

## ارائه مدل پیش‌بینی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک با روش‌های آماری تحت تأثیر تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی: زیرحوضه آبریز افین)

غزاله کواکبی - دانش‌آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمد موسوی بایگی<sup>۱</sup> - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

امین علیزاده - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

ابوالفضل مساعدی - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مهدی جباری نوقابی - استادیار دانشکده علوم و ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷

### چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی در اقلیم‌های مختلف با ویژگی تکرار شونده است که به علت داشتن ویژگی‌هایی نظیر شروع، خاتمه، شدت و فراوانی، دارای پیچیدگی‌هایی در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی است و گستره وسیعی از ابعاد محیط طبیعی و جوامع انسانی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد؛ از جمله بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی. در این پژوهش سعی شده تا مدلی برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی، ارائه و اقدامات لازم به‌منظور کاهش اثرات ناشی از آن انجام شود. بدین منظور از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPEI و eRDI و شاخص خشکسالی هیدرولوژیک (SRI) استفاده شد. به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر این پدیده، دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه مورد بررسی قرار گرفت. دوره پایه این مطالعه ۲۰۱۵-۱۹۸۳ و دوره پیش‌بینی ریسک خشکسالی سال‌های ۲۰۲۰-۲۱۰۰ است. دو روش مدل‌سازی BQR و loess Nonparametric Regression برای مدل‌سازی ریسک خشکسالی استفاده شد. نتایج بدست‌آمده از این مطالعه حاکی از کاهش نسبی در وقوع دفعات خشکسالی در ۲۷ ساله آینده نزدیک در زیر حوضه آبریز افین است. همچنین مقایسه روش‌های مختلف نشان از مناسب بودن مدل رگرسیون ناپارامتری برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی آینده را داشت.

کلیدواژه‌ها: مخاطره خشکسالی، آسیب‌پذیری خشکسالی، مدل‌های اقلیمی، RCP4.5، RCP8.5

## ۱- مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی و مکرر اقلیمی در زمین است که اثرات متنوعی بر سایر بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایجاد کرده است. پاندى و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۲ در مطالعه‌ی خود اعلام کردند که خشکسالی بر اساس تأثیر مستقیمی که بر زندگی انسان‌ها دارد، بالاترین رتبه در میان سایر مخاطرات طبیعی را دارد. تأثیر خشکسالی بر کشاورزی، دسترسی به آب و فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی در هر منطقه، به عوامل فیزیولوژیکی، محیطی و اجتماعی آن منطقه بستگی دارد؛ بنابراین آسیب‌پذیری خشکسالی بستگی به عوامل متعددی نظیر ویژگی‌های توپوگرافی، خاک، زمین مورد استفاده، توسعه منابع آب، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نیاز آب منطقه‌ای برای فعالیت‌های داخلی، صنعتی و کشاورزی دارد (آرنل<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹). ارزیابی تأثیرات خشکسالی در بخش‌های مختلف دشوار است، زیرا تأثیرات می‌تواند به صورت منطقه‌ای یا محلی باشد. همچنین، خشکسالی‌ها ممکن است برای مدت طولانی (یک یا چند سال) و یا مدت کوتاهی (چند هفته) اتفاق بیفتند (وو و وایت<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴). خشکسالی یکی از بزرگ‌ترین خطرات طبیعی است که تأثیرات منفی گسترده‌ای بر محیط، اقتصاد و جامعه دارد (بچمایر و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷). خشکسالی به دلیل کاهش بارندگی در یک دوره مشخص و کارآمد، منجر به کمبود آب می‌شود و خشکسالی هیدرولوژیکی به عنوان کاهش آب موجود در تمام اشکال آن تعریف می‌شود (ما و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۵). براساس تعریف برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (۲۰۰۷)، ریسک خشکسالی حاصل قرار گرفتن یک منطقه در برابر یک واقعه خشکسالی با شدت و احتمال مشخص و تحت درجه‌ای معین از آسیب‌پذیری‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تعریف می‌شود. از این رو ارزیابی و مدیریت ریسک خشکسالی به منظور کاهش اثرات خشکسالی و برنامه‌ریزی مناسب برای خشکسالی‌های آینده امری مهم است (وایت<sup>۶</sup>، ۲۰۱۲). از سوی دیگر تغییرات اقلیمی، می‌تواند بر فراوانی و شدت وقوع واقعه خشکسالی تأثیرگذار باشد. براین اساس، آگاهی از تغییرات وضعیت ریسک خشکسالی به دلیل تأثیر از تغییرات احتمالی اقلیمی، می‌تواند گامی مهم در کاهش خسارات ناشی از خشکسالی در بخش‌های مختلف (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و...) باشد. ریسک معمولاً به عنوان ترکیبی از احتمال رویداد یک واقعه (به‌عنوان مثال خشکسالی) و پیامدهای منفی آن شناخته می‌شود (شهید و بهروان، ۲۰۰۸، فن و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۷). مقدار واکنش و پاسخی که محیط به مخاطره می‌دهد بستگی به شدت مخاطره و میزان ویژگی‌های محیطی دارد. این ویژگی‌های محیطی را می‌توان به چهار دسته کلی عوامل اقتصادی، اجتماعی، فیزیکی و

1 pandy et al

2 Arnell

3 Hong Wu and. Wilhite

4 Bachmair et al

5 Ma et al

6 Wilhite

7 Shahid &amp; Behrawan, ۶ FAN et al

زیست‌محیطی تقسیم نمود (برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (ISDR)<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷)، از این رو تنها درک و پیش‌بینی مخاطره مهم نیست، بلکه عواقب احتمالی مخاطره، که بستگی به آسیب‌پذیری‌های محیطی و اجتماعی دارد نیز اهمیت دارند. اکثر سیستم‌های هشدار دهنده خشکسالی پایش و یا پیش‌بینی مخاطره را ارائه می‌دهند، اما اطلاعاتی در خصوص وجود و یا عدم وجود پیامدهای منفی خشکسالی ارائه نمی‌دهند (بچمایر و همکاران، ۲۰۱۷). اساساً، دو مرحله مهم در محاسبه مخاطره خشکسالی وجود دارد. اولین راه‌شناسایی وقایع خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی است، سپس احتمال خشکسالی محاسبه می‌شود (یوان<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳). برای بهبود مدیریت ریسک خشکسالی، شناسایی علل آسیب‌پذیری خشکسالی در یک منطقه خاص، گام مهمی است. پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با تعیین ریسک خشکسالی چه در داخل ایران و چه در خارج از ایران انجام شده است. در عمده این مطالعات مخاطره خشکسالی براساس شاخص‌های خشکسالی و احتمال وقوع آن‌ها محاسبه شده است و برای محاسبه آسیب‌پذیری ریسک و یا حتی در بعضی موارد محاسبه ریسک، برخی از مطالعات از روش‌های سنجش از دور استفاده کرده‌اند (چوپرا، ۲۰۰۶، لین و چن، ۲۰۱۱، لوییس و همکاران، ۲۰۱۷) و در برخی دیگر از مطالعات از روش‌های آماری استفاده شده است. این مطالعات معمول عوامل اقتصادی و اجتماعی را به‌عنوان عوامل آسیب‌پذیر ذکر می‌کنند (تاسکاریس<sup>۳</sup>، ۲۰۰۷، پاندی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰، کیم و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳، فن و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۷، پی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۷، وو و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۸، اپورو و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۹ و دای و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۰). در هر دو دسته از مطالعات فوق، برای بررسی میزان آسیب‌پذیری خشکسالی، استفاده از پرسش‌نامه و تکمیل آن توسط کشاورزان و مردم منطقه، انجام نشده است. در حالی که در این مطالعه، استفاده از پرسش‌نامه روش اصلی در محاسبه آسیب‌پذیری می‌باشد. محاسبه ریسک ابزاری مفید برای دید دقیق و مناسب از وضعیت خشکسالی در هر منطقه‌ای است. در واقع این دید، باعث کمک به مدیران برای اتخاذ تصمیم‌های بهتر برای سازگاری با خشکسالی در دوره‌های زمانی آتی می‌باشد. از این رو در این مطالعه سعی شده است برای پایش وضعیت ریسک خشکسالی زیر حوضه آبریز افین از داده‌های مشاهداتی و برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی، از داده‌های ریزمقیاس شده اقلیمی حاصل از پروژه CORDEX<sup>۱۱</sup> استفاده گردد. در انتها، با مدل‌سازی ریسک خشکسالی، میزان ریسک

1 International Strategy for Disaster Reduction

2 Yuan

3 Tsakriris

4 Pandey et al

5 Kim et al

6 Fan et al

7 Pei et al

8 Wu et al

9 Apurv and Cai

10 Dai et al

11 Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment

برای دوره‌های آبی محاسبه و با مقدار ریسک بدست آمده از داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی مقایسه خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه افین دارای وسعت ۶۵۵ کیلومترمربع و بخشی از حوضه پترگان-خواف می‌باشد که زیر مجموعه حوضه آبریز مرزی شرق ایران است. مساحت این حوضه ۳۲۹۸۰۰۰ هکتار است. این منطقه واقع در بین عرض‌های ۳۳ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی تا ۳۳ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی تا ۵۳ درجه و ۳۱ دقیقه شمالی می‌باشد. رودخانه دائمی در این زیر حوضه، رودخانه خوشبخت است. متوسط بارندگی در زیرحوضه افین حدود ۱۵۶/۴ میلی‌متر و متوسط دمای منطقه، ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۱). اقلیم این زیرحوضه براساس اقلیم بندی دومارتن خشک و براساس اقلیم‌بندی آمبرژه خشک سرد می‌باشد. وجود اقلیم خشک و سرد زیرحوضه را مناسب برای کشت زرشک کرده‌است. اقتصاد روستای زیر حوضه افین از سالیان دور بر مبنای کشاورزی و محصول شاخص زرشک بوده است. بیش‌ترین زرشک تولیدی ایران در این منطقه به‌ثمر می‌رسد (سازمان جهاد کشاورزی شهرستان زیرکوه خراسان جنوبی، ۱۳۹۷).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیرحوضه آبریز افین در کشور و استان خراسان جنوبی

## ۲-۲ روش مطالعه

این مطالعه با هدف بررسی و مدل‌سازی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و به صورت یک مطالعه موردی انجام شده است. برای محاسبه مخاطره ریسک خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، در گام نخست از شاخص‌های خشکسالی SPEI و eRDI بعنوان شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص SRI بعنوان شاخص هیدرولوژیکی استفاده شده است. دوره پایه برای این مطالعه از سال (۲۰۱۵-۱۹۸۳) می‌باشد. داده‌های مورد استفاده نیز شامل داده‌های ماهانه متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل، متوسط دما در نزدیکی سطح زمین، بارش و داده‌های جریان رودخانه (رودخانه خوشبخت در زیرحوضه افین) می‌باشد. مقیاس‌های زمانی مورد استفاده، مقیاس فصلی زمستان (ژانویه-مارس)، بهار (آوریل-ژوئن) و پاییز (اکتبر-دسامبر)، مقیاس ۹ ماهه (۹ ماهه منتهی به ماه نوامبر، فصل زراعی داشت و برداشت محصول زرشک) و ۱۲ ماهه منتهی به سپتامبر (سالانه) می‌باشد.

از شاخص خشکسالی SPEI به دلیل بررسی تأثیر همزمان چند پارامتر دمایی و بارش، بعنوان پارامترهای مؤثر در خشکسالی، استفاده شد. برای محاسبه شاخص خشکسالی SPEI نیاز به داشتن مقدار تبخیر-تعرق می‌باشد برای این منظور از روش تبخیر-تعرق هارگریوز-سامانی برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده شد (سامانی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰).

تیگاس و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۷ شاخص خشکسالی eRDI را ارائه نمودند. در واقع این شاخص اصلاح‌شده‌ی شاخص RDI می‌باشد. در این روش بارش مؤثر در محاسبات شاخص استفاده می‌شود. جهت برآورد میزان بارش مؤثر در این تحقیق از روش تجربی USBR<sup>۳</sup> استفاده شده است. این روش، مناسب برای مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد.

$$p_e = p \times \frac{125 - 0.2 \times p}{125} \quad p \leq 250 \text{ mm} \quad (1)$$

$$p_e = 0.1 \times p + 125 \quad p > 250 \quad (2)$$

در معادلات فوق،  $p_e$  بارش مؤثر مقیاس مورد نظر و  $p$  مقدار بارش متوسط سالانه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

1 Samani

2 Tigkas et al

3 United States Bureau of Reclamation

## جدول ۱- کلاس‌های متفاوت شاخص خشکسالی eRDI, SPEI و SRI

(SPEI: Vicent-serrano et al, 2010, eRDI: Tigkas et al, 2017, SRI: Shukla &amp; Wood, 2008)

توصیف وضعیت	طبقات شاخص
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹ تا -۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

شاخص خشکسالی SRI (Standardized Runoff Index) همانند روش محاسبه شاخص خشکسالی SPI می‌باشد، با این تفاوت که در شاخص SRI از داده‌های جریان رودخانه‌ای استفاده می‌شود (Wood & Shukla, 2007)

## ۲-۲-۱ مخاطره خشکسالی

مخاطره خشکسالی به صورت احتمال وقوع خشکسالی در سطوح مختلف شدت خشکسالی تعریف شده است، برای محاسبه احتمال وقوع خشکسالی از رابطه ۳ استفاده شده است. باتوجه به اینکه سه شاخص خشکسالی استفاده شده در این مطالعه، دارای توزیع نرمال و همچنین طبقه‌بندی این خشکسالی‌ها مطابق جدول شماره ۱ است، بنابراین با استفاده از جدول Z نرمال، احتمال وقوع هر طبقه خشکسالی محاسبه شد. مقادیر احتمال برای هر یک از طبقات مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- شدت خشکسالی، احتمال وقوع و وزن هر طبقه از خشکسالی برای شاخص‌های خشکسالی مورد

بررسی

وضعیت	شدت هر طبقه	احتمال وقوع هر طبقه	وزن هر طبقه
خشکسالی خفیف	۰ تا -۰/۹۹	۰/۳۱۵۹	۱
خشکسالی متوسط	-۱/۴۹ تا -۱	۰/۰۹۰۶	۲
خشکسالی شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵	۰/۰۴۴۵	۳
خشکسالی خیلی شدید	کمتر از -۲	۰/۰۲۲۶	۴

$$H = W \times P(x) \text{class} \times I$$

(۳)

در رابطه (۳)  $P(x)class_i$  احتمال وقوع هر طبقه کلاس خشکسالی و  $|I_i|$  شدت خشکسالی همان خشکسالی و  $W$  وزن طبقه مورد نظر می‌باشد.

#### ۲-۲-۲ آسیب‌پذیری خشکسالی

آسیب‌پذیری مجموعه‌ای از شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که حساسیت یک محیط به مخاطره را تعیین می‌کند (برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (ISDR)، ۲۰۰۷). بر همین اساس به منظور شناسایی میزان تأثیر هر یک از عوامل آسیب‌پذیری، پرسش‌نامه‌ای متشکل از ۳۵ سؤال در سه بخش اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طراحی شد. پرسش‌نامه در منطقه مورد مطالعه و به صورت تصادفی توسط کشاورزان تکمیل شد. تعداد نمونه لازم برای تکمیل پرسش‌نامه براساس روش‌های آماری و با استفاده از نرم افزار NCSS PASS، ۴۶ عضو تعیین شد (هینتز، ۲۰۰۱).

پس از تکمیل پرسش‌نامه برای تعیین مقدار آسیب‌پذیری منطقه، از روش‌های تحلیل عاملی اکتشافی<sup>۳</sup> و تحلیل عاملی تاییدی<sup>۴</sup> استفاده شد. درجه آسیب‌پذیری، عددی بین صفر تا یک بدست خواهد آمد، هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، به معنی بیشتر بودن میزان درجه آسیب‌پذیری محیط از خشکسالی می‌باشد.

#### ۲-۲-۳ ریسک خشکسالی

پس از محاسبه مخاطره خشکسالی و آسیب‌پذیری آن، با توجه به تعریف ریسک، می‌توان مقدار ریسک خشکسالی را محاسبه نمود؛ بنابراین، ریسک به صورت کمی، طبق معادله (۴) بیان می‌شود:

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \quad (4)$$

#### ۲-۲-۴ داده‌های اقلیمی آینده

برای دستیابی به داده‌های هواشناسی مورد نیاز در دوره‌های آینده، با توجه به میزان دسترسی به داده‌های پروژه CORDEX (دسترسی به خروجی‌های مدل‌های اقلیمی پروژه CORDEX در سال ۱۳۹۶) و نیز براساس اینکه باید تمامی پارامترهای هواشناسی مورد نیاز، داده‌های تاریخی و RCP4.5 و RCP8.5 را داشته باشند، بنابراین تنها ۳ مدل (CNRM-CERFAC, GFDL-ESM2M و ICHEC-EC-EARTH) انتخاب شد (جدول ۳). علت انتخاب این دو سناریو، بررسی ریسک آینده در خوش‌بینانه‌ترین حالت و بدبینانه‌ترین وضعیت ممکن می‌باشد.

1 International Strategy for Disaster Reduction

2 Hintze

3 Exploratory Factor Analysis

4 Confirmatory Factor Analysis

دوره‌ی زمانی آینده در این تحقیق، سال‌های ۲۰۲۰-۲۱۰۰ می‌باشد که به سه دسته زمانی، آینده نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۲۰)، آینده میانی (۲۰۷۳-۲۰۴۷) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۴) تقسیم‌بندی شده است. دلیل این تقسیم‌بندی، به‌منظور مقایسه‌ی مناسب تغییرات میزان ریسک خشکسالی، میان دوره پایه (سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۸۹) و دوره‌های زمانی آتی، می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده شده در این مطالعه

تفکیک (رزولوشن) افقی	نام مدل	شناسه موسسه	کشور	مرکز مدلسازی (یا گروه مدلسازی)
۰/۴۴ * ۰/۴۴	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	France	Modèle du Centre National de Recherches Météorologiques - Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
۰/۴۴ * ۰/۴۴	GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
۰/۴۴ * ۰/۴۴	EC-EARTH	EC-EARTH	Ireland	EC-EARTH consortium

پس از استخراج داده‌ها، ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب نتش - ساتکلیف (مک کوین<sup>۱</sup>)، به منظور بررسی توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی برای آینده، محاسبه شد. در مطالعات تغییر آب و هوا، منابع مختلفی از عدم قطعیت وجود دارد که بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد. یکی از منابع عدم قطعیت، خطای مدل‌هاست است. به‌منظور از بین بردن این عدم قطعیت، یکی از روش‌ها، ترکیب کردن مدل‌های اقلیمی است. از روش‌های رایج برای این منظور، روش وزن‌دهی میانگین‌های مشاهداتی دما و بارش در قالب رویکرد بی‌زین می‌باشد (معادله ۱-۴ و ۲-۴) (لئو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷، هاشمی-آنا و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). طرحواره این روش برگرفته از مطالعه هاشمی - آنا و همکاران در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود.

$$W_i = \frac{\frac{i}{\Delta p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta p_i}} \quad ۴-۱$$

$$W_i = \frac{\frac{i}{\Delta T_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta T_i}} \quad ۴-۲$$

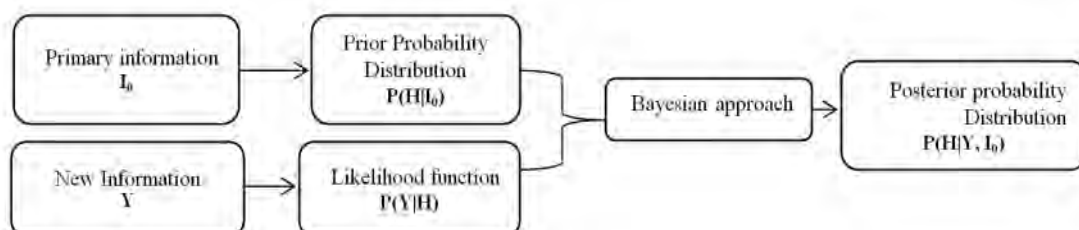
1 McCuen et al

2 Luo et al

3 Hashemi-Ana et al



در معادلات فوق،  $p$  معرف بارش و  $T$  معرف دما می‌باشد.  $\Delta p_i$  اختلاف میانگین بارش شبیه‌سازی شده در دوره آینده از میانگین بارش مشاهداتی مقیاس‌های زمانی دوره پایه است (i).  $N$  نیز تعداد مدل‌ها می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره گام‌های روش بیزین برای آنالیز عدم قطعیت در این تحقیق (هاشمی - انا و همکاران)

## ۲-۲-۵ شبیه‌سازی رواناب دوره‌های آتی

برای دستیابی به داده‌های رواناب دوره‌های آتی از مدل IHACRES استفاده شده است. این مدل، یک مدل پارامتری بارش- رواناب است که در بیشتر مناطق آب و هوایی کاربرد دارد. با توجه به داده‌های ورودی اندک و نیز صرف زمان کم، به آسانی در بسیاری از حوضه‌های آبخیز، این مدل به کار برده می‌شود (لیتوود و همکاران، ۱۹۹۷). به منظور بررسی صحت‌سنجی نتایج از ضریب همبستگی و آزمون پارامتری T student استفاده شد.

## ۲-۲-۶ پیش‌بینی و مدل‌سازی ریسک خشکسالی

به منظور پیش‌بینی ریسک خشکسالی از دو روش استفاده شد. در روش نخست (روش مستقیم)، همانند دوره پایه، برای دوره‌های آتی، مقادیر خشکسالی، مقدار مخاطره و در انتها ریسک خشکسالی محاسبه می‌شود. در روش دوم، با کمک دو روش آماری، مدل‌سازی ریسک خشکسالی براساس ریسک خشکسالی دوره پایه، انجامش و سپس به کمک مدل‌های بدست آمده، ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی، پیش‌بینی شد.

در مدل‌سازی ریسک خشکسالی با توجه به اینکه مقدار درجه آسیب‌پذیری بدست آمده از پرسش‌نامه، در طی زمان‌های مختلف ثابت در نظر گرفته شده است؛ از این رو مدل‌سازی مخاطره انجام شده است. با توجه به اینکه مخاطره خشکسالی براساس شاخص‌های خشکسالی بدست می‌آید و هر شاخص خشکسالی، خود متأثر از پارامترهای هواشناسی می‌باشد؛ از این رو، با کمک روش‌های آماری مدل‌سازی،

ابتدا پارامترهای مؤثر در هر مخاطره خشکسالی (هواشناسی و هیدرولوژیک) شناسایی و سپس مدل مناسب برای پیش‌بینی بدست آمد. پس از پیش‌بینی مخاطره، با ضرب کردن مقدار آسیب‌پذیری که در قسمت قبل توضیح داده شد، مقدار ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی محاسبه می‌شود. به منظور مدل‌سازی ریسک خشکسالی از دو روش مدل‌سازی *Bootstrapped Quantile Regression* (با تکرار ۵۰۰)، *loess Nonparametric Regression* استفاده شد.

*Bootstrapped Quantile Regression*: مدل‌های رگرسیون معمولی، برای میانگین شرطی برازش داده می‌شود، اما رگرسیون چندکی، برای چندک‌های شرطی بکار می‌رود. مهم‌ترین کاربرد رگرسیون چندکی، شناسایی شکل توزیع متغیر وابسته‌ی مدل در سطوح گوناگون می‌باشد. ویژگی دیگر این روش مدل‌سازی، بوت استرپ کردن است. در واقع با این روش، تعداد نمونه‌ها را افزایش داده تا از این طرق با ایجاد نمونه‌های فراوان، شرایط نمونه را به شرایط جامعه نزدیک کرده و با در نظر گرفتن تمامی حالات تشکیل نمونه، از صحت برآورد ضرائب و برآورد فاصله اطمینان برای ضرائب، اطمینان بیشتری پیدا کرد (افرون، ۲۰۰۰). چندک‌های مورد بررسی در این مطالعه، چندک‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۹ می‌باشد.

*Loess Nonparametric Regression*: *Loess* یک مدل تعمیم یافته و متداول از رگرسیون محلی یا رگرسیون چند جمله‌ای است که به رگرسیون میانگین متحرک نیز مشهور است. *LOESS* یک روش رگرسیون غیر پارامتری است. در رگرسیون پارامتری، شکل مشخصی برای پارامترهای مدل، در نظر گرفته می‌شود در حالی که در رگرسیون ناپارامتری شکل مشخصی برای پارامترهای مدل در نظر گرفته نمی‌شود. در روش ناپارامتری، داده‌ها خود از میان مدل‌ها، بهترین مدل را برمی‌گزینند و این حالت باعث افزایش کارایی روش رگرسیون ناپارامتری نسبت به رگرسیون پارامتری می‌شود.

از میان مدل‌های بدست آمده از چهار چندک استفاده شده ( $q=25, 50, 75, 99$ ) در این تحقیق، چندکی که مدل مناسب‌تری براساس ضریب توافقی ویلموت ( $d$ )،  $RMSE$  و  $MAD$  را داشته‌است، انتخاب گردید. برای تعیین توانایی و مناسب بودن مدل‌ها از آماره‌های ذیل استفاده شده است.

mathematical equation	Numerical statistics
$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{\sum_{i=1}^N ( p_i - \bar{o}  + ( o_i - \bar{o} )^2)}$	Villmott's Index of Agreement (d)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{N}}$	RMSE
$MSEP = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{N}$	MSEP
$MAD = \frac{( (p_i - o_i) - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N} )}{N}$	MAD
$MARE = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N}}{N}$	MARE

در تمامی روابط فوق  $p_i$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و  $o_i$  مقادیر مشاهده شده می‌باشند.  $N$  نیز تعداد نمونه می‌باشد.

براساس این روابط ریاضی، توانایی و مناسب بودن مدل‌ها مشخص می‌شود. براساس آماره‌های عددی MAD، MARE، RMSE و MSEP بهترین وضعیت، مقدار صفر (۰) و بدترین  $\infty$  است. براساس شاخص توافق ویلموت، مقدار یک (۱) بهترین وضعیت مقدار ۰ بدترین وضعیت است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج بررسی توانایی مدل‌های اقلیمی مورد بررسی و توسعه یک مدل ترکیبی

برای بررسی توانایی پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی استفاده شده، از ضریب همبستگی ( $R$ )، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب نتش - ساتکلیف (NS) استفاده شد. نتایج این ضرایب حاکی از توانایی کامل مدل‌های دمایی (دمای حداقل، دمای حداکثر و متوسط دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین) می‌باشد؛ اما هر سه مدل بارش استفاده شده در این مطالعه، نیازمند تصحیح می‌باشند، از این رو با استفاده از روش تغییر فاکتور، سعی در تصحیح مقادیر بارش برای هر سه مدل شد. پس از تصحیح، سپس با استفاده از روش میانگین وزنی با رویکرد بیزین، مدل ترکیبی برای بارش و پارامترهای دمایی مشخص گردید. در واقع براساس این روش، وزن هر یک از مدل‌ها تعیین و با استفاده از میانگین وزنی و براساس هر سه مدل، مقدار نهایی پارامتر مورد نظر محاسبه می‌شود. براساس نتایج این بخش، برای داده‌های بارش، با توجه به سناریوی RCP4.5 مدل ICHEC-EARTH بیش‌ترین ضریب را در مدل ترکیبی داشته است، براساس سناریو RCP8.5 مدل مناسب، در سه دوره آتی متفاوت است، اما به صورت کلی می‌توان گفت در آینده نزدیک مدل CNRM، در آینده میانی هر دو مدل ICHEC-EARTH و CNRM به صورت یکسان در مدل تأثیر داشته‌اند و در آینده

دور مدل ICHEC-EARTH دارای بیشترین تأثیر می‌باشد. برای هر سه پارامتر دمایی، و براساس هر دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه، مدل GFDL-ESM2M بیشترین وزن را در مدل ترکیبی داشته است.

### ۳-۲- نتایج مدل IHACRES

نتایج این بخش نشان داد که براساس دو سناریوی انتشار، مقدار رواناب در سال‌های آتی تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. افزایش دما و بدنبال آن، افزایش احتمال وقوع بارش‌های حادی در منطقه مورد مطالعه شاید دلیلی برای تغییرات کم در مقدار رواناب در سال‌های آتی باشد، که افزایش دما در سال‌های آینده براساس خروجی مدل‌های CORDEX استفاده شده در این تحقیق، تأیید می‌شود. از دیگر دلایل احتمالی عدم کاهش رواناب، می‌توان به افزایش ذوب برف زیر حوضه‌های مجاور در اثر افزایش دما دانست که به صورت جریان‌های زیر سطحی و یا سطحی وارد منطقه می‌شوند.

جدول ۴- متوسط مقادیر رواناب، بارش سالانه، دمای حداقل، دمای حداکثر و دما در ارتفاع ۲ متری از سطح

زمین در دوره پایه و دوره‌های آتی بر مبنای RCP4.5 و RCP8.5

پارامتر	دوره پایه	RCP	آینده نزدیک	آینده میانی	آینده دور
رواناب (m <sup>3</sup> /s)	۰/۰۷	RCP4.5	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶
		RCP8.5	۰/۰۷	۰/۰۷۱	۰/۰۶
بارش سالانه (mm)	۱۳/۴	RCP4.5	۱۳/۹۳	۱۲/۷۶	۱۲/۸۳
		RCP8.5	۱۳/۴۹	۱۳/۹۴	۱۲/۸۸
دمای حداقل (C°)	۷/۵	RCP4.5	۸/۷۲	۹/۴۷	۹/۷۹
		RCP8.5	۸/۹۶	۱۰/۲۵	۱۱/۸۴
دمای حداکثر (C°)	۲۲	RCP4.5	۲۳/۰۴	۲۴/۰۷	۲۴/۴۸
		RCP8.5	۲۳/۵۸	۲۵/۰۲	۲۶/۷۱
دما در ارتفاع ۲ متری سطح زمین (C°)	۱۴/۷	RCP4.5	۱۵/۸۴	۱۶/۷۴	۱۷/۱۰
		RCP8.5	۱۶/۲۴	۱۷/۶۱	۱۹/۲۸

### ۳-۳- آسیب‌پذیری خشکسالی

درجه آسیب‌پذیری براساس پرسش‌نامه، مقدار ۰/۵۳ برای زیرحوضه آبریز افین بدست آمد. در واقع، این عدد نشان می‌دهد که در حدود نیمی از آسیب‌پذیری زیرحوضه به دلیل عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی این زیرحوضه می‌باشد. این درجه از آسیب‌پذیری در واقع میانگینی از حساسیت سه عامل

می‌باشد. به صورت مجزا درجه آسیب‌پذیری برای هر یک از عوامل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی به ترتیب عبارتند از ۰/۳۰، ۰/۳۴ و صفر. براین اساس، عامل زیست محیطی سهم بیشتری در آسیب‌پذیری زیرحوضه افین را دارا می‌باشد. در مقابل عامل اجتماعی تأثیری در آسیب‌پذیری منطقه ندارد. آسیب‌پذیری برای دوره پایه ۰/۵۳ و برای دوره آتی، بازه ۰/۳۶ تا ۰/۷۰ در نظر گرفته شد.

(Vulnerability  $\pm$  standard deviation)

### ۳-۴- ریسک خشکسالی براساس دو روش مستقیم و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی

نتایج این بخش نشان می‌دهد که براساس شاخص خشکسالی eRDI در دوره‌های آتی شدت وقایع ریسک خشکسالی نسبت به دوره پایه نسبتاً بیشتر می‌شود، بدین ترتیب که تعداد و شدت وقایع خشکسالی (شامل چهار وضعیت خشکسالی خیلی شدید، شدید، متوسط و خفیف) در دوره آینده دور نسبت به دو دوره آینده میانی و نزدیک براساس سناریوهای انتشار بدبینانه و خوش‌بینانه بیشتر می‌شود. همچنین نتایج وقوع خشکسالی‌ها و شدت‌های آن‌ها در دوره‌های آتی نشان داد که شدت خشکسالی‌ها متأثر از سناریوی انتشار نیز می‌باشد، بدین ترتیب که با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، شدت و یا حتی تعداد وقایع خشکسالی‌ها افزایش می‌یابد که این مطلب در نتایج بدست آمده از شاخص خشکسالی SPEI و eRDI کامل نمایان است، چرا که در این شاخص علاوه بر بارش، پارامترهای دمایی نیز دخیل هستند. با افزایش گازهای گلخانه‌ای حبس شدن گرمای (مادون قرمز) منعکس شده از سطح زمین افزایش و در نتیجه باعث بالارفتن دماهای سطحی خواهد شد.

نتایج ریسک خشکسالی نشان می‌دهد که در فصل زمستان بیشترین تغییرات تعداد دفعات خشکسالی نسبت به دوره پایه حادث خواهد شد. براساس شاخص SRI نیز ریسک‌های خیلی شدید ناشی از خشکسالی‌های خیلی شدید در هیچ یک از مقیاس‌های زمانی مورد بررسی در سه دوره آتی براساس هر دو سناریوی انتشار، مشاهده نشد. همچنین مشخص شد که در دوره آینده نزدیک، فراوانی وقوع ریسک خشکسالی‌های شدید و متوسط نسبت به دوره پایه و دو دوره زمانی آینده میانی و دور بیشتر خواهد بود. باتوجه به شاخص SPEI و eRDI که چهار پارامتر متوسط دما، متوسط دمای حداقل، متوسط دمای حداکثر و بارش برای محاسبه‌ی مقدار آن لازم می‌باشد، براساس روش‌های مدل‌سازی و انتخاب بهترین مدل، پارامترهای مؤثر در برآورد مخاطره خشکسالی در هر یک از مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه، مشخص و پیش‌بینی میزان مخاطره و پس از آن، محاسبه ریسک صورت پذیرفت.

به منظور صحت سنجی مدل‌ها، ۱۰ سال آخر دوره پایه برای این منظور استفاده شد. بدین ترتیب که ۲۳ سال نخست (۲۰۰۵-۱۹۸۳) برای انتخاب مدل و ۱۰ سال پس از آن (۲۰۱۵-۲۰۰۶) برای صحت سنجی مدل‌ها استفاده شد.

باتوجه به نتایج بدست آمده، همراستایی قوی بین مقادیر مخاطره حاصل از مدل‌های پیش‌بینی و مقادیر مخاطره مشاهده شده، براساس سه شاخص خشکسالی مورد مطالعه و براساس هر دو سناریو دیده می‌شود. براساس روش BQR و با توجه به آماره‌های شاخص توافق ویلموت (RMSE، d) و MAD، مناسب‌ترین مدل در میان چهار مدل (q=25,50,75,99)، مدل با چندک ۵۰ (چارک میانه) در بیشتر مقیاس‌ها و در دو شاخص خشکسالی هواشناسی، و برای شاخص خشکسالی هیدرولوژیک، مدل چندک ۹۹، تعیین شد (در جداول ۵، ۶ و ۷ چارک مناسب تعیین شده برای هر مقیاس به تفکیک شاخص‌ها ذکر شده است). در این قسمت نیز ابتدا پارامترهای مؤثر بر شاخص‌های SPEI و eRDI مشخص و سپس مدل‌سازی انجام شد. براساس شاخص SPEI، در ۴ چندک، بارش، پارامتر مؤثر شناخته شد. تنها در مقیاس زمانی ۹ ماهه، متوسط دمای حداقل و متوسط دما در نزدیکی سطح زمین موثر بوده است. با توجه به شاخص eRDI در فصل زمستان علاوه بر بارش، متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل و متوسط دما در نزدیکی سطح زمین مؤثر بوده است. در سایر مقیاس‌ها، بارش، پارامتر مؤثر برای پیش‌بینی می‌باشد.

براساس روش رگرسیون ناپارامتری Loess، در دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI با توجه به اینکه چهار متغیره می‌باشد، به منظور شناسایی پارامتر مؤثر در مدل، نخست از روش رگرسیون ناپارامتری ساده بوت استرپ شده (با تکرار ۵۰۰)، پارامتر مؤثر شناسایی و سپس مدل Loess برای پارامتر مؤثر اجرا شد. در تمامی پنج مقیاس زمانی براساس دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI، پارامتر بارش، تنها پارامتر مؤثر شناخته شد. به منظور انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی براساس دو روش مذکور، از آماره‌های عددی تعیین به منظور تعیین توانایی و مناسب بودن مدل‌ها استفاده شد. نتایج این بخش در جداول ۵، ۶ و ۷ گزارش شده است. همانطور که از جداول مشخص است، در بیشتر مقیاس‌های زمانی و برای سه شاخص خشکسالی SPEI، eRDI و SRI، مدل رگرسیون ناپارامتری Loess بیش‌ترین توانایی را در پیش‌بینی مخاطره داشته است.

براساس نتایج این بخش نیز می‌توان گفت که روش رگرسیون ناپارامتری Loess در شاخص SRI اگرچه در بیشتر مقیاس‌ها بعنوان مدل مناسب شناسایی نشده است، اما مقدار برآورد میزان مخاطره برای سال‌های آتی را مانند روش مستقیم، با دامنه بیشتری از تغییرات نشان می‌دهد.

جدول ۵- شاخص توافقی ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص SPEI

d	MARE	MAD	MSEP	RMSE	مدل	گام زمانی
0.94	0.33	0.03	0	0.04	LOESS	زمستان
0.72	0.61	0.06	0.01	0.08	BQR(q=50)	
0.78	1.07	0.04	0.01	0.07	LOESS	پاییز
0.85	1.29	0.05	0	0.06	BQR(q=50)	
0.95	0.43	0.03	0	0.04	LOESS	بهار
0.74	1.24	0.07	0.01	0.08	BQR(q=50)	
0.52	2.08	0.09	0.01	0.09	LOESS	۹ ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
0.62	2.38	0.1	0.01	0.12	BQR(q=99)	
0.96	0.34	0.03	0	0.03	LOESS	سالانه
0.89	0.48	0.04	0	0.2	BQR(q=25)	

۳-۵- نتایج مقایسه میان مقادیر ریسک خشکسالی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های پیش‌بینی با ریسک خشکسالی از

روش مستقیم در سال‌های آتی

در این بخش به مقایسه میان نتایج ریسک خشکسالی محاسبه شده به روش مستقیم با ریسک خشکسالی‌های پیش‌بینی شده توسط روش‌های مدل‌سازی پرداخته شده است. برای این منظور از مقدار  $p$ -value آزمون T-student و ضریب همبستگی استفاده شده است. (جداول ۸ و ۹)

باتوجه به نتایجی که در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است، می‌توان دریافت که در محاسبه ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی براساس روش مستقیم و روش مدل‌سازی با استفاده از مدل مناسب، همراستایی قوی مشاهده می‌شود (باتوجه به بالا بودن مقادیر ضریب همبستگی). براساس دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه، در مقیاس زمانی سالانه و فصل بهار، مقدار کمتر همراستایی مشاهده می‌شود. براساس نتایج آزمون T-student نیز می‌توان گفت که اختلاف معنی‌داری در مقدار برآورد ریسک خشکسالی براساس هر دو روش، وجود ندارد، تنها در شاخص eRDI در مقیاس‌های زمانی بهار و ۹ ماهه منتهی به فصل برداشت زرشک براساس دو سناریوی انتشار و مقیاس سالانه شاخص eRDI، اختلاف معنی‌دار مشاهده می‌شود که دلیل این امر می‌تواند به دلیل پراکندگی بیشتر بارش در این مقیاس‌ها و توأم شدن آن با تغییرات دمایی باشد، در حالی که در مدل‌های انتخابی برای این مقیاس‌ها تنها پارامتر بارش، بعنوان متغیر مؤثر شناسایی شده است اما با توجه به همراستایی‌های بالا در این مقیاس‌ها، می‌توان گفت که مدل‌ها با اعمال اصلاحاتی مناسب هستند.

جدول ۶- شاخص توافقی ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص eRDI

d	MARE	MAD	MSEP	RMSE	مدل	گام زمانی
0.72	0.51	0.05	0.01	0.08	LOESS	زمستان
0.55	0.87	0.09	0.01	0.11	BQR(q=75)	
0.72	0.69	0.03	0.01	0.08	LOESS	پاییز
0.83	1.44	0.06	0	0.07	BQR(q=50)	
0.93	0.51	0.03	0	0.05	LOESS	بهار
0.72	1.29	0.08	0.01	0.09	BQR(q=50)	
0.96	0.24	0.02	0	0.03	LOESS	۹ ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
0.92	0.44	0.03	0	0.04	BQR(q=50)	
0.60	0.63	0.05	0.01	0.09	LOESS	سالانه
0.62	0.70	0.06	0.01	0.08	BQR(q=50)	

جدول ۷- شاخص توافقی ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص SRI

d	MARE	MAD	MSEP	RMSE	مدل	گام زمانی
0.17	1.09	0.18	0.04	0.2	LOESS	زمستان
0.41	0.66	0.11	0.02	0.12	BQR(q=99)	
0.99	0.04	0.01	0	0.01	LOESS	پاییز
0.49	0.6	0.1	0.01	0.11	BQR(q=99)	
0.51	0.68	0.12	0.03	0.18	LOESS	بهار
0.88	0.33	0.06	0.01	0.08	BQR(q=99)	
0.40	0.92	0.15	0.03	0.19	LOESS	۹ ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
0.67	0.40	0.06	0.01	0.07	BQR(q=99)	
0.45	0.73	0.11	0.02	0.15	LOESS	سالانه
0.67	0.44	0.07	0.01	0.08	BQR(q=99)	

جدول ۸- مقدار آزمون T-student و ضریب همبستگی (R) میان مقادیر ریسک خشکسالی آینده بر مبنای روش

مستقیم و مدل مناسب سه شاخص خشکسالی SPEI، eRDI و SRI بر اساس RCP4.5

SRI		eRDI		SPEI		گام زمانی
مدل مناسب	R p-value	مدل مناسب	R p-value	مدل مناسب	R p-value	
BQR	0.56 0	Loess	0.71 0.003	Loess	0.92 0	زمستان
Loess	0.90 0	BQR	0.81 0	Loess	0.74 0	پاییز
BQR	0.49 0	Loess	0.83 0.2	Loess	0.86 0.02	بهار
BQR	0.75 0	Loess	0.76 0.16	BQR	0.95 0	۹ ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
BQR	0.72 0	BQR	0.48 0.03	Loess	0.69 0.66	سالانه



جدول ۹- P مقدار آزمون T-student و ضریب همبستگی (R) میان مقادیر ریسک خشکسالی آینده بر مبنای روش مستقیم و مدل مناسب سه شاخص خشکسالی SPEI، eRDI و SRI بر اساس RCP8.5

SRI		eRDI		SPEI		گام زمانی
مدل مناسب	R	مدل مناسب	R	مدل مناسب	R	
	p-value		p-value		p-value	
BQR	0.73	Loess	0.75	Loess	0.91	زمستان
	0		0.005		0	
Loess	0.94	BQR	0.47	Loess	0.74	پاییز
	0		0.05		0	
BQR	0.78	Loess	0.88	Loess	0.94	بهار
	0		0.24		0.01	
BQR	0.76	Loess	0.75	BQR	0.35	۹ ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
	0		0.62		0	
BQR	0.74	BQR	0.36	Loess	0.68	سالانه
	0		0.004		0.17	

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه، با هدف شناسایی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک و توسعه مدلی برای پیش‌بینی آن به منظور پیشگیری از بروز خسارات شدید و جدی به صورت موردی در زیر حوضه آبریز افین انجام شد. برای این منظور نخست از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک بعنوان ابزاری برای اندازه‌گیری شدت خشکسالی‌ها و به دنبال آن محاسبه میزان مخاطره ریسک خشکسالی‌های استفاده شد. آسیب‌پذیری نیز با کمک پرسش‌نامه از کشاورزان منطقه تهیه و در انتها میزان ریسک خشکسالی برای دوره زمانی پایه محاسبه گردید. برای پیش‌نگری میزان ریسک خشکسالی برای دوره‌های زمانی آتی، نیاز به داده‌های اقلیمی و هواشناسی دوره‌های زمانی آتی بود که از این رو از مقادیر خروجی پروژه اقلیمی CORDEX و نیز مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. نتایج بررسی سه مدل اقلیمی صحت و درستی سه پارامتر دمایی را تأیید نمود ولیکن پارامتر بارش نیز با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و پراکندگی بارش در منطقه افین، پس از اعمال تصحیحات، قابل استفاده گردید. در پیش‌نگری‌ها از مقادیر رواناب حاصله از مدل IHACRES استفاده شد، چراکه در مقایسه میان پارامتر رواناب براساس خروجی مدل‌های اقلیمی CORDEX و مدل بارش-رواناب IHACRES، نتایج بدست آمده از روش IHACRES دقت بالاتری را نشان داد. رزاقیان و همکاران (۱۳۹۵) و پور محمدی و همکاران (۱۳۹۶) کاهش رواناب را برای سال-های آتی با استفاده از دو روش مدل‌سازی IHACRES و الگوریتم احتساب خاک پیش‌بینی نموده‌اند، در حالی که لکزائیان‌پور و همکاران (۱۳۹۵) و بی‌نیش و همکاران (۱۳۹۷)، افزایش میزان رواناب را برای

سال‌های آتی پیش‌بینی نموده‌اند؛ اما در تحقیق حاضر، نتایج پیش‌نگری مقدار جریان سطحی براساس مدل هیدرولوژیکی IHACRES حاکی از عدم وجود تغییر قابل ملاحظه‌ای براساس دو سناریوی انتشار در مقدار رواناب برای سال‌های آتی است.

با توجه به هدف اصلی این تحقیق، سعی در توسعه مدلی برای پیش‌بینی میزان ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی شد. براین اساس و به منظور افزایش دقت در پیش‌بینی میزان ریسک خشکسالی‌ها، از دو روش مدل‌سازی استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی هر یک از روش‌های مورد استفاده، برآورد مخاطره برای ده سال اخیر (۲۰۱۵-۲۰۰۶) انجام شد. نتایج بخش صحت‌سنجی مدل‌ها، نشان داد که رگرسیون ناپارامتری LOESS در بیشتر مقیاس‌های زمانی دو شاخص خشکسالی هواشناسی دقت بیشتری داشته‌است. پس از این مدل، مدل رگرسیون نیمه پارامتری چندکی بوت استرپ شده، مناسب تشخیص داده شد. برای پارامتر رواناب، روش مدل‌سازی رگرسیون نیمه پارامتری بوت استرپ شده با چندک ۹۹ در بیشتر مقیاس‌های زمانی با دقت بالاتری توانسته است، برآورد میزان مخاطره را داشته باشد. بر اساس نتایج این بخش می‌توان گفت که روش‌های مدل‌سازی امکان برآورد و پیش‌نگری میزان ریسک خشکسالی‌ها را دارند، تنها بسته به انتخاب روش مدل‌سازی مناسب، می‌توان دقت پیش‌گویی‌ها را افزایش داد. در پیش‌نگری مقادیر مخاطره برای دوره‌های زمانی آتی با استفاده از مدل مناسب انتخاب شده در هر مقیاس زمانی و براساس هر شاخص خشکسالی، با مقادیر مخاطره دوره آتی که به روش مستقیم بدست آمد، همراستایی قوی مشاهده شد، اما اختلاف میانگین میان این دو مقدار معنادار شده است. با توجه به اینکه مقادیر مخاطره روش مستقیم خود براساس پیش‌نگری متغیرهای هواشناسی هستند و نتایج مدل‌ها نیز براساس پیش‌نگری‌های متغیرهای هواشناسی و عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب مدل هستند، شاید دلیلی بر معنی‌دار شدن میانگین‌ها باشد. دوره آماری طولانی مورد مقایسه (دوره ۸۱ ساله) می‌تواند عامل دیگر ایجاد این اختلاف‌ها باشد. دلیل اهمیت دقت در انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌نگری ریسک به دو دلیل است، نخست اینکه خشکسالی به‌تنهایی نمی‌تواند یک خطر و فاجعه محسوب شود، اما آسیب‌پذیری و تأثیرات خشکسالی بر محیط است که این پدیده را تبدیل به یک خطر می‌کند، دوم؛ اگرچه نمی‌توان مانع از وقوع حوادث طبیعی چون خشکسالی شد اما می‌توان با داشتن آگاهی از وضعیت ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی، تمهیدات لازم برای سازگاری با این پدیده را به منظور به حداقل رساندن اثرات منفی واقعه خشکسالی فراهم ساخت.

## کتابنامه

- بینش، ن؛ نیک‌سخن، م.ح؛ سارنگ، امین؛ ۱۳۹۷. مطالعه رژیم بارش و دبی حداکثر رواناب شهری در شرایط اقلیمی آینده (مطالعه موردی: حوضه سیل‌برگردان غرب). نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۸۱۵، ۵۰-۸۲۶.
- پورمحمدی، س؛ دستورانی، م.ت؛ مساح بوانی، ع.ر؛ گودرزی، م؛ جعفری، ه؛ رحیمیان، م.ح؛ ۱۳۹۶. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوضه آبریز تویسرکان همدان). آبخیزداری ایران، ۳۷، ۱-۱۳.
- خلیلی، ن؛ رضایی پزند، ح؛ درخشان، ه؛ داوری، ک؛ ۱۳۹۶. توسعه چارچوبی برای ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی بر گندم دیم. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴، ۵۹-۷۰.
- رزاقیان، هادی؛ شاهدی، ک؛ حبیب‌نژادروشن، م؛ ۱۳۹۵. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز بابلرود با استفاده از مدل IHACRES. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۷، ۱۵۹-۱۷۲.
- لکزیان‌پور، غ.ح. محمدرضاپور، ا؛ مالمیر، م؛ ۱۳۹۵. ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلوچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه جغرافیا و توسعه، ۴۲، ۱۸۳-۱۹۸.
- مساعدی، ا؛ کواکبی، غ؛ عبدالله‌زاده، س آشکارسازی تغییرات اقلیمی براساس آزمون آماری من-ویتنی در شهر مشهد. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، ۲۰۱۱.
- نوقایی، ج؛ هادی نوقایی؛ ۱۳۸۷. نکاتی چند در مورد برآورد حجم نمونه و معرفی نرم افزار مربوطه. نشریه دانشجویی آمار (ندا)، ۴، ۱۳-۲۱.

- ANDERSON-COOK, C. M. & PREWITT, K., 2005. Some guidelines for using nonparametric methods for modeling data from response surface designs. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 4, 12.
- Apurv, T. and X. Cai., 2019, "Evaluation of the Stationarity Assumption for Meteorological Drought Risk Estimation at the Multidecadal Scale in Contiguous United States." *Water Resources Research* 55(6): 5074-5101.
- ARNELL, N. W., 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global environmental change*, 9, 5-23.
- BACHMAIR, S., SVENSSON, C., PROSDOCIMI, I., HANNAFORD, J. & STAHL, K. 2017. Developing drought impact functions for drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1947-1960.
- CHOPRA, P. Drought risk assessment using remote sensing and GIS: a case study of Gujarat. 2006. ITC.
- Dai, M., et al., 2020. "Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics." *Agricultural Water Management* 231: 106003.
- EFRON, B. 2000. The bootstrap and modern statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 95, 1293-1296.
- FAN, G., ZHANG, Y., HE, Y. & WANG, K. 2017. Risk Assessment of Drought in the Yangtze River Delta Based on Natural Disaster Risk Theory. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017.
- FOX, J. & WEISBERG, S., 2018. An R companion to applied regression, Sage Publications.

- HASHEMI-ANA, S. K., KHOSRAVI, M. & TAVOUSI, T., 2015. Validation of AOGCMs capabilities for simulation length of dry spells under the climate change in Southwestern area of Iran. *Open J Air Pollut*, 4, 76-85.
- KIM, H., PARK, J., YOO, J. & KIM, T.-W., 2015. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: a case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research*, 9, 28-35.
- LABUDOVA, L., SCHEFCZYK, L. & HEINEMANN, G. The comparison of the SPI and the SPEI using COSMO model data in two selected Slovakian river basins. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- LIN, M.-L. & CHEN, C.-W., 2011. Using GIS-based spatial geocomputation from remotely sensed data for drought risk-sensitive assessment. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7, 657-668.
- LITTLEWOOD, I., DOWN, K., PARKER, J. & POST, D. 1997. IHACRES—Catchment-scale rainfall-streamflow modelling (PC version) Version 1.0—April 1997. *The Australian National University, Institute of Hydrology and Centre for Ecology and Hydrology*.
- LUBIS, M., TAKI, H., ANUROGO, W., PAMUNGKAS, D., WICAKSONO, P. & APRILLIYANTI, T. Mapping the distribution of potential land drought in Batam Island using the integration of remote sensing and geographic information systems (GIS). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. IOP Publishing, 012012.
- MA, M., REN, L., SINGH, V. P., YUAN, F., CHEN, L., YANG, X. & LIU, Y. 2016. Hydrologic model-based almer indices for drought characterization in the Yellow River basin, China. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30, 1401-1420.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J. & KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993. American Meteorological Society Boston, MA, 179-183.
- PANDEY, R. P., PANDEY, A., GALKATE, R. V., BYUN, H.-R. & MAL, B. C., 2010. Integrating hydro-meteorological and physiographic factors for assessment of vulnerability to drought. *Water resources management*, 24, 4199-4217.
- PANDEY, S., PANDEY, A., NATHAWAT, M., KUMAR, M. & MAHANTI, N., 2012. Drought hazard assessment using geoinformatics over parts of Chotanagpur plateau region, Jharkhand, India. *Natural hazards*, 63, 279-303.
- PEI, W., FU, Q., LIU, D., LI, T.-X., CHENG, K. & CUI, S., 2017. Spatiotemporal analysis of the agricultural drought risk in Heilongjiang Province, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14.
- PRATHUMCHAI, K., HONDA, K. & NUALCHAWEE, K. Drought risk evaluation using remote sensing and GIS: a case study in Lop Buri Province. 22nd Asian conference on remote sensing, 2001. 9.
- REDUCTION, U. N. S. F. D., 2007. Drought risk reduction framework and practices: Contributing to the implementation of the hyogo framework for action. UNISDR Geneva (CH).
- SAMANI, Z., 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126, 265-267.
- SHAHID, S. & BEHRAWAN, H. 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards*, 46, 391-413.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. & MILLER, H. L., 2007. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge.

- TIGKAS, D., VANGELIS, H. & TSAKIRIS, G., 2017. An enhanced effective reconnaissance drought index for the characterisation of agricultural drought. *Environmental Processes*, 4, 137-148.
- TSAKIRIS, G., 2007. Practical application of risk and hazard concepts in proactive planning. *European Water*, 19, 47-56.
- UNISDR, U., 2009. Terminology on disaster risk reduction. *Geneva, Switzerland*.
- VALVERDE-ARIAS, O., GARRIDO, A., VALENCIA, J. L. & TARQUIS, A. M. 2018. Using geographical information system to generate a drought risk map for rice cultivation: Case study in Babahoyo canton (Ecuador). *Biosystems Engineering*, 168, 26-41.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. & LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23, 1696-1718.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. & LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23, 1696-1718.
- WENTZ, F. J., RICCIARDULLI, L., HILBURN, K. & MEARS, C., 2007. How much more rain will global warming bring? *Science*, 317, 233-235.
- WILHITE, D. A., HAYES, M. J., KNUTSON, C. & SMITH, K. H. 2000. Planning for Drought: Moving From Crisis to Risk Management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 36, 697-710.
- WU, H. & WILHITE, D. A., 2004. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. *Natural Hazards*, 33, 1-21.
- Wu, Z., et al., 2018. "Climate and drought risk regionalisation in China based on probabilistic aridity and drought index." *Science of the Total Environment* 612: 513-521.
- YADUVANSHI, A., SRIVASTAVA, P. K. & PANDEY, A., 2015. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 14-27.
- YUAN, X.-C., ZHOU, Y.-L., JIN, J.-L. & WEI, Y.-M., 2013. Risk analysis for drought hazard in China: a case study in Huaibei Plain. *Natural hazards*, 67, 879-900.