلاف فاز میان رخداد خشکسالی و افت تراز سطح آب دریاچه روابط رگرسیونی در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت نیز بهبود یافت [۱۰]. کوشکی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه رابطه زمانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه کرخه نشان دادند بین ضریب همبستگی بارش-دبی جریان و دو شاخص SPI-SDI در چهار گام زمانی، رابطه مستقیم و معناداری در سطح ۹۹ درصد وجود دارد و خشکسالی هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی خیلی کوتاه در حوضه کرخه پس از خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد [۱۱].

پژوهش حاضر با توجه به کمبود منابع تحقیقاتی در مورد رابطه زمانی میان دو فاز خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و اهمیت این مسئله در مدیریت منابع آب حوضه‌ها شکل گرفته است. با توجه به عدم مشاهده خشکسالی‌های حدی هواشناسی طی دوره‌های آماری ثبت‌شده نیاز به مدل‌سازی استوکستیک و در عین حال استفاده از مدل‌های بارش و رواناب وجود دارد که می‌تواند عدم قطعیت معناداری را بر نتایج به‌دست‌آمده اعمال کند. موضوع تحقیق و روشی که برای انجام آن طراحی شده است، برای نخستین بار مورد بحث قرار می‌گیرد. بر این اساس و برای رسیدن به اهداف پژوهش، در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از تابع چگالی احتمال برازش داده‌شده بر بارش‌های ثبت‌شده به تولید بارش‌های حدی کمینه اقدام می‌شود. در این حالت موتور تولید داده‌های بارش کم به صورت تصادفی آن‌قدر تکرار خواهد شد که خشکسالی‌های هواشناسی با تداوم از یک ماه تا ۶۰ ماه تولید شود. سپس، برای دیدن وضعیت رودخانه‌ها در چنین حالتی، از بارش‌های یادشده به عنوان ورودی مدل SWAT استفاده به عمل می‌آید. برای تعیین مشخصات خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی نیز به ترتیب از شاخص‌های SPI و SDI استفاده شده و در نهایت،

با استفاده از شاخص‌های نش-سانکلیف و ضریب همبستگی در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۸ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۷۹ و قابل قبول برآورد شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل با دقت ۸۰ درصد قادر به شبیه‌سازی تأخیر زمانی است [۲].

حسینی و موکاریان (۲۰۱۶) SWAT را به‌منظور شبیه‌سازی بیلان آب و برآورد میزان جریان زیرزمینی در حوضه گل‌گل در استان ایلام استفاده کردند [۳]. وافعی و همکاران (۲۰۱۵) برای تحلیل تأثیرات تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت بر تولیدات کشاورزی، از ترکیب دو مدل SWAT و MODSIM استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تغییر الگوی کشت می‌تواند به عنوان راه‌کاری مؤثر به‌منظور مقابله با آثار منفی تغییر اقلیم استفاده شود [۴]. ویلایسن و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از SWAT، به مدل‌سازی جریان خروجی از حوضه‌ای در کشور لائوس پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این مدل، ابزاری مناسب و قابل اعتماد برای بررسی اثر تغییر در کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر کیفیت آب و رسوب حوضه است [۵]. عباسپور و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور به‌کمیت درآوردن تغییرات مکانی و زمانی موجودیت آب در محدوده وسیعی از اقلیم اروپا، مدل SWAT را با استفاده از دبی رواناب و عملکرد محصول واسنجی کردند [۶]. آدینی و همکاران (۲۰۱۴) مدل SWAT را برای پیش‌بینی بیلان آب در حوضه سد جبا با مساحت ۱۲۹۹۲ کیلومترمربع در نیجریه به‌کار بردند. نتایج پژوهش آنها همبستگی زیادی را بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی‌شده نشان داد. آنها همچنین بیان داشتند که این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان در سایر مناطق نیجریه را دارد [۷]. شائول و همکاران (۲۰۱۳) از مدل SWAT برای تخمین بیلان آب کوه‌های شایا در اتیوپی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با گام زمانی ماهانه، مدل شبیه‌سازی قابل قبولی داشته است. علاوه بر آن، تأکید کردند که این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولوژی در مناطق کوهستانی که آمار دقیقی در آن وجود ندارد، بسیار کاربردی است [۸].

محمدی و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه ارتباط خشکسالی هواشناسی و زیرزمینی در دشت کرمان نشان دادند با طولانی‌تر شدن مقیاس زمانی شاخص خشکسالی هواشناسی SPI، میزان همبستگی آن با شاخص خشکسالی



منظور تعیین باند اعتماد برای تأخیر زمانی بین دو خشکسالی، با استفاده از تکنیک تولید اعداد تصادفی، داده‌های بارندگی برای حالات مختلف اقلیمی و آب‌وهوایی تولید شده و با استفاده از مدل بیلان آب، دبی‌های متناظر آن تولید می‌شود. به این ترتیب، می‌توان برای شدت‌ها و مدت‌های مختلف خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، با استفاده از روش همبستگی متقابل یا خودهمبستگی، معناداری تأخیرهای زمانی به‌دست‌آمده را آزمود. در این مطالعه به منظور نشان دادن عدم قطعیت، باند اعتماد برای نتایج به‌دست‌آمده تعیین شد.

#### آزمون معناداری تأخیر زمانی

برای مطالعه معناداری تأخیر زمانی میان دو نوع خشکسالی، از آزمون معناداری Tr استفاده شد. این آزمون، ارتباط میان نتایج دو شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را تعیین می‌کند. به بیان دیگر، با استفاده از این آزمون، معناداری فاصله زمانی میان شروع خشکسالی هواشناسی تا اثرگذاری آن بر رودخانه (شروع خشکسالی هیدرولوژیکی) به‌دست خواهد آمد. آماره Tr از معادله ۱ به دست می‌آید و با یک جدول توزیع t و درجه آزادی n-2 مقایسه می‌شود:

$$T_r = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

در معادله یادشده: n تعداد مشاهدات و r پیرسون، معیاری از همبستگی است که ضریب همبستگی خطی نام دارد و از معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left( \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad (2)$$

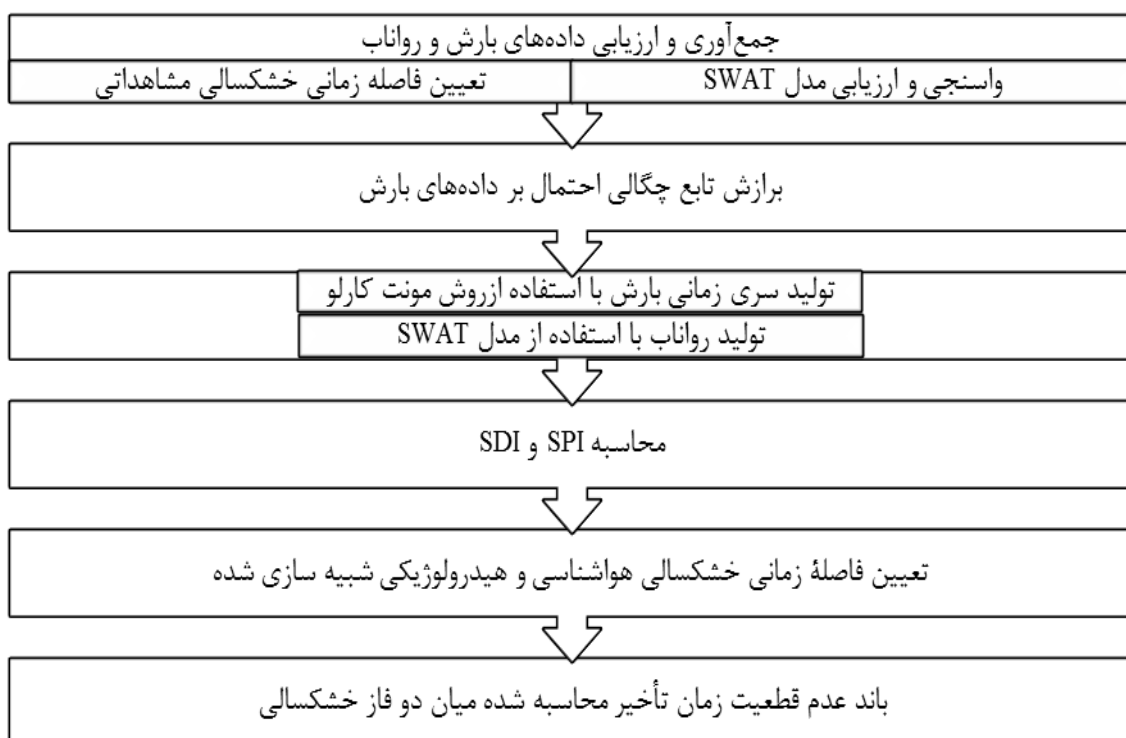
در معادله یادشده: X و Y دو متغیری هستند که معناداری ارتباط میان آن‌ها آزمایش شده و  $S_x$  و  $S_y$  انحراف از معیار این دو متغیر است. در این آزمون در صورتی که  $Pvalue < 0.05$  باشد، فرض صفر در سطح ۹۵ درصد قابل قبول خواهد بود.

شکل ۲ جریان نمای پژوهش را نشان می‌دهد.

رواناب استفاده می‌شود. برای این منظور، سری‌های زمانی بارش و رواناب استاندارد شده ترسیم شده و شمارش تأخیرها برای پایین‌افتادگی‌های دو نمودار، به روش دستی و یا با استفاده از برنامه‌نویسی انجام شد. در این روش می‌توان در دو حالت ورود به خشکسالی و یا خروج از آن، اختلاف زمانی بین خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژیکی متناظر را مد نظر قرار داد. البته، در این روش شدت خشکسالی تأثیری روی شمارش تعداد تأخیرهای زمانی ندارد. برای دیدن اثر شدت خشکسالی بر تأخیر زمانی، می‌توان به جای سری‌های خام بارش و رواناب، از سری‌های شدت‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده کرد. برای پیش‌بینی شدت و تأخیر خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس خشکسالی هواشناسی از روش مدل بیلان آب که قادر به پیش‌بینی وضعیت رواناب بر حسب بارش‌های حدی (حداقل‌ها با دوره‌های تداوم متفاوت) شبیه‌سازی شده باشند، استفاده شد. برای شبیه‌سازی بارش‌های حدی، اعداد تصادفی برحسب توزیع بارش در ایستگاه مورد نظر در نرم‌افزار Minitab تولید شدند؛ سپس به کمک مدل بیلان آب SWAT و با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع، کاربری اراضی، بافت خاک حوضه و نقشه شیب حوضه که از روی نقشه رقومی ارتفاع حوضه تهیه شد، پیش‌بینی وضعیت هیدروکلیماتولوژیکی حوضه فومنت در سناریوهای مدیریتی انجام شده و زمان تأخیر بین وقایع هم‌ارز در دو فاز هواشناسی و هیدرولوژیکی تعیین شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل، صحت نتایج را تأیید کرد. چگونگی استفاده از مدل بیلان آب SWAT در مقاله دیگری از نویسندگان بررسی شده و نتایج آن گزارش شده است [۲].

#### عدم قطعیت

از گام‌های اساسی در مطالعات هیدرولوژیکی و مطالعاتی که بر پایه استفاده از مدل‌ها استوار هستند، بررسی و تحلیل عدم قطعیت است. از طرفی، چگونگی به کمیت درآوردن عدم قطعیت و تعیین میزان قطعیت نتایج، بسیار اهمیت دارد. یکی از روش‌های بیان کمی عدم قطعیت، مشخص کردن باند اعتماد برای نتایج به‌دست‌آمده است. به



شکل ۲. جریان نمای پژوهش

## نتایج و بحث

### تعیین زمان تأخیر میان فازهای هواشناسی و هیدرولوژی (بارش و رواناب)

پس از شمارش تأخیرهای زمانی در سری زمانی بارش-رواناب حوضه و نیز شبیه‌سازی حوضه با استفاده از مدل بیلان آب و استخراج خروجی‌های آن؛ مقایسه نتایج این دو روش انجام شد. جدول ۱ آمار تأخیر زمانی برای چهار ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری مشترک روی رودخانه‌ها را برای حالت مشاهداتی و همچنین مدل نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، متوسط خطای مدل در پیش‌بینی ۲۰ درصد است که کارایی مدل در شبیه‌سازی تأخیر زمانی را

تأیید می‌کند. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی داشت، می‌توان نتیجه گرفت که در مورد تأخیر زمانی نیز این تأیید وجود دارد و بنابراین برای پیش‌بینی خشکسالی‌های آینده نیز می‌توان به این نتایج تکیه کرد. برای مثال، نتایج تأخیر زمانی در مورد ایستگاه طاسکوه نشان داد سهم تأخیر کمتر از یک‌ماهه و یک‌ماهه، ۷۸ درصد؛ دو‌ماهه، ۱۷ درصد و سه‌ماهه، ۵ درصد است. به این معنا که با هر بار کاهش بارش، با احتمال ۷۸ درصد تا یک‌ماه آینده و با احتمال ۹۵ درصد در دو ماه آینده جریان رودخانه از خود کاهش نشان خواهد داد.

جدول ۱. احتمال تأخیر زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای هر ایستگاه

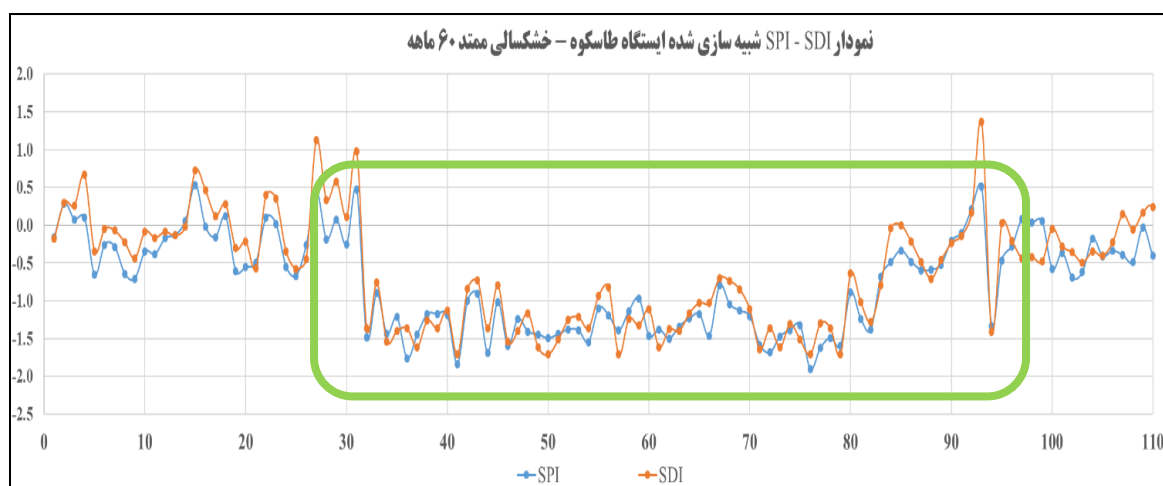
ایستگاه هواشناسی	ایستگاه هیدرومتری	احتمال تأخیر زمانی مشاهداتی (%)			احتمال تأخیر زمانی مدل (%)		
		یک‌ماهه و کمتر	دوماهه	سه‌ماهه	یک‌ماهه و کمتر	دوماهه	سه‌ماهه
طاسکوه	طاسکوه	۷۸	۱۷	۵	۸۲	۱۶	۲
قلعه رودخان	قلعه رودخان	۸۲	۱۵	۳	۸۰	۱۸	۲
کسما	چومثقال	۸۳	۱۷	۰	۷۹	۲۰	۱
رشت	پل سازمان آب	۸۸/۵	۱۱/۵	۰	۸۵	۱۵	۰

میان دو نوع خشکسالی از آزمون معناداری t استفاده شد. به بیان دیگر، برای همه ایستگاه‌های مشترک، معناداری ارتباط میان شروع خشکسالی هواشناسی با تأثیرپذیری رودخانه از این خشکسالی، یعنی شروع خشکسالی هیدرولوژیکی آزمایش شد. از طرف دیگر، برای دیدن اثر شدت خشکسالی بر تأخیر زمانی، کلاس‌بندی شدت‌های خشکسالی هواشناسی نیز در انجام آزمون t مد نظر قرار داده شد. علاوه بر آن، برای بررسی اثر تداوم خشکسالی بر تأخیر زمانی، تداوم‌های یک تا ۶۰ ماه در نظر گرفته شد.

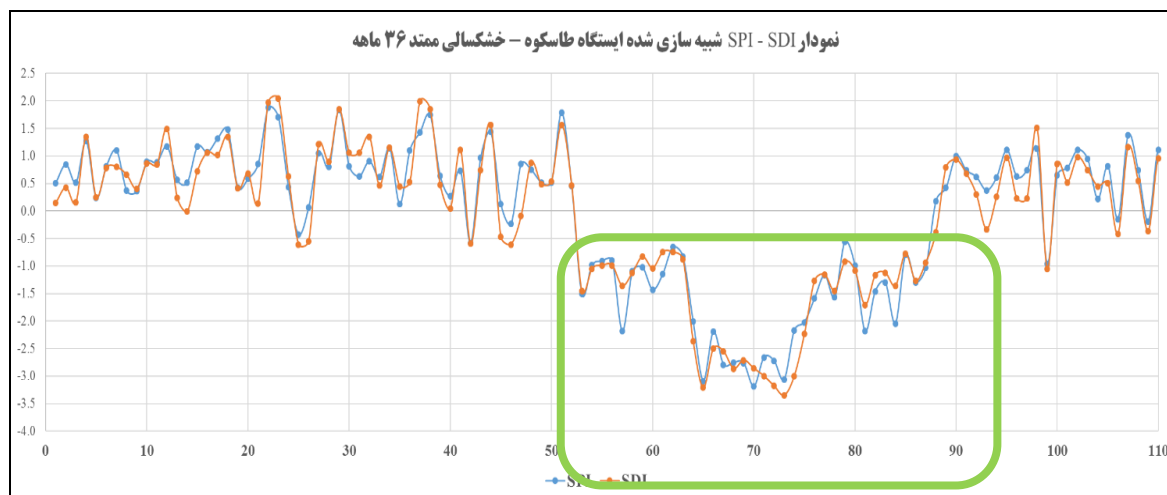
برای نمونه، در شکل‌های ۳ و ۴ دو سری شبیه‌سازی شده SPI و SDI با تداوم‌های ۳۶ و ۶۰ ماهه برای ایستگاه طاسکوه نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که طول دوره خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی برای هر دو سری شبیه‌سازی شده یکسان بوده است. در خشکسالی ممتد ۳۶ ماهه، شدت خشکسالی‌ها بیشتر بوده است. این امر در مورد سری داده‌های تاریخی ۳۰ ساله مشاهده شده در حوضه نیز برقرار بود. از طرفی، نمودارهای به‌دست‌آمده از سری‌های شبیه‌سازی شده با تداوم‌های دیگر نیز همین نتیجه را نشان دادند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که طول دوره خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه فومنات یکسان است. دلیل این رفتار حوضه را می‌توان به ابعاد حوضه، پوشش گیاهی و عمق کم خاک مرتبط دانست.

### بررسی اثر شدت و تداوم خشکسالی هواشناسی بر تأخیر زمانی و تعیین عدم قطعیت

همان‌گونه که گفته شد، تداوم و شدت‌های خشکسالی مشاهده شده در دوره تاریخی سی‌ساله نمی‌تواند بیانگر همه شرایط محتمل در منطقه باشد. بنابراین، با استفاده از روش مونت کارلو یعنی با استفاده از شیوه تولید اعداد تصادفی براساس تابع چگالی احتمال حاکم بر بارش منطقه مطالعاتی، در ایستگاه‌های مشترک هواشناسی و هیدرومتری به تولید بارش روزانه اقدام شد. برای رسیدن به هدف یادشده، تولید تصادفی داده‌های بارش آن‌قدر انجام شد که تغییر محسوسی در تداوم و شدت خشکسالی‌های هواشناسی منطقه ملاحظه نشد. برای این منظور، شبیه‌سازی تا ۲۰ دوره زمانی پیش رفت و بزرگ‌ترین تداوم خشکسالی معادل ۶۰ ماه حاصل شد. سپس، با استفاده از بارش‌های تولیدشده و با بهره‌گیری از مدل SWAT هیدروگراف جریان تولید شد. در مرحله بعد برای تعیین تأخیر زمانی میان دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، با استفاده از شاخص‌های خشکسالی، شدت‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی برای داده‌های شبیه‌سازی شده محاسبه شد. برای تعیین تأخیر زمانی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌توان علاوه بر شمارش و تعیین فراوانی نسبی در سری زمانی، از روش‌های رگرسیونی (همبستگی متقاطع) نیز استفاده کرد. برای بررسی معناداری تأخیرهای زمانی اتفاق افتاده



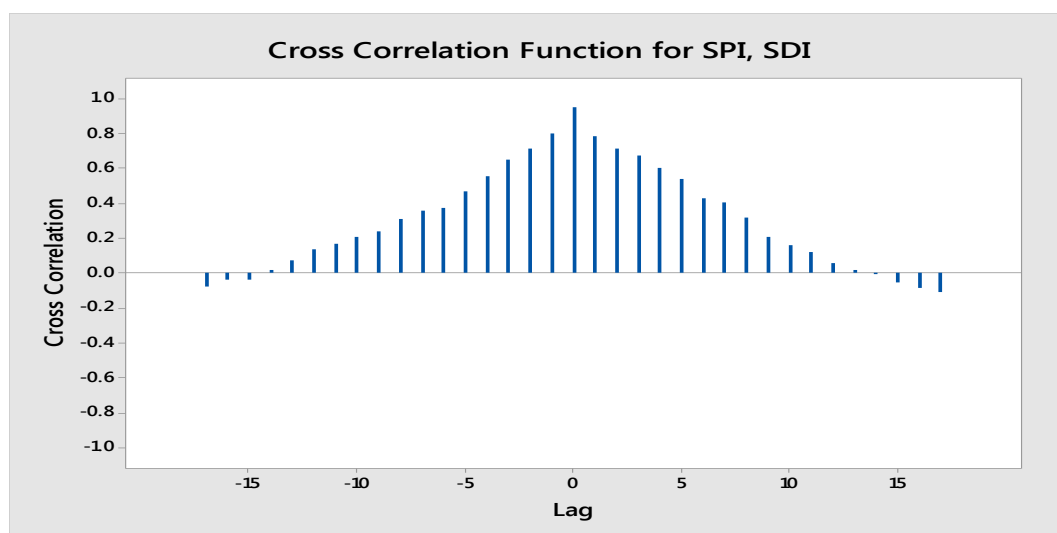
شکل ۳. نمودار SPI - SDI شبیه‌سازی شده ایستگاه طاسکوه برای تداوم ۶۰ ماهه خشکسالی



شکل ۴. نمودار SPI - SDI شبیه سازی شده ایستگاه طاسکوه برای تداوم ۳۶ ماهه خشکسالی

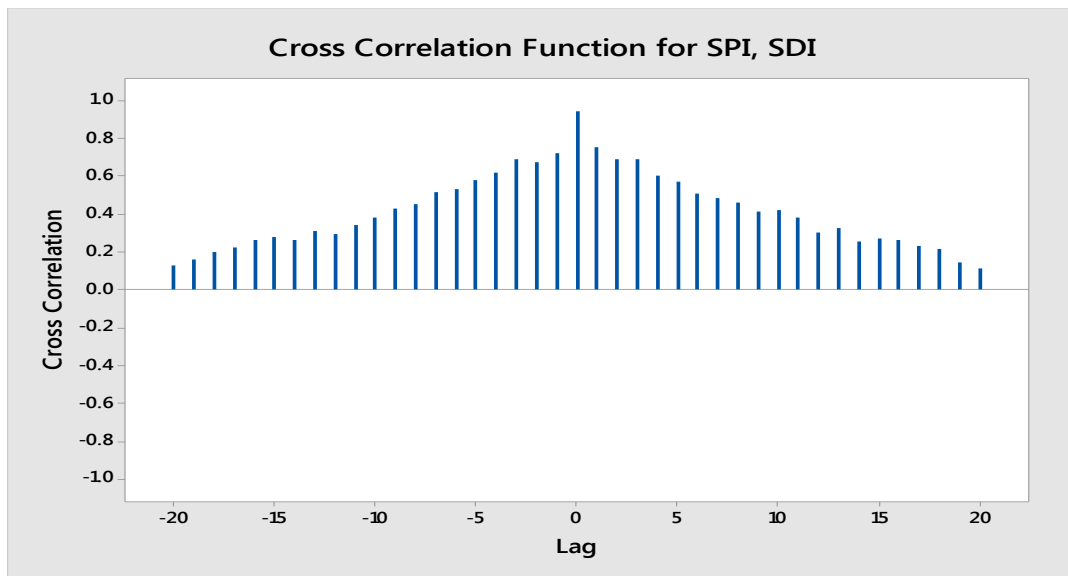
زمان‌های تأخیر مورد توجه قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل‌های یادشده مشاهده می‌شود، تأخیرهای زمانی به ترتیب کمتر از یک‌ماهه تا پنج‌ماهه و کمتر از یک‌ماهه تا هفت‌ماهه معنادار است. از مقایسه نتایج به دست آمده برای تداوم‌های ۳۶ و ۶۰ ماهه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تداوم خشکسالی هواشناسی، تأخیرهای زمانی طولانی‌تر و تا هفت ماه معنادار شده‌اند. به این معنا که آثار خشکسالی هواشناسی تا هفت ماه آینده بر رفتار هیدرولوژیک رودخانه قابل مشاهده است؛ اما همچنان بیشترین همبستگی مربوط به تأخیر زمانی کمتر از یک‌ماهه است.

برای بررسی اثر تداوم خشکسالی هواشناسی بر تأخیر زمانی میان دو نوع خشکسالی از دو روش شمارش فرکانس و آزمون معناداری Tr استفاده شد. شکل‌های ۵ و ۶ کورلوگرام میان شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SDI) ترسیم شده در محیط نرم‌افزار Minitab را برای ایستگاه طاسکوه برای تداوم‌های به ترتیب ۳۶ و ۶۰ ماهه نشان می‌دهند. در کورلوگرام نمایش داده شده در این دو شکل و بقیه شکل‌هایی که در ادامه خواهند آمد، با توجه به آنکه بارش نقش پیش‌بینی‌کننده (Predictor) و رواناب نقش پاسخ (Response) را ایفا می‌کنند، فقط بخش منفی



شکل ۵. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی ممتد ۳۶ ماهه





شکل ۶. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی ممتد ۶۰ ماهه

طاسکوه این نتیجه به دست آمده است که احتمال وقوع زمان تأخیر یک‌ماهه بین ۳۰ تا ۷۰ درصد است، حال آنکه احتمال رخداد زمان تأخیر هفت‌ماهه، صفر درصد بوده و حداکثر در ۴ درصد مواقع چنین زمان تأخیری بین دو فاز خشکسالی قابل رؤیت است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که افزایش تداوم خشکسالی تأثیر زیادی در منطقه مطالعاتی روی زمان تأخیر نداشته و تأخیر زمانی یک‌ماهه و کمتر بیشترین احتمال وقوع را دارد. به بیان دیگر، به‌رغم آنکه طولانی‌ترین تأخیر زمانی بین دو خشکسالی تأخیر هفت‌ماهه بوده است، اما پرتکرارترین تأخیر زمانی اتفاق افتاده در منطقه، تأخیر یک‌ماهه و کمتر است. کوتاه بودن مدت زمان بروز کم‌آبی بعد از بروز خشکسالی هواشناسی در منطقه، تمهیدات ذخیره آب را به یک اولویت در مدیریت منابع آب منطقه تبدیل می‌کند.

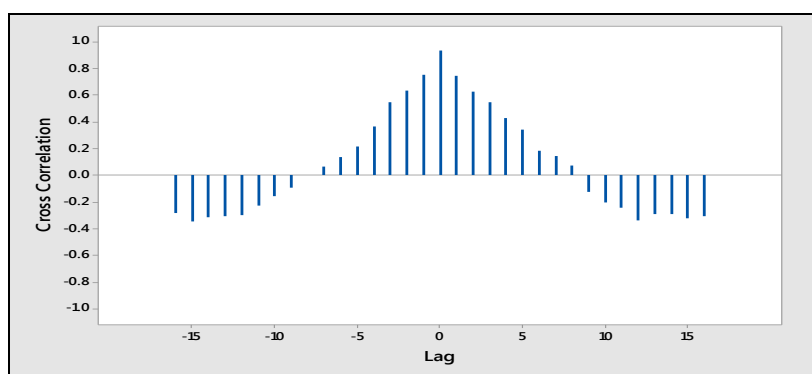
هر یک از شکل‌های ۳-۶ نشان‌دهنده یک دوره شبیه‌سازی از ارتباط میان بارش و دبی و به بیان دیگر، خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است. اگر این واقعه تکرار شود، بنا به خاصیت تصادفی بودن داده می‌توان انتظار داشت که زمان تأخیر دیگری بین دو داده به دست آید. برای دستیابی به کلیه حالت‌های ممکن در این خصوص، با استفاده از مبانی روش مونت کارلو، ارتباط میان دو فاز، ۲۰ سری زمانی بارش روزانه ۳۶۰ روزه تولید و به ازای هر دوره مدل SWAT اجرا شد. سپس، با استفاده از روش شمارش فرکانس برای سناریوهای شبیه‌سازی شده در هر ایستگاه باند اعتماد احتمال وقوع تأخیرهای زمانی محاسبه شد. جدول ۲ نتایج باند اعتماد احتمال وقوع تأخیرهای زمانی کمتر از یک‌ماهه تا هفت‌ماهه رخ داده در داده‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. برای مثال، در

جدول ۲. جدول باند اعتماد احتمال وقوع تأخیرهای زمانی برای داده‌های شبیه‌سازی شده

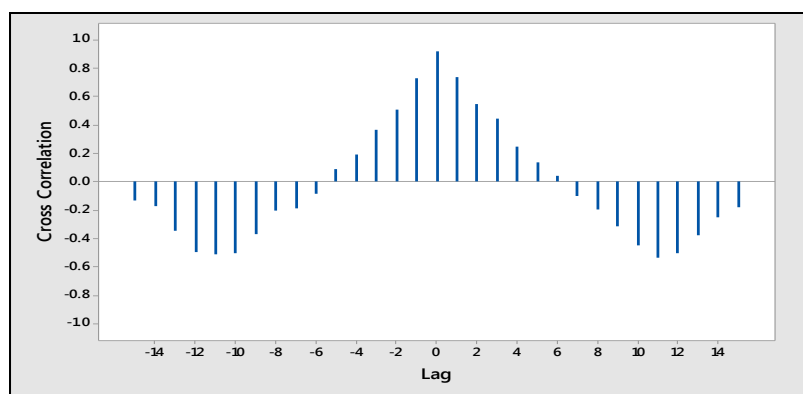
باند اعتماد احتمال تأخیر زمانی داده‌های شبیه‌سازی شده %						ایستگاه هواشناسی		ایستگاه هیدرومتری	
هفت‌ماهه	شش‌ماهه	پنج‌ماهه	چهارماهه	سه‌ماهه	دوماهه	یک‌ماهه و کمتر	طاسکوه	طاسکوه	طاسکوه
۴-۰	۷-۰	۱۰-۰	۱۲-۰	۲۰-۰	۳۰-۱۷	۷۰-۳۰	قلعه رودخان	قلعه رودخان	طاسکوه
۵-۰	۷,۵-۰	۹,۵-۰	۱۱,۵-۰	۱۶,۵-۰	۲۵-۱۹	۷۵-۳۱	چومثال	کسما	چومثال
۰	۰	۱۲-۰	۱۵-۰	۱۷-۲	۲۳-۱۹	۷۵-۳۷	پل سازمان آب	رشت	پل سازمان آب
۰	۰	۱۳-۰	۱۵-۰	۱۸-۲	۲۲-۱۴	۷۶-۴۰			

کوتاه‌تر شده و برای شدیدترین خشکسالی‌های هواشناسی (SPI کمتر از -۲) فقط تأخیر زمانی کمتر از یک‌ماهه معنادار است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش شدت خشکسالی هواشناسی، تأخیر زمانی میان دو نوع خشکسالی کمتر شده است. به بیان دیگر، با شدت گرفتن خشکسالی هواشناسی، رفتار هیدرولوژیک رودخانه تغییر می‌کند و نسبت به شرایط خشکی سریع‌تر واکنش نشان می‌دهد.

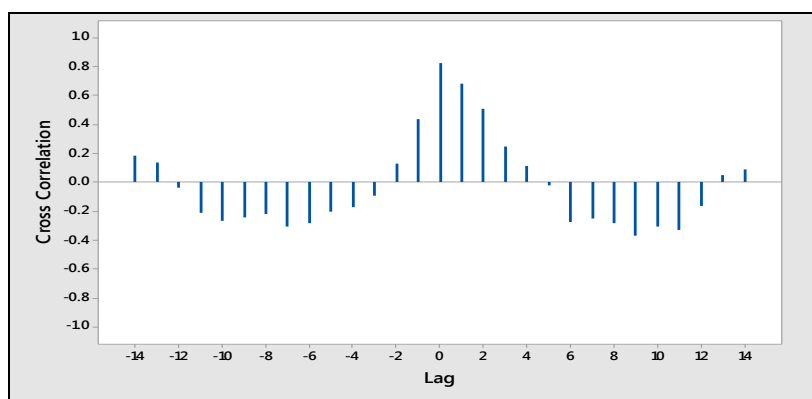
به‌منظور بررسی اثر شدت خشکسالی هواشناسی بر تأخیر زمانی میان دو نوع خشکسالی نیز از روش شمارش فرکانس و آزمون معناداری Tr استفاده شد. شکل‌های ۷ تا ۱۰ کورلوگرام میان شدت‌های مختلف خشکسالی هواشناسی را با خشکسالی هیدرولوژیکی متناظر آن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های یادشده مشاهده می‌شود، تأخیرهای زمانی یک تا پنج‌ماهه معنادار هستند، ولی با افزایش شدت خشکسالی، تأخیرهای زمانی معنادار،



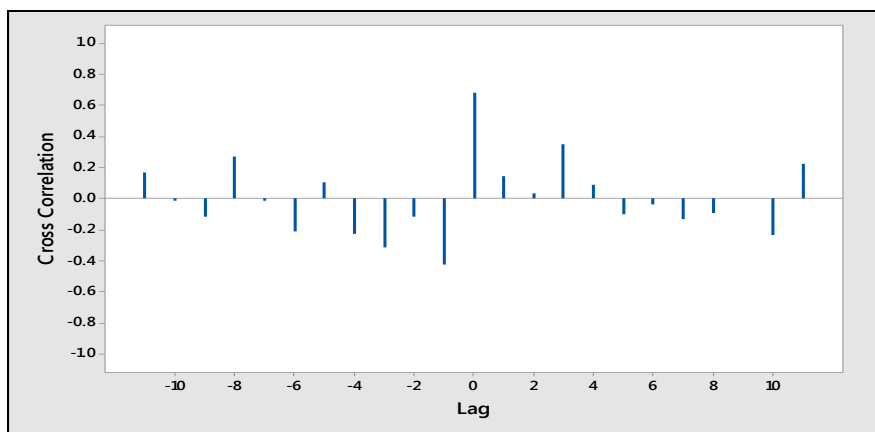
شکل ۷. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی هواشناسی با شدت کمتر از ۰/۵-



شکل ۸. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی هواشناسی با شدت کمتر از ۱-



شکل ۹. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی هواشناسی با شدت کمتر از ۱/۵-



شکل ۱۰. منحنی آزمون معناداری تأخیر زمانی ایستگاه طاسکوه بر حسب ماه برای خشکسالی هواشناسی با شدت کمتر از ۲-

هیدرولوژیکی، از مدل بیلان آب SWAT استفاده شد. شمارش تأخیرهای زمانی رخ داده در نمودارهای بارش-رواناب استاندارد شده برای داده‌های مشاهداتی و مدل، منجر به تعیین درصد احتمال وقوع تأخیرهای زمانی در حوضه مورد مطالعه شد. به این ترتیب، سهم هر یک از تأخیرهای زمانی برای ایستگاه‌های موجود در منطقه تعیین شد. نتایج نشان داد مدل بیلان آب برای پیش‌بینی تأخیرهای زمانی فقط ۲۰ درصد خطا داشته است. به بیان دیگر، با اطمینان ۸۰ درصد می‌توان از مدل بیلان آب SWAT برای تعیین تأخیرهای زمانی میان دو نوع خشکسالی استفاده کرد. نتیجه به دست آمده در ارتباط با قابلیت مدل SWAT برای شبیه‌سازی بارش رواناب مؤید نتایج به دست آمده در تحقیقات غلامی و نصیری (۲۰۱۴)، ویلیسن و همکاران (۲۰۱۵)، عباسپور و همکاران (۲۰۱۵) و توانایی مدل و مشابهت زمان تأخیر شبیه‌سازی شده و نمونه تاریخی مؤید نتایج به دست آمده در مطالعه رضی و شکوهی (۲۰۲۰) است.

روش ویژه‌ای که در این تحقیق برای بررسی اثر تداوم و شدت خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی هیدرولوژیکی و تأخیر زمانی میان دو فاز خشکسالی ارائه شده است، از روش تولید اعداد تصادفی براساس تابع چگالی احتمال حاکم بر بارش منطقه مطالعاتی و شبیه‌سازی سری داده‌های بارش‌های حدی کمینه با زمان‌های تداوم مختلف (تا ۶۰ ماه) استفاده می‌کند و سپس مقادیر رواناب متناظر با سری داده‌های بارش را با استفاده از مدل بیلان آب SWAT به دست می‌دهد. در این روش کلاس‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به ترتیب با استفاده از شاخص‌های SPI و SDI و

با توجه به مجموعه نتایج به دست آمده در مورد تأخیر زمانی برای داده‌های مشاهداتی و نیز شبیه‌سازی شده می‌توان گفت که در حوضه فومنات اثر هر واقعه خشکسالی هواشناسی حداکثر تا سه ماه بعد روی رودخانه قابل مشاهده است. این در حالی است که بیشترین تعداد تأخیر زمانی اتفاق افتاده در حوضه، تأخیرهای یک‌ماهه و یا کمتر از آن است. اگر حوضه شرایط بحرانی (خشکسالی‌هایی با شدت و دوام بزرگ‌تر) را تجربه کند؛ رفتار هیدرولوژیک حوضه تغییر خواهد کرد، به این مفهوم که با افزایش دوام خشکسالی هواشناسی، اثر خشکسالی هواشناسی تا زمان طولانی‌تری روی رودخانه قابل مشاهده خواهد بود. از طرفی، افزایش شدت خشکسالی منجر به کوتاه‌تر شدن تأخیر زمانی می‌شود. به بیان دیگر، حوضه به خشکسالی‌های شدیدتر پاسخ سریع‌تری خواهد داد. نتیجه دیگر آنکه اثر هم‌زمان افزایش شدت و دوام خشکسالی هواشناسی موجب طولانی شدن تأثیر خشکسالی هواشناسی بر رودخانه می‌شود و این اثرپذیری از ۳ ماه تا ۵ ماه افزایش می‌یابد (برای خشکسالی‌های شدید و ممتد ۳۶ ماهه).

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر، تعیین مدت زمان در دسترس برای مدیریت منابع آب در حالت کم‌آبی پس از مشاهده خشکسالی هواشناسی است. با توجه به آنکه رابطه علت و معلولی میان بارش و رواناب در حالت شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های آماری قابل استنباط نیست، برای تعیین تأخیر زمانی میان خشکسالی هواشناسی و

- [3]. Hosseini M, Mokarian Z. Investigation and estimation of groundwater flow of the Gol Gol basin using SWAT. *Journal of Watershed Management Research*. 2016; 8(1): 80-92. [Persian]
- [4]. Vaghefi S A, Mousavi S J, Abbaspour K C, Srinivasan R, Arnold J R. Integration of hydrologic and water allocation models in basin-scale water resources management considering crop pattern and climate change: Karkheh River Basin in Iran. *Regional Environmental Change*. 2015; 15(3): 475-484.
- [5]. Vilaysane B, Takara K, Luo P, Akkharath I, Duan W. Hydrological stream flow modeling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*. 2015; 28: 380-390.
- [6]. Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Klove B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 2015; 524: 733-752.
- [7]. Adeniyi G, Bolaji F S, Adebayo W S, Daramola M O. Validation of SWAT model for prediction of water yield and water balance: case study of the upstream catchment of Jebba dam in Nigeria. *International journal of civil and environmental engineering*. 2014; 8(2): 264-270.
- [8]. Shawul A A, Alamirew T, Dinka M O. Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, southeastern Ethiopia. *Hydrology and Earth system sciences*. 2013; 10: 13955-13978.
- [9]. Mohammad S, Naseri F, Nazaripour H. Investigating the Temporal Changes and the Effect of Meteorological Drought on Groundwater Resources of Kerman Plain using Standard Precipitation (SPI) and Groundwater Resources (GRI) indices. 2018; 5(1) 11-22. [Persian]
- [10]. Shafiei M, Raeini-Sarjaz M. Assessment of the Impact of Meteorological Drought and Wetness Trends on the Parishan Lake Water Level Decline. *Journal of Watershed Management Research*. 2015; 6(12) 118-126. [Persian]
- [11]. Kooshki R, Rahimi M, Amiri M, Mohamadi M, Dastoorani J. Investigating the Relationship between Meteorological and Hydrological Drought in Karkheh Catchment Area. 2017; 4(3) 687-698. [Persian]

محاسبه و تعیین می‌شود و با شمارش و تعیین فراوانی نسبی تأخیرها در سری زمانی به همراه استفاده از روش‌های رگرسیونی (همبستگی مقاطع) تعیین زمان تأخیر میان دو فاز خشکسالی را محاسبه می‌کند. نتایج نشان داد افزایش تداوم خشکسالی هواشناسی، منجر به طولانی شدن تأثیرپذیری رودخانه از خشکسالی (خشکسالی هیدرولوژیکی) می‌شود. افزایش شدت خشکسالی موجب کاهش تأخیر زمانی شده و پاسخ حوضه به خشکسالی‌های شدید، سریع‌تر است. برای بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی زمان تأخیر میان دو فاز خشکسالی با توجه به طبیعت تصادفی داده‌های بارش و جریان، باند اعتماد احتمالاتی زمان یادشده با استفاده از مبانی روش مونت کارلو و از طریق اجرای متعدد مدل SWAT در مقابل سری زمانی بارش شبیه‌سازی شده بر مبنای تابع چگالی احتمال غالب ساخته شد. ارزیابی انجام شده نشان داد در حوضه فومنت محتمل‌ترین زمان تأخیر مشاهده خشکسالی در رودخانه، یک ماه بعد از ظهور خشکسالی هواشناسی است. در باند اعتماد به دست آمده برای زمان تأخیر میان دو فاز دو نکته درخور توجه بود. نخست اینکه میانه باند به ازای طولانی شدن زمان تأخیر کوچک می‌شود و دوم اینکه پهنای باند با طولانی شدن زمان تأخیر کوچک‌تر می‌شود که نشان‌دهنده قطعیت بیشتر در عدم احتمال رخداد زمان تأخیر بیشتر از یک ماه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است. کوتاه بودن مدت زمان بروز کم‌آبی بعد از بروز خشکسالی هواشناسی در منطقه از نظر مدیریت منابع آب اهمیت بسیاری دارد. این فاصله کوتاه یک‌ماهه از زمان وقوع خشکسالی هواشناسی تا تحت تأثیر قرار گرفتن منابع آب، لزوم مدیریت بهینه منابع آب را با توجه به مدت زمان کوتاهی که برای اعمال برنامه‌های مدیریتی در اختیار مدیران آبی وجود دارد، گوشزد می‌کند.

#### منابع

- [1]. Gholami Sh, Nasiri M. Simulation of Atrak river flow using the SWAT model, Case study: Maraveh Tappeh watershed in Golestan province. *Journal of Watershed Management Research*. 2014; 2(7): 126-135. [Persian]
- [2]. Razi F, Shokouhi A R. Determining and Estimating the Lag time between Meteorological and Hydrological Drought Using a Water Balance Model. *Journal of Watershed Management Research*. 2020; 12(3): 712-724. [Persian]