

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی ریسک خشکسالی هواشناسی با استفاده از تکنیک زنجیره مارکوف و معرفی مدل پیش‌نگری دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: زیرحوضه آبریز افین)

غزاله کواکبی<sup>۱</sup>، محمد موسوی بایگی<sup>۲\*</sup>، امین علیزاده<sup>۳</sup>، ابوالفضل مساعدی<sup>۴</sup>، مهدی جباری نوقابی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۲

### چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی و مکرر اقلیمی است که اثرات متنوعی بر بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست دارد. خشکسالی به‌تنهایی یک چالش محسوب نمی‌شود، بلکه بسته به میزان درجه آسیب‌پذیری و تأثیری که بر بخش‌های مختلف محیط‌زیست ایجاد می‌کند، آغاز کننده یک بحران است. از این‌رو در این مطالعه سعی شده‌است تا با استفاده از تعریف ریسک طبیعی، میزان ریسک خشکسالی برای دوره پایه محاسبه و با استفاده از روش‌های مختلف، بهترین مدل برای پیش‌نگری میزان آن، برای دوره‌های آبی تحت تأثیر اقلیم، برآورد شود. براین اساس با استفاده از دو شاخص خشکسالی هواشناسی SPEI و eRDI میزان مخاطره خشکسالی برای سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۸۳ محاسبه شد. سپس با استفاده از پرسش‌نامه، میزان درجه آسیب‌پذیری برای زیرحوضه آبریز افین که بخشی از زیرحوضه اسفدن (در استان خراسان جنوبی) که خود نیز بخشی از حوضه آبریز مرزی شرق ایران می‌باشد، تعیین گردید. پس از برآورد میزان ریسک در این دوره زمانی، با کمک تکنیک آماری زنجیره مارکوف، خصوصیات ریسک خشکسالی منطقه بدست آمد. با استفاده از چهارروش مدل‌سازی، بهترین مدل پیش‌نگری میزان ریسک خشکسالی مشخص و با استفاده از مقادیر متغیرهای هواشناسی مورد مطالعه بدست آمده از سه مدل اقلیمی پروژه CORDEX، مقدار ریسک خشکسالی برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۱۰۰ پیش‌نگری گردید. نتایج این مطالعه، کاهش میزان ریسک برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۶ و افزایش آن برای سال‌های ۲۰۴۷-۲۱۰۰ را براساس دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۵ نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** پرسش‌نامه، تغییر اقلیم، ریسک طبیعی، ریسک خشکسالی، CORDEX

### مقدمه

(Wilhait, 2004). تأثیر خشکسالی بر کشاورزی، دسترسی به آب و فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی منطقه، به عوامل فیزیولوژیکی، محیطی و اجتماعی بستگی دارد. بنابراین آسیب‌پذیری خشکسالی بستگی به عوامل متعددی نظیر ویژگی‌های توپوگرافی، خاک، زمین مورد استفاده و نیاز آب منطقه‌ای برای فعالیت‌های داخلی، صنعتی و کشاورزی دارد. تجزیه و تحلیل ریسک خشکسالی ترکیبی از تجزیه و تحلیل خطر خشکسالی و تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری خشکسالی است (Shahid and Behrawan, 2008). برای تجزیه و تحلیل ریسک خشکسالی دو مرحله مهم، (۱) راه‌شناسایی وقایع خشکسالی با کمک شاخص‌های خشکسالی (هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک) و (۲) محاسبه احتمال خشکسالی محاسبه می‌باشد. ریسک حاصل قرار گرفتن یک سیستم در مقابل خطر است. این سیستم می‌تواند یک محیط باشد و خطر نیز یک رخداد خشکسالی. مقدار واکنش و پاسخی که محیط به مخاطره می‌دهد بستگی به شدت مخاطره و میزان ویژگی‌های محیطی دارد. این ویژگی‌های محیطی در چهار دسته کلی عوامل اقتصادی، اجتماعی، فیزیکی و محیط زیستی می‌توان قرارداد

در سراسر جهان، خشکسالی در میان تمام خطرات طبیعی از نظر فراوانی افرادی که به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد، رتبه اول را دارد (Pandey et al, 2012). این پدیده یکی از پدیده‌های طبیعی و مکرر اقلیمی در زمین است که اثرات متنوعی بر بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایجاد کرده‌است. (Wu and

- ۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
  - ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
  - ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
  - ۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
  - ۵- استادیار گروه علوم ریاضی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
- (\*)- نویسنده مسئول :  
(Email: mousavib@um.ac.ir)

مناسب از وضعیت خشکسالی در هر منطقه‌ای می‌باشد. در این تحقیق به دو سوال، (۱) آیا امکان مدل‌سازی و پیش‌بینی ریسک خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی بر منابع آب سطحی برای دوره‌های آتی وجود دارد؟ و (۲) آیا اختلاف معنی‌داری بین میزان ریسک وقوع خشکسالی‌های دوره پایه و دوره آتی وجود دارد؟ پاسخ داده خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد بررسی

زیرحوضه آبریز افین 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 واقع شده است و بخشی از زیرحوضه اسفدن که بخشی از حوضه آبریز مرزی شرق ایران می‌باشد. وسعت این حوضه ۶۵۵ کیلومتر مربع است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه در منطقه حدود ۱۵۶/۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد و بنابراین با توجه به دما و بارش ذکر شده و نیز باتوجه اقلیم بندی دومارتن (رابطه ۱)، اقلیم منطقه خشک می‌باشد (علیزاده، ۱۳۹۴).

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

در این رابطه، P بارش سالانه بر حسب میلی‌متر و T متوسط دمای سالانه بر حسب درجه‌سانتی‌گراد می‌باشد. روش مطالعه:

این مطالعه با هدف ارزیابی و مدل‌سازی ریسک خشکسالی هواشناسی و به صورت مطالعه موردی انجام گردید. برای محاسبه مخاطره ریسک خشکسالی‌های هواشناسی از شاخص‌های خشکسالی SPEI<sup>۲</sup> و eRDI<sup>۳</sup> استفاده شد. دوره آماری پایه این مطالعه از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۵ می‌باشد. داده‌های ماهانه متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل، متوسط دما در نزدیکی سطح زمین و بارش، داده‌های مورد استفاده در این مطالعه است که از ایستگاه‌های وزرات نیرو تهیه شده است (جدول ۱). گام‌های زمانی مورد استفاده، گام فصلی زمستان (ژانویه-مارس)، بهار (آوریل-جون)، پاییز (اکتبر-دسامبر)، گام زمانی ۶ ماهه سرد (۶ ماهه منتهی به ماه مارس)، ۶ ماه گرم (۶ ماه منتهی به ماه سپتامبر) و ۱۲ ماهه منتهی به سپتامبر (سالانه) می‌باشد.

در ابتدا آزمون‌های پایه آماری (همگنی، ایستایی، روند، داده پرت و تصادفی بودن) بر روی داده‌های بارش انجام گرفت.

(ISDR, 2007). از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود. نظری فر و همکاران (۱۳۸۷) ریسک وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی را در استان همدان بررسی نمودند. برای این منظور از شاخص بارش استاندارد شده SPI جهت بررسی خشکسالی در ۲۰ ایستگاه با داشتن ۳۰ سال دوره آماری، استفاده کردند. نقشه‌های ریسک وقوع خشکسالی طولانی‌ترین تداوم خشکسالی‌ها و بیش‌ترین شدت را برای مناطق جنوب شرقی، شمال شرقی و شمال غربی منطقه نشان داد. عرفانیان و همکاران (۱۳۹۳) روشی نوین به منظور ارزیابی ریسک خشکسالی برای استان فارس ارائه دادند. هدف از این پژوهش تهیه نقشه خطر خشکسالی استان فارس بود که با ترکیب روش شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و روش آنومالی NDVI انجام گرفت. آقایان و همکاران (۱۳۹۴) در چند نمونه از اقلیم کشور ارزیابی کمی از خشکسالی ارائه دادند. در واقع، هدف از این مطالعه کمی کردن ریسک خشکسالی کشاورزی و مقایسه آن بر اساس نوع محصول و نوع اقلیم بوده‌است. جهت دستیابی به این مهم از مفهوم کمی ریسک که عبارت است از حاصلضرب میزان بلیه در آسیب پذیری استفاده شده‌است. بنابراین در این مطالعه به مقوله ریسک با توجه به هر دو مؤلفه آن یعنی بلیه و آسیب‌پذیری نگریسته شده است. شهید و بهراون در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک در بخش غربی بنگلادش پرداختند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود روشی برای ارزیابی مکانی ریسک خشکسالی در بنگلادش را نشان دادند برای این منظور از واقع یک چارچوب مفهومی که تاکید بر نقش مخاطره و آسیب‌پذیری در تعیین ریسک دارد، را بیان نموده‌اند. براین اساس در ابتدا شاخص خشکسالی SPI در محیط GIS به منظور نشان دادن مخاطره خشکسالی در گام‌های زمانی مختلف تهیه شد. سپس عوامل کلیدی اجتماعی و فیزیکی که آسیب‌پذیری خشکسالی را در بافت بنگلادش تعریف می‌کنند را شناسایی و نقشه‌های موضوعی در سطح منطقه آماده شد (Shahid and Berawan, 2008). پی و همکاران آنالیز مکانی-زمانی ریسک خشکسالی را در استان هیلونگ جیانگ، چین انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه به منظور بهبود پیش‌بینی، یک آنالیز خوشه‌ای با مدل پیش‌بینی فریدمن<sup>۱</sup> را ترکیب کردند. مدل بهبود یافته در تجزیه و تحلیل خطر ریسک خشکسالی کشاورزی در استان هیلونگ جیانگ اعمال شد (Pei et al., 2017).

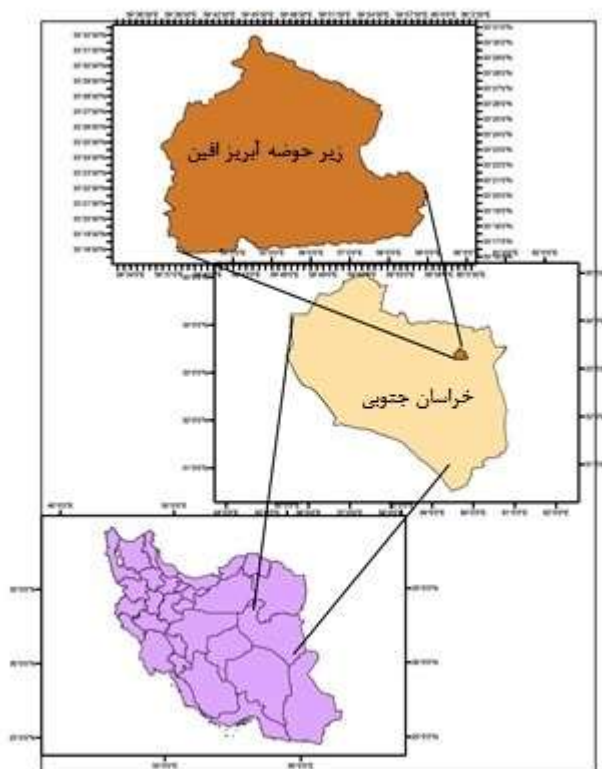
براساس مطالب بیان شده و باتوجه به اینکه ایران کشوری با اقلیم نیمه خشک است و وقوع پدیده‌ی خشکسالی یک امر طبیعی و اجتناب‌ناپذیر است، از این‌رو داشتن آگاهی از میزان خطرات و آسیب‌پذیری خشکسالی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی می‌تواند گامی مهم در کاهش خسارات ناشی از خشکسالی باشد. در این تحقیق از پرسشنامه به‌عنوان روش اصلی در محاسبه آسیب‌پذیری استفاده شده است. محاسبه ریسک ابزاری مفید برای دستیابی به دید دقیق و

2- Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index  
3- effective reconnaissance drought index

1- Friedman

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده برای تهیه داده‌ها و دوره‌ی آماری آن‌ها

نوع ایستگاه	داده	نام ایستگاه	دوره آماری
باران‌سنجی	بارش	افین قائن	۱۳۶۳-۱۳۹۵
تبخیرسنجی	متوسط دمای حداقل متوسط دمای حداکثر متوسط دمای میانگین ماهانه	افین قائن	۱۳۶۳-۱۳۹۵
هیدرومتری	رواناب	افین قائن	۱۳۶۳-۱۳۹۵



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

شاخص eRDI که در سال ۲۰۱۷ توسط تیکس و همکاران ارائه شد، در واقع اصلاح شده شاخص RDI می‌باشد. هر دو این شاخص‌ها (RDI و eRDI)، نسبت بارش به تبخیر- تعرق است (رابطه ۳). بارش موثر به جای مقدار بارش، سبب اصلاح این شاخص در مقایسه با شاخص RDI شده است. این شاخص همانند شاخص خشکسالی RDI ساختار ساده‌ای داشته و نیاز به داده‌های ورودی کم برای برآورد میزان خشکسالی دارد. در این روش بارش موثر به جای بارش، در محاسبات شاخص استفاده می‌شود (Tigkas et al., 2017). برای برآورد میزان بارش موثر روش‌های متفاوتی وجود دارد. در این تحقیق

شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده، نخستین بار توسط ویسنته سرانو و لوپز مورنو به‌عنوان یک شاخص خشکسالی، که به ویژه برای مطالعات اثر گرمایش جهانی بر شدت خشکسالی متناسب است، مطرح شد. برای محاسبه‌ی شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود. سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارش (p) و مقدار تبخیر-تعرق (PET) برای ماه i از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد (Vicente-Serrano and López-Moreno, 2010a).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

حساب نمود. وزن طبقات نیز با توجه به نمال بودن مقادیر شاخص‌ها و بسته به میزان احتمال وقوع هر طبقه، اختصاص پیدا میکند. به طوری که طبقه با بیشترین احتمال وقوع، وزن ۱ و کمترین احتمال وقوع وزن ۴ را می‌گیرد. مقدار وزن و احتمال وقوع هر طبقه از خشکسالی، مطابق جدول ۲ می‌باشد.

### آسیب‌پذیری خشکسالی<sup>۳</sup>

آسیب‌پذیری مجموعه‌ای از شرایط اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی که حساسیت یک محیط به مخاطره را تعیین می‌کند، می‌باشد (ISDR, 2007). بر همین اساس به منظور شناسایی میزان تاثیر هر یک از عوامل آسیب‌پذیری (اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی)، پرسشنامه‌ای متشکل از ۳۵ سوال طراحی شد که به صورت تصادفی توسط کشاورزان منطقه افین تکمیل شد. تعداد نمونه لازم برای تکمیل پرسش‌نامه بر اساس روش‌های آماری و با استفاده از نرم افزار NCSS PASS، ۴۶ عضو تعیین گردید (جباری نوقایی و جباری نوقایی، ۱۳۸۷).

با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی اکتشافی و تحلیل عاملی تاییدی، پس از تکمیل پرسش‌نامه درجه آسیب‌پذیری منطقه بدست آمد. درجه آسیب‌پذیری عددی بین صفر تا یک است، هر چه درجه آسیب‌پذیری به ۱ نزدیکتر باشد، به معنی بیشتر بودن میزان آسیب‌پذیری محیط از عامل مورد بررسی تحت تاثیر خشکسالی می‌باشد.

### ریسک خشکسالی

پس از محاسبه مخاطره خشکسالی و آسیب‌پذیری آن، با توجه به تعریف ریسک، می‌توان مقدار ریسک خشکسالی را محاسبه نمود. "ریسک، حاصل قرار گرفتن یک سیستم (محیط) در برابر مخاطره حادثه طبیعی و آسیب‌پذیری اجتماعی و اقتصادی مربوط به آن مخاطره می‌باشد." بنابراین، ریسک به صورت کمی، طبق رابطه (۷) بیان می‌شود (ISDR, 2007; Shahid and Behrawan, 2008; Fan et al., 2017) و (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۶):

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \quad (7)$$

در رابطه (۷) Hazard مخاطره خشکسالی و Vulnerability درجه‌ی آسیب‌پذیری تعریف می‌شود (ISDR, 2007) و (AR5(IPCC, 2014)

از روش تجربی USBR<sup>۱</sup> استفاده شد (رابطه (۴)). این روش مناسب برای مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد.

$$\text{RDI}_{\text{st}}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (3)$$

$$p_e = p \times \frac{125 - 0.2 \times p}{125} \quad p \leq 250 \text{mm} \quad (4)$$

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

در رابطه (۳)،  $y^{(i)}$  برابر است با  $\ln(\alpha_0^{(i)})$  و  $\bar{y}$  و  $\hat{\sigma}_y$  به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر  $y^{(i)}$  می‌باشد.

در رابطه (۴)  $p_e$  بارش موثر مقیاس مورد نظر و  $p$  مقدار بارش متوسط سالانه منطقه می‌باشد.

در دو شاخص خشکسالی مورد مطالعه، مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل توسط روش هارگریوز-سامانی، بدست آمد (رابطه (۵) (سامانی ۲۰۰۰).

$$\text{ET}_0 = 0.0135(KT)(Ra)(TD)^{\frac{1}{2}}(TC + 17.8) \quad (5)$$

در معادله بالا  $KT$  ضریب تجربی می‌باشد که در این مطالعه برابر با ۰/۱۷ در نظر گرفته شده است.  $TD$  اختلاف دمای حداکثر و حداقل است.  $TC$  متوسط دما و  $Ra$  نیز تابش فرازمینی با مقیاس mm/day می‌باشد.

### مخاطره خشکسالی<sup>۲</sup>

پس از محاسبه شاخص‌های خشکسالی، مقدار مخاطره تعیین شد. مخاطره خشکسالی به صورت احتمال وقوع خشکسالی در سطوح مختلف شدت خشکسالی تعریف شده است که برای محاسبه احتمال وقوع خشکسالی از رابطه (۶) استفاده گردید (رابطه توسعه یافته توسط نویسندگان براساس تعاریف و روابط ارائه شده برای برآورد میزان مخاطره (Shahid and Behrawan, 2008, Kamali et al., 2017)).

$$H = W \times P(x) \text{class}_i \times I \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $P(x) \text{class}_i$  احتمال وقوع هر طبقه کلاس خشکسالی و  $|I_i|$  شدت خشکسالی همان خشک دوره و  $W$  وزن طبقه مورد نظر می‌باشد.

با توجه به اینکه دو شاخص خشکسالی مورد استفاده، دارای توزیع نرمال می‌باشند، از این رو می‌توان با استفاده از طبقه‌بندی دو شاخص خشکسالی که توسط ویسنته سرانو و لوپز مورنو (۲۰۱۰) اعلام شده است و نیز با استفاده از جدول  $Z$  نرمال، احتمال وقوع هر طبقه را

1- United States Bureau of Reclamation

2- Drought Hazard

**جدول ۲- احتمال وقوع و وزن هر طبقه از شاخص خشکسالی SPEI و eRDI**

وضعیت خشکسالی	شدت خشکسالی	احتمال وقوع هر طبقه	وزن هر طبقه
خشکسالی خفیف	۰/۹۹ تا صفر	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

### تعیین خصوصیات ریسک خشکسالی

برای تعیین خصوصیات آماری ریسک خشکسالی، از زنجیره مارکوف مرتبه اول استفاده شد. زنجیره مارکوف یک روش ریاضی برای مدل سازی فرایندهای سری زمانی تصادفی می باشد. وابستگی زنجیره مارکوف را می توان به کمک ماتریس احتمال انتقال بیان نمود. آشگر طوسی و همکاران (۱۳۸۲) و در مطالعه‌ی خود اعلام کردند که زنجیره مارکوف مرتبه اول برای پیش‌بینی‌های خشکسالی مناسب می باشد. از این رو در این تحقیق از مارکوف مرتبه اول استفاده شد (رابطه ۸).

احتمال هر وضعیت از خشکسالی براساس رابطه (۹) بدست می آید:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_j m_{ij}} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, s \quad (9)$$

در رابطه (۹)، صورت کسر تعداد دفعات انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  و مخرج کسر مجموع تعداد دفعات انتقال از حالت  $i$  به هر حالت دیگر است (روابط ۹-۸، غزنوی و همکاران، ۱۳۹۷).  
طبقه بندی برای تعیین حالت‌های ممکن برای ریسک خشکسالی، در جدول ۳ مشاهده می شود.

$$p_{ij} = \text{pr}\{J_{n+1} = j | J_n = i\} \quad (8)$$

### جدول ۳- طبقه بندی وضعیت‌های ممکن برای ریسک خشکسالی

طبقه ریسک	توصیف ریسک براساس شدت خشکسالی	علامت اختصاری
بدون ریسک	بدون خشکسالی (ترسالی)	N
ریسک پایین	خشکسالی خفیف	LR
ریسک بالا	خشکسالیهای متوسط تا خیلی شدید	HR

خصوصیات خشکسالی عبارتند از آسیب پذیری، اطمینان پذیری، برگشت پذیری و ماندگاری که با توجه به ماتریس احتمال انتقال تعادلی تعیین گردید.

### داده‌های اقلیمی آینده و پیش‌نگری آتی

برای پیش‌نگری ریسک خشکسالی در دوره‌های آتی، از داده‌های اقلیمی بدست آمده از سه مدل اقلیمی ( CNRM-CERFAC )، GFDL-ESM2M و ICHEC-EC-EARTH) خروجی‌های پروژه CORDEX با دامنه MENA و تفکیک مکانی ۴۴ در ۴۴ درجه، استفاده شد. ریسک آینده در حالت خوش‌بینانه (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) مورد بررسی قرار گرفت. علت استفاده از این دو سناریو، بررسی در خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین حالت از سناریوهای انتشار می باشد. با توجه به اینکه برای برخی از چهار متغیر هواشناسی مورد استفاده در سه مدل به کار برده شده در این مطالعه، RCP2.6 موجود نبود، لذا برای بررسی صحیح و یکسان تغییرات ریسک خشکسالی، RCP4.5 به عنوان خوش‌بینانه در نظر گرفته شد.

پس از استخراج داده‌های اقلیمی، ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب نتش- ساتکلیف به منظور بررسی عدم قطعیت و نیز توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی برای آینده، محاسبه شد. به منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از خطای مدل‌ها و کاهش اثر آن بر نتایج، از روش ترکیب کردن مدل‌های اقلیمی به روش وزن‌دهی میانگین‌های مشاهداتی دما و بارش در قالب رویکرد بیزین استفاده شد (رابطه ۱۰) (Hashemi- Ana, 2015).

$$W_i = \frac{\frac{i}{\Delta p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta p_i}} \quad (10)$$

دوره آتی در این تحقیق، یک دوره ۸۱ ساله (۲۱۰۰-۲۰۲۰) می باشد، که به سه دوره زمانی ۲۷ ساله، آینده نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۲۰)، آینده میانی (۲۰۷۳-۲۰۴۷) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۴) تقسیم شده است.

### رگرسیون ناپارامتری<sup>۳</sup> LOESS

Loess یک مدل تعمیم یافته و متداول از رگرسیون محلی یا رگرسیون چند جمله‌ای است که به رگرسیون میانگین متحرک نیز مشهور است (Fox and Weisberg, 2018). این روش، یک روش رگرسیون غیرپارامتری است.

### مدل ترکیبی و میانگین بیزین<sup>۴</sup> (Ensemble BMA)

مدل میانگین بیزی برای ایجاد پیش‌بینی‌های احتمالی از پیش‌بینی‌های گروهی و مشاهدات متغیر مورد نظر محاسبه می‌شود. یک روش جدید آماری استاندارد برای ترکیب توزیع‌های پیش‌بینی کننده از منابع مختلف و نیز راهی برای ترکیب مدل‌های آماری است. خروجی این روش یک تابع چگالی احتمال (pdf) است. وزن مدل‌های این روش نشان‌دهنده سهم نسبی مدل‌های ترکیب‌کننده به مهارت پیش‌بینی بیش از یک نمونه آموزشی است. تابع چگالی احتمال پیش‌بینی شده ترکیبی از یک متغیر  $y$  به صورت ذیل است (Fräley et al., 2018):

$$p(y | y^T) = \sum_{k=1}^k p(y | M_k, y^T) p(M_k | y^T) \quad (12)$$

در رابطه فوق  $p(y | M_k, y^T)$  تابع چگالی احتمال پیش‌بینی که از داده‌های آموزش تخمین زده می‌شود،  $k$  تعداد مدل‌های ترکیب شده است.  $p(M_k | y^T)$  احتمال پسین مدل  $M_k$  براساس داده‌های آموزشی است.

### بررسی توانایی مدل‌های بدست آمده در دوره مشاهداتی

برای بررسی توانایی مدل‌های بدست آمده، ۲۳ سال اولیه (۲۰۰۵-۱۹۸۳) برای انتخاب مدل و ۱۰ سال اخیر برای صحت‌سنجی استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی مدل‌ها از پنج آماره عددی MAD، MARE، RMSE، MSE و شاخص توافق ویلموت استفاده شد (دیناروند و همکاران، ۱۳۹۷) (Rousseeuw and Croux, 1993) براساس آماره‌های فوق و با توجه به روابط مشخص هر یک از آماره‌ها، با استفاده از مقادیر واقعی مقادیر ریسک خشکسالی ( $O_i$ ) و مقادیر پیش‌بینی شده ریسک خشکسالی ( $P_i$ ) توسط مدل‌ها، میزان صحت و مناسبت مدل‌ها تعیین می‌شود. در آماره‌های MAD، MARE، RMSE و MSE بهترین وضعیت، مقدار صفر (۰) و بدترین  $\infty$  و براساس شاخص توافق ویلموت، مقدار یک بهترین وضعیت و مقدار ۰ بدترین وضعیت است. همچنین از مقدار  $p$  آزمون (T.Test) به منظور شناسایی اختلاف معنی‌دار میان مقادیر پیش‌بینی شده در دوره صحت‌سنجی با مقادیر بدست آمده توسط مدل‌ها در این دوره زمانی استفاده شد. براساس آماره‌های عددی است.

به منظور آشکارسازی تغییرات اقلیمی میان دوره زمانی پایه و دوره‌های زمانی آبی براساس دو RCP4.5 و RCP8.5 از آزمون من-ویتنی استفاده شد (مساعدی و همکاران، ۱۳۹۰). از این روش برای مقایسه از آماره‌های U من-ویتنی و مقدار P این آزمون استفاده شده است. با مقایسه میان آماره‌ی U بدست آمده از آزمون و مقدار آن در جدول، می‌توان وجود تغییر و یا عدم تغییر را مشخص کرد. راه مناسب‌تر و بدون نیاز به جدول، محاسبه مقدار P آزمون می‌باشد. چنانچه مقدار P از ۰/۰۵ بیشتر بوده، به معنای پذیرش فرض صفر و عدم وجود تغییر میان دوره‌های زمانی مورد مقایسه است. چراکه فرضیه صفر این آزمون، عدم وجود اختلاف میان دو دوره می‌باشد (رضایی پزند، ۱۳۸۰)

### مدل‌سازی ریسک خشکسالی

در انتها، به منظور ارائه مدل‌هایی براساس هر شاخص خشکسالی، از چهار روش آماری مدل سری زمانی<sup>۱</sup> ARIMA، رگرسیون نیمه پارامتری بوت استرپ شده، رگرسیون ناپارامتری و مدل ترکیبی و میانگین بیزین برای مدل‌سازی استفاده شد. میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه یک مدل تعمیم یافته از مدل کلی میانگین متحرک خودهمبسته است که در آمار و به ویژه در تحلیل سری زمانی کاربرد دارد.

### رگرسیون نیمه پارامتری بوت استرپ شده<sup>۲</sup> (BQR)

مدل‌های رگرسیون معمولی، برای میانگین شرطی برآزش داده می‌شود، اما رگرسیون چندکی، برای چندک‌های شرطی به کار می‌رود. مهمترین کاربرد رگرسیون چندکی، شناسایی شکل توزیع متغیر وابسته مدل در سطوح گوناگون می‌باشد (رابطه ۱۱). ویژگی دیگر این روش مدل‌سازی، بوت استرپ کردن است. در واقع با این روش، تعداد نمونه‌ها را افزایش داده تا از این طریق 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. (Efron, 2000)

$$E(Y_i) = \alpha + \beta x_i \quad (11)$$

کمیت  $E(Y_i)$  را میانگین شرطی متغیر  $Y$  می‌نامند. این رابطه بیان می‌کند که میانگین‌های توزیع  $Y$  در سطوح مختلف از متغیر تشریحی دارای توزیعی است که میانگین این توزیع‌ها روی یک خط راست جای گرفته‌اند.

3- locally estimated scatterplot smoothing

4- Ensemble and Bayesian Model Averaging

1- Autoregressive integrated moving average

2- Bootstrapped Quantile Regression

معادله ریاضی	آماره عددی
$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{\sum_{i=1}^N ( p_i - \bar{o}  + ( o_i - \bar{o} )^2)}$	شاخص توافق ویلموت (d)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{N}}$	RMSE
$MSEP = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N}$	MSEP
$MAD = \frac{( (p_i - o_i) - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N} )}{N}$	MAD
$MARE = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{N}}$	MARE

## نتایج و بحث

همان طور که مشخص است، مقدار بارش در دوره آینده نزدیک، سناریوی خوش بینانه و نیز دوره‌های آینده نزدیک و میانی، سناریوی بدبینانه افزایش خواهد یافت. نتایج مخاطره خشکسالی دو شاخص حاکی از افزایش مقدار مخاطره در دوره آینده میانی و دور براساس سناریوی خوش بینانه و نیز آینده دور سناریوی بدبینانه در مقایسه با دوره زمانی پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۹) می‌باشد.

نتایج حاصل از آسیب‌پذیری، میزان آن را براساس پرسش‌نامه‌های این مطالعه، مقدار ۰/۵۳ نشان داد. در واقع، این عدد مشخص می‌کند که در حدود نیمی از آسیب‌پذیری زیرحوضه به دلیل عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی این زیرحوضه می‌باشد. این مقدار آسیب‌پذیری در واقع میانگینی از حساسیت سه عامل می‌باشد. به صورت مجزا درجه آسیب‌پذیری برای هر یک از عوامل اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی به ترتیب عبارتند از ۰/۳۴، ۰/۳۰ و صفر. براین اساس، عامل محیط زیستی سهم بیشتری در آسیب‌پذیری زیرحوضه افین را دارا می‌باشد. در مقابل عوامل 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.

نتایج ریسک خشکسالی SPEI نشان می‌دهد که براساس سناریوی انتشار خوش بینانه و بدبینانه در میان دوره‌های زمانی آتی، بیشترین فراوانی دوره‌های بدون ریسک این شاخص، در دوره آینده نزدیک مشاهده می‌شود، نمونه بارز برای این نتیجه، بازه زمانی سالانه می‌باشد. در شاخص eRDI، تأثیر افزایش بارش در دوره‌های آینده نزدیک و میانی سناریوی بدبینانه و نیز آینده نزدیک سناریوی خوش بینانه در مقایسه با دوره پایه مشاهده می‌شود. از اینرو در این گام‌های زمانی، فراوانی ریسک‌های خشکسالی بالا کمتر می‌باشد.

### خصوصیات ریسک خشکسالی

براساس نتایج حاصل از ماتریس احتمال انتقال ریسک خشکسالی دو شاخص مورد بررسی نتایج ذیل بدست آمد (جدول ۶).

نتایج حاصل از بررسی خروجی‌های آزمون‌های پایه آماری بر روی داده‌های بارش نشان داد که این داده‌ها در گام‌های زمانی مورد نظر، همگن، تصادفی، مستقل و ایستا بوده و روند و داده پرتی در این داده‌ها مشاهده نشد. نتایج بررسی متغیرهای هواشناسی برای دوره‌های آتی حاکی از توانایی کامل تمام مدل‌های دمایی و برای سه متغیر دمایی متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل و متوسط دما در نزدیکی سطح زمین می‌باشد. اما هر سه مدل بارش استفاده شده در این مطالعه، نیاز به تصحیح داشتند، از اینرو با استفاده از روش تغییر فاکتور، سعی در تصحیح مقادیر بارش برای هر سه مدل شد. روش تغییر فاکتور یا روش دلتا، روشی برای ریز مقیاس نمایی خروجی مدل‌های گردش کلی و نیز تصحیح مقادیر آن‌ها می‌باشد (بابائیان، ۱۳۹۴). در محاسبه نسبت (ضریب اصلاحی) این روش داده‌های دیده‌بانی، مورد نیاز نمی‌باشد. در واقع با استفاده از نسبت بین داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده و به داده‌های اقلیمی حال حاضر برای یک مدل، تصحیح انجام می‌شود. براین اساس، ضریب اصلاحی، با استفاده از مقادیر بارش بدست آمده توسط مدل‌ها در دوره پیش‌بینی و در دوره اقلیمی حاضر، برای هر گام زمانی و برای هر یک از دوره‌های زمانی آینده نزدیک، میانی و دور محاسبه شد و در انتها ضرایب بدست آمده برای هر زمان، در مقدار بارش دیده‌بانی دوره زمانی پایه، ضرب شده‌است. نتایج دیگر این بخش، نشان داد که مدل اقلیمی مناسب برای متغیر بارش، در دوره‌های زمانی مختلف آینده و براساس سناریوهای مختلف، متفاوت می‌باشد، در حالی که برای متغیرهای دمایی، دوره‌های زمانی و سناریوی انتشار تأثیرگذار نبوده و مدل مناسب برای سه متغیر دمایی مدل GFDL-ESM2M است.

نتایج مخاطره خشکسالی در این مطالعه نشان داد که شاخص خشکسالی SPEI در مقایسه با شاخص eRDI شدت‌های کمتر اما با فراوانی بیشتری از خشکسالی را نشان می‌دهد. براساس جداول ۴ و ۵،

آینده هم احتمال وقوع ریسک‌های بالای ناشی از خشکسالی هواشناسی باز هم می‌تواند در این مقدار باشد.

**ج) اطمینان‌پذیری:** این خصوصیت از ریسک خشکسالی، نقطه مقابل از آسیب‌پذیری می‌باشد، بنابراین در گام‌های زمانی که کمترین میزان آسیب‌پذیری مشاهده شده‌است، بیشترین اطمینان‌پذیری دیده خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت براساس شاخص‌های خشکسالی هواشناسی حداقل اطمینان‌پذیری ۰/۷۹ می‌باشد، که به عبارتی دیگر، مجموع وضعیت‌های بدون ریسک و ریسک‌های پایین در منطقه، ۰/۷۹ می‌باشد.

**د) ماندگاری:** دیگر خصوصیت آماری ریسک خشکسالی، ماندگاری می‌باشد. براساس این خصوصیت، احتمال ماندن در همان وضعیت قبلی نشان داده می‌شود. نتایج این بخش، ماندگاری در شرایط ماتریس تعادلی انتقال می‌باشد که به‌طور نمونه در شکل ۲ برای شاخص خشکسالی SPEI نشان داده شده است. براساس شاخص SPEI احتمال ماندگاری دوره‌های بدون ریسک بیشتر از دو وضعیت دیگر است. براساس شاخص خشکسالی SPEI احتمال ماندگاری دوره‌های با ریسک بالا در مقایسه با احتمال ماندگاری دوره‌های با ریسک بالا شاخص eRDI بیشتر می‌باشد. در شاخص eRDI نیز میزان احتمال ماندگاری سه وضعیت، مشابه شاخص قبل است، با این تفاوت که در این شاخص SPI شدت دوره‌های ریسک بالا کمتر از شاخص SPEI می‌باشد.

#### مدل‌سازی ریسک خشکسالی

با استفاده از روش مدل‌سازی ARIMA، پس از انجام مراحل لازم برای انتخاب مدل و تهیه نمودارهای acf و pacf و پس از آزمون و خطا، مدل ARIMA(0,0,0) برای دو شاخص خشکسالی و برای تمام گام‌های زمانی (به استثناء بهار) بدست آمد. مدل سری زمانی مناسب برای گام زمانی بهار براساس دو شاخص خشکسالی مورد استفاده ARIMA(1,0,0) مشخص گردید. با توجه به اینکه دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI علاوه بر بارش، به متغیرهای هواشناسی دیگری مرتبط می‌باشد، از این‌رو براساس این روش مدل‌سازی ابتدا پارامترهای موثر در مدل شناسایی و سپس مدل مناسب براساس حذف گام به گام پارامترهای غیر موثر بدست آمد. نتایج نشان داد که بارش در بیشتر گام‌های زمانی دو شاخص خشکسالی بعنوان متغیر موثر شناخته شده‌است. در شاخص SPEI در مقایسه با شاخص eRDI، پارامترهای دمایی در گام‌های زمانی بیشتری، بعنوان متغیر موثر در مدل‌سازی دیده می‌شود.

همانطور که از جدول ۶ نیز مشخص است، می‌توان بیان کرد که براساس شاخص SPEI احتمال انتقال وضعیت بدون ریسک به ریسک‌های بالا در مقایسه با شاخص eRDI مقداری افزایش را نشان می‌دهد، این بازه برای شاخص خشکسالی SPEI صفر تا ۲۸٪ می‌باشد. در مقابل، احتمال انتقال از ریسک بالا به سال‌های بدون ریسک، در شاخص SPEI کاهش یافته است و به بازه ۷۱٪ - ۲۰٪ محدود می‌شود. در این شاخص، بیشترین احتمال انتقال از سال بدون ریسک به ریسک بالا، در فصل پاییز مشاهده می‌شود، عبارت دیگر این فصل از سال، در مقایسه با سایر گام‌های زمانی دیگر، به احتمال بیشتری بلافاصله پس از یک دوره بدون ریسک، وارد دوره‌ای با ریسک بالا شود. احتمال ۷۱٪ انتقال از ریسک بالا دوره بدون ریسک، بازهم در فصل پاییز دیده می‌شود. براساس شاخص eRDI، مشاهده می‌شود که بیشترین احتمال انتقال از وضعیت بدون ریسک خشکسالی به وضعیت ریسک خشکسالی‌های بالا در فصل پاییز با مقدار ۳۲٪ دیده می‌شود که همانند شاخص SPEI نیز بیشترین احتمال، در فصل پاییز مشاهده شد. بازه احتمال انتقال از وضعیت ریسک‌های بالا به وضعیت بدون ریسک، ۸۳٪ - ۲۰٪ می‌باشد که در مقایسه با دو شاخص خشکسالی دیگر، کمتر شده‌است (البته اختلاف این تغییرات با شاخص SPEI بیشتر می‌باشد).

نتایج ویژگی‌های برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری در جدول ۷ و نتایج ماندگاری برای شاخص SPEI در شکل ۲ نشان داده شده است.

**الف - برگشت‌پذیری:** در نگاهی کلی، می‌توان بیان کرد که برگشت‌پذیری هر دو شاخص خشکسالی، بیش از ۷۰٪ می‌باشد، به عبارت دیگر، در بیش از ۷۰ درصد مواقع پس از یک سال دوره با وضعیت ریسک شدید، دوره‌ای با ریسک پایین و یا حتی دوره بدون ریسک (ترسالی) وجود خواهد داشت. شاخص SPEI این مقدار را حداکثر ۰/۸۸ برای ۶ ماهه گرم نشان می‌دهد. شاخص eRDI نیز حداکثر مقدار ۰/۹۱ را در گام زمانی بهار دارا می‌باشد.

**ب - آسیب‌پذیری:** حداقل میزان آسیب‌پذیری ۰/۰۹ می‌باشد، که براساس شاخص خشکسالی eRDI مشاهده شده‌است. این مقدار بیانگر این است که در طی ۳۳ سال گذشته، مجموع تمام دوره‌های با ریسک بالا در فصل بهار می‌باشد. حداکثر مقدار آسیب‌پذیری، ۰/۲۱ مشخص شده است، که این مقدار نیز براساس شاخص SPI بدست آمده است. براساس دو شاخص SPEI و eRDI نیز ۰/۲۱ برای آسیب‌پذیری دیده می‌شود. در مجموع، باتوجه به هر سه شاخص خشکسالی هواشناسی می‌توان گفت که احتمال آسیب‌پذیری برای هر ۱۶ گام زمانی مورد مطالعه، کمتر از ۰/۲۵ می‌باشد و این نشان می‌دهد که زیرحوضه افین تجربه کمتری از ریسک‌های بالا را در طی سال‌های ۲۰۱۵ - ۱۹۸۳ داشته است و براساس این احتمالات، در



جدول ۴- مقایسه میانگین‌های پارامترهای هواشناسی استفاده شده در مطالعه در دوره پایه و دوره‌های آتی براساس RCP4.5

پارامتر	آماره‌های آماری	پایه و آینده			آینده	
		پایه و آینده نزدیک	پایه و آینده میانی	پایه و آینده دور	آینده نزدیک و دور	آینده میانی و دور
بارش	آماره L-من-وینتی	۳۳۴	۳۲۸	۳۳۱	۳۰۴	۳۵۲
	مقدار Pازمون من-وینتی	۰/۵۹۸	۰/۵۲۸	۰/۵۶۲	۰/۲۹۵	۰/۸۲۹
	مقدار تغییرات	۶/۳۷	-۷/۷۳	-۶/۸۸	-۱۳/۲۵	-۰/۸۵
متوسط دمای حداکثر	آماره L-من-وینتی	۱۲۸/۵	۲۷	۱۵	۷۷/۵	۲۵۷/۵
	مقدار Pازمون من-وینتی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۶۴*
	مقدار تغییرات	۰/۹۹	۲/۰۲	۲/۴۳	۱/۴۴	۰/۴۱
متوسط دمای حداقل	آماره L-من-وینتی	۸۹	۱۸	۷	۱۰۵	۲۶۷
	مقدار Pازمون من-وینتی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۹۲*
	مقدار تغییرات	۱/۲۲	۱/۹۷	۲/۳۹	۱/۰۷	۰/۳۲
متوسط دما در ارتفاع ۲ متری سطح زمین	آماره L-من-وینتی	۱۱۷	۱۴	۴	۸۲	۲۵۹/۵
	مقدار Pازمون من-وینتی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۶۹
	مقدار تغییرات	۱/۰۱	۱/۹۴	۲/۳	۱/۲۹	-۰/۳۶

به منظور شناسایی پارامتر موثر در مدل، نخست از روش رگرسیون ناپارامتری ساده بوت استرپ شده (با تکرار ۵۰۰)، پارامتر موثر شناسایی و سپس مدل Loess برای متغیر (متغیرهای) موثر اجرا شد. در تمامی ۶ گام زمانی براساس دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI، متغیر بارش، تنها متغیر موثر شناخته شد.

در مدل ترکیبی Ensemble BMA، وزن هر یک از مدل‌ها مشخص گردید، سپس مقدار نهایی ریسک براساس این روش از حاصل ضرب مقدار ریسک بدست آمده از هر یک از مدل‌ها در وزن آن (میانگین وزنی) بدست آمد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی در برخی گام‌های زمانی کاملاً ترکیبی از سه مدل نمی‌باشد، بلکه مدل LOESS برای یک دوره زمانی توانایی بالاتری در پیش‌بینی دارد، دلیل این امر به معنای مناسب نبودن روش ترکیبی نمی‌باشد، بلکه به این معنی است که مدل‌هایی که وزن صفر (نزدیک به صفر) را گرفته‌اند، توانایی کمتری در مدل‌سازی داشته‌اند (جدول ۸، نمونه‌ای برای شاخص eRDI).

با استفاده از روش مدلسازی BQR، در چهار چندک ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۹ مدل‌های مناسب تعیین شد. برای شاخص‌های SPEI و eRDI نیز در این روش مدل‌سازی، متغیرهای غیر ضروری به ترتیب اولویت به صورت حذف گام به گام از مدل، خارج و مدل نهایی با متغیر (متغیرهای) ضروری تعیین شد. پس از آنکه برای هر چندک صحت‌سنجی انجام شد، با استفاده از آماره‌های شاخص توافق ویلموت (d)، RMSE و MAD، مناسب‌ترین مدل در میان چهار مدل (q=25,50,75,99) مدل شناسایی شد که در این مطالعه در بیشتر گام‌های زمانی، چندک ۵۰ بهترین نتایج و بیشترین دقت و صحت را با داده‌های مشاهداتی نشان داد. نتایج نشان داد که هر دو شاخص در برخی از گام‌های زمانی، پارامترهای دمایی، به ویژه متوسط دمای حداقل و متوسط دمای حداکثر را بعنوان پارامترهای ضروری معرفی کرده‌اند. البته براساس این روش مدل‌سازی نیز، پارامترهای دمایی بیشتر در شاخص SPEI بعنوان پارامترهای موثر شناخته شده‌اند. براساس روش رگرسیون ناپارامتری Loess برای دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI با توجه به اینکه چهار متغیر می‌باشد،

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های پارامترهای هواشناسی استفاده شده در مطالعه در دوره پایه و دوره‌های آتی براساس RCP8.5

پارامتر	آماره های آماری	پایه و آینده			آینده	
		پایه و آینده نزدیک	پایه و آینده دور	آینده نزدیک و میانی	آینده میانی و دور	
بارش	آماره U من- ویتنی	۳۶۰	۳۳۱	۳۳۷	۳۳۴	۳۱۴
	مقدار p از مون من-ویتنی	۰/۹۳۸	۰/۵۶۲	۰/۶۳۴	۰/۵۹۸	۰/۳۸۲
	مقدار تغییرات	۱/۰۹	۶/۵۴	-۶/۲۶	۵/۴۵	-۱۲/۸
متوسط دمای حداکثر	آماره U من- ویتنی	۶۷/۵	۳	۰	۷۷/۵	۴۸/۵
	مقدار p از مون من-ویتنی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***
	مقدار تغییرات	۱/۵۳	۲/۹۷	۴/۶۶	۱/۴۴	۳/۱۳
متوسط دمای حداقل	آماره U من- ویتنی	۵۴/۵	۱	۰	۷۵/۵	۱/۲۸
	مقدار p از مون من-ویتنی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***
	مقدار تغییرات	۱/۴۶	۲/۷۵	۴/۳۴	۱/۲۹	۲/۸۸
متوسط دما در ارتفاع ۲ متری سطح زمین	آماره U من- ویتنی	۵۹	۰	۰	۷۱/۵	۳۹/۵
	مقدار p از مون من-ویتنی	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***	۰/۰۰۱>***
	مقدار تغییرات	۱/۴۴	۲۸۱	۴/۴۸	۱/۳۷	۳/۰۴

جدول ۶- ماتریس احتمال انتقال شاخص SPEI و eRDI در گام‌های زمانی مورد مطالعه

وضعیت گام زمانی	وضعیت ریسک شاخص SPEI			وضعیت گام زمانی	وضعیت ریسک شاخص eRDI		
	بدون ریسک	ریسک پایین	ریسک بالا		بدون ریسک	ریسک پایین	ریسک بالا
پاییز	بدون ریسک	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۳۸	بدون ریسک	۰/۲۸	۰/۲۵
	ریسک پایین	۰/۶۷	۰/۳۳	۰	ریسک پایین	۰/۲۹	۰/۱۶
	ریسک بالا	۰/۷۱	۰/۲۹	۰	ریسک بالا	۰/۱۷	۰/۱۶
زمستان	بدون ریسک	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۲۰	بدون ریسک	۰/۳۱	۰/۱۹
	ریسک پایین	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۰۹	ریسک پایین	۰/۵۰	۰/۰۸
	ریسک بالا	۰/۶۷	۰	۰/۰۳۳	ریسک بالا	۰/۷۵	۰/۲۵
بهار	بدون ریسک	۰/۷۸	۰/۱۷	۰/۰۶	بدون ریسک	۰/۳۱	۰/۰۶
	ریسک پایین	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۳۸	ریسک پایین	۰/۶۲	۰
	ریسک بالا	۰/۵۰	۰/۱۷	۰/۳۳	ریسک بالا	۰	۰/۶۷
۶ ماهه سرد	بدون ریسک	۰/۴۷	۰/۳۵	۰/۱۸	بدون ریسک	۰/۲۹	۰/۲۱
	ریسک پایین	۰/۷۰	۰/۳۰	۰	ریسک پایین	۰/۵۴	۰/۰۸
	ریسک بالا	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۲۰	ریسک بالا	۰/۴۰	۰/۲۰
۶ ماهه گرم	بدون ریسک	۰/۷۸	۰/۱۷	۰/۰۶	بدون ریسک	۰/۲۹	۰/۰۶
	ریسک پایین	۰/۲۲	۰/۵۶	۰/۲۲	ریسک پایین	۰/۴۰	۰/۲۰
	ریسک بالا	۰/۶۰	۰	۰/۴۰	ریسک بالا	۰/۲۰	۰/۴۰
سالانه	بدون ریسک	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۱۳	بدون ریسک	۰/۳۶	۰/۲۱
	ریسک پایین	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۰۹	ریسک پایین	۰/۴۶	۰/۰۸
	ریسک بالا	۰/۶۷	۰	۰/۳۳	ریسک بالا	۰/۴۰	۰/۲۰

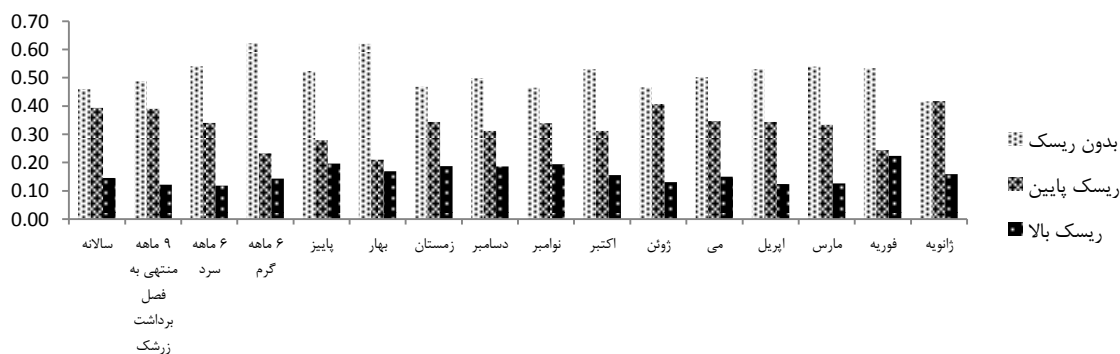
## نتیجه گیری

وضعیت خشکسالی‌های خفیف و یا نرمال خواهد بود و احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید، بسیار کم است. احتمال ماندگاری یا به عبارت دیگر، ماندن در وضعیت سال قبل در هر یک از گام‌های زمانی دو شاخص خشکسالی نشان داد که در دو شاخص، احتمال ماندگاری دوره‌های بدون ریسک بیشتر است (سال‌های با وضعیت نرمال یا ترسالی). براساس شاخص خشکسالی SPEI احتمال ماندگاری دوره‌های با ریسک بالا در مقایسه با شاخص eRDI بیشتر می‌باشد و این می‌تواند نشان دهنده تاثیر بیشتر دما بر وقوع خشکسالی‌های منطقه مورد مطالعه باشد، چراکه براساس شاخص SPEI متغیرهای دمایی بیشتری در گام‌های زمانی مورد مطالعه، تاثیرگذار بوده‌است.

هدف از این مطالعه، ارزیابی ریسک خشکسالی هواشناسی و معرفی مدل پیش‌نگری برای ریسک خشکسالی در دوره‌های زمانی آتی می‌باشد. محاسبه ریسک خشکسالی در این تحقیق، بر مبنای تعریف ریسک طبیعی می‌باشد، زیرا خشکسالی یک رخداد طبیعی بوده و اجتناب از وقوع آن نیز یک امر غیرممکن است. پس از محاسبه ریسک و نیز به منظور دستیابی به نتایج خصوصیات ریسک خشکسالی در این مطالعه، از زنجیره مارکوف مرتبه اول استفاده شد. نتایج این بخش نشان داد که براساس دو شاخص خشکسالی هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه، احتمال آسیب‌پذیری ریسک‌های بالا در منطقه کم است و به طور کلی می‌توان گفت، منطقه مورد بررسی بیشتر در

جدول ۷- احتمال وقوع خصوصیات ریسک خشکسالی براساس شاخص‌های خشکسالی مورد مطالعه

خصوصیت ریسک	SPEI			eRDI		
	گام زمانی	برگشت پذیری	آسیب‌پذیری	اطمینان‌پذیری	برگشت پذیری	آسیب‌پذیری
		اطمینان‌پذیری	برگشت پذیری	آسیب‌پذیری	اطمینان‌پذیری	برگشت پذیری
زمستان	۰/۸۱	۰/۲۱	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۸۵
بهار	۰/۸۳	۰/۱۸	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۰۹	۰/۹۱
پاییز	۰/۸۰	۰/۲۱	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۱۸	۰/۸۲
۶ماهه سرد	۰/۸۸	۰/۱۵	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۱۸	۰/۸۲
۶ ماهه گرم	۰/۸۶	۰/۱۵	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۸۵
سالانه	۰/۸۵	۰/۱۸	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۱۸	۰/۸۲



شکل ۲- احتمال ماندگاری در هر یک از گام‌های زمانی مورد مطالعه براساس شاخص SPEI

پیش‌نگری ریسک برای دوره‌های زمانی آتی ممکن می‌باشد. نتایج ریسک دوره‌های آتی براساس دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه مورد استفاده در این تحقیق، نشان داد که احتمال کاهش خطر خشکسالی در آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۶) براساس سناریوی خوش‌بینانه و نیز

در بررسی مدل‌های مختلف برآزش داده شده به ریسک‌های خشکسالی، مشخص شد که از میان چهار روش، روش مدل‌سازی رگرسیون ناپارامتری Loees در مقایسه با روش ترکیبی Ensemble BMA مناسب تشخیص داده شد و براساس این مدل، امکان

خشکسالی‌ها، تنها به خشکسالی‌های هواشناسی محدود نمی‌شود، بنابراین بهتر است ریسک خشکسالی‌های هیدرولوژیک، کشاورزی و اقتصادی - اجتماعی بررسی شده و مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی آن‌ها نیز ارائه شود، تا بهتر بتوان با رخدادهای خشکسالی در دوره‌های زمانی آینده سازگاری داشت.

آینده نزدیک و آینده میانی (۲۰۷۳-۲۰۴۷) براساس سناریوی بدبینانه، وجود دارد.

در انتها پیشنهاد می‌شود به منظور کاربردی کردن مدل‌های ریسک خشکسالی بدست آمده در این تحقیق، ریسک خشکسالی هواشناسی در سایر مناطق نیز بررسی شود. همچنین ریسک

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های خطاسنجی در چهار روش مدل‌سازی مخاطره در دوره صحت‌سنجی برای شاخص eRDI

بازه زمانی	مدل	RMSE	MSEP	MAD	MARE	d	مقدار p(t.test)
زمستان	ARIMA	۰/۰۷	۰	۰/۰۵	۰/۴۸	۰/۶۴	۰/۸۳
	*LOESS	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۵۱	۰/۷۲	۰/۶۵
	BQR(q=75)	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۸۷	۰/۵۵	۰
	Bayesian	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۸۷	۰/۵۵	۰
پاییز	ARIMA	۰/۰۵	۰	۰/۰۵	۱/۰۴	۰/۸۹	۰/۷۳
	LOESS	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۴۹
	BQR(q=50)	۰/۰۷	۰	۰/۰۶	۱/۴۴	۰/۸۳	۰
	*Bayesian	۰/۰۵	۰	۰/۰۳	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۳۹
بهار	ARIMA	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۸	۱/۲۸	۰/۶۵	۰/۱۶
	**LOESS	۰/۰۵	۰	۰/۰۳	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۸۵
	BQR(q=50)	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۸	۱/۲۹	۰/۷۲	۰/۴۴
	Bayesian	۰/۰۵	۰	۰/۰۳	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۶۲
۶ ماهه سرد	ARIMA	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶۴	۰/۶۰	۰/۵۹
	**LOESS	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۱
	BQR(q=75)	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۲
	Bayesian	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۹۳
۶ ماهه گرم	ARIMA	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۶	۱/۰۱	۰/۷۴	۰/۲۹
	**LOESS	۰/۰۳	۰	۰/۰۲	۰/۳۳	۰/۹۶	۰/۴۱
	BQR(q=50)	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۷	۱/۰۶	۰/۷۹	۰/۶۹
	Bayesian	۰/۰۳	۰	۰/۰۲	۰/۳۳	۰/۹۶	۰/۳۷
سالانه	ARIMA	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۳
	LOESS	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۷۶
	BQR(q=50)	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۷۰	۰/۶۲	۰/۲۳
	*Bayesian	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۶۲	۰/۲۶

<http://climate.mihanblog.com/post/202>

## منابع

جباری نوقابی، ه، و جباری نوقابی، م. ۱۳۸۷. نکاتی چند در مورد برآورد حجم نمونه و معرفی نرم‌افزار مربوطه. نشریه دانشجویی آمار (ندا). ۴: ۲۱-۱۳.

دیناروند، م، اندرزیان، س.ب، اجتهادی، ح. و فرزام، م. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل AquaCrop برای دو گونه مرتعی جو و یونجه خودرو در منطقه حفاظت شده شیمبار، استان خوزستان. فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۲۵: ۲: ۳۸۸-۳۹۸.

رضایی‌پژند، حجت. ۱۳۸۰. کاربرد آمار و احتمال در منابع آب. انتشارات سخن گستر.

آشگر، ش،، علیزاده، ا، و جوانمرد، س. ۱۳۸۲. پیش‌بینی احتمال وقوع خشکسالی در استان خراسان. تحقیقات جغرافیایی. ۷۰: ۱۲۸-۱۱۹ خلیلی، ن، رضایی‌پژند، ح، درخشان، ه، و داوری، ک. ۱۳۹۶. توسعه چارچوبی برای ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی بر گندم دیم. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴: ۴: ۷۰-۵۹.

آقایان، س.ع، کمالی، غ.ع. و حجام، س. ۱۳۹۴. ارزیابی کمی ریسک خشکسالی کشاورزی در چند نمونه اقلیمی کشور. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. ۲۱ و ۲۲: ۶۱-۷۲.

بابائیان، ا. ۱۳۹۴. روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر یا دلتا.

- basin in Iran. *Water* 9.4: 241.
- Kim, H., Park, J., Yoo, J. and 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*. 9.1: 28-35.
- Pandey, S., Pandey, A., Nathawat, M., Kumar, M. and Mahanti, N. 2012. Drought hazard assessment using geoinformatics over parts of Chotanagpur plateau region, Jharkhand, India. *Natural Hazards*. 63.2: 279-303.
- Pei, W., Fu, Q., Liu, D., Li, T.-X., Cheng, K. and Cui, S. 2017. Spatiotemporal analysis of the agricultural drought risk in Heilongjiang Province, China. *Theoretical and Applied Climatology*. 133: 1-14.
- Prathumchai, K., Honda, K. and Nualchawee, K. 2001. Drought risk evaluation using remote sensing and GIS: a case study in Lop Buri Province. 22nd Asian conference on remote sensing.
- 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).
- Rousseuw, P. J.; Croux, C. 1993. "Alternatives to the median absolute deviation". *Journal of the American Statistical Association*. 88. 424: 1273-1283.
- Shahid, S. and 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. and 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.
- Stocker, T., et al. 2014. "Summary for policymakers." IPCC.
- Tigkas, D., Vangelis, H. and 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.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., and López-Moreno, J.I. 2010a. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 23: 1696-1718.
- Wu, H. and Wilhite, D.A. 2004. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. *Natural Hazards*, 33: 1-21.
- عرفانیان، م.، وفاپی، ن.، و رضاییانزاده، م. ۱۳۹۳. ارائه یک روش نوین برای ارزیابی ریسک خشکسالی استان فارس با تلفیق داده‌های ماهانه بارندگی ماهواره TRMM و داده‌های شاخص پوشش گیاهی NDVI سنجنده Terra/MODIS. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. ۴۶: ۱-۹۳-۱۰۸.
- علیزاده، امین. ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ بیست و هشتم. انتشارات دانشگاه امام رضا.
- غزنوی، م.، مساعدی، ا. و قبائی سوق، م. ۱۳۹۷. بررسی تاثیر شرایط اقلیمی بر ماندگاری وضعیت خشکسالی در محدوده شش ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور. هفتمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر بارش. اسفندماه. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- مساعدی، ا.، کواکبی، غ.، و عبدالله‌زاده، س. ۱۳۹۰. آشکارسازی تغییرات اقلیمی براساس آزمون آماری من-ویتنی در شهر مشهد. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی. ازرمه. دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری.
- نظری‌فر، م.ه. بانزاد، ح. و سبزی‌پرور، ع. الف. ۱۳۸۷. پایش ریسک وقوع خشکسالی و کاربرد آن در مدیریت منابع آب (مطالعه موردی: استان همدان). مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. خردادماه. تهران. انجمن ژئوپلتیک ایران.
- Bachmair, S., Svensson, C., Prosdoci, I., Hannaford, J. and Stahl, K. 2017. Developing drought impact functions for drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 17.11:1947-1960.
- Efron, B. 2000. The bootstrap and modern statistics. *Journal of the American Statistical Association*. 95. 45: 1293-1296.
- Fan, G., Zhang, Y., He, Y. and 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: 1-7.
- Fox, J. and Weisberg, S. 2018. An R companion to applied regression. Sage Publications.
- Fraleigh, C., et al. "Package 'ensembleBMA'." 2018
- Hashemi-Ana, S. K., Khosravi, M. and Tavousi, T. 2015. Validation of AOGCMs capabilities for simulation length of dry spells under the climate change in Southwestern area of Iran. *Open Journal Air Pollut*. 4.2: 76-85.
- ISDR and UN. 2007. Drought risk reduction framework and practices: Contributing to the implementation of the Hyogof for action. UN, Switzerland, pages. 98.
- Kamali, B., Houshmand Kouchi, D., Yang, H. and C. Abbaspour, K. 2017. Multilevel drought hazard assessment under climate change scenarios in semi-arid regions—a case study of the Karkheh river

## Meteorological Drought Risk Assessment Using Markov Chain Technique and Introducing a Forecasting Model of Future Periods Impacted by Climate Change (Case Study: Afin Catchment)

Gh. Kavakebi<sup>1</sup>, M. Mousavi Baygi<sup>2\*</sup>, A. Alizadeh<sup>3</sup>, A. Mosaedi<sup>4</sup>, M. Jabbari Noghabi<sup>5</sup>

Received: Mar.11, 2020

Accepted: May.11, 2020

### Abstract

Drought is one of the natural and recurring climatic phenomena that has various effects on economic, social and environmental sectors. Drought, itself, is not a challenge, but it is the beginning of a crisis depending on the degree of vulnerability and impact it has on various sectors. Therefore, this study has attempted to calculate the risk of drought for the baseline period using natural risk definition and to estimate the best model for predicting its rate for future periods affected by different methods under climate change. Accordingly, drought risk was calculated using the two meteorological drought indices SPEI and eRDI the for years 1983-2015. Then, was determined the degree of vulnerability for the Afin area using a questionnaire. After estimating the risk during this time period, with the help of the Markov chain statistical technique, the drought risk characteristics of the region were obtained. Using the four modeling methods the best drought risk prediction model was determined and by using the meteorological variables studied from the three climate models of the CORDEX project the drought risk for the years 2020-2100 was predicted. The results of this study showed a decrease in risk for 2020-2046 and an increase in 2047-2100 based on both RCP4.5 and RCP8.5 compared to the period 1983-1995.

**Keywords:** Natural Risk, Drought Risk, Questionnaire, Climate Change, CORDEX

---

1- Ph.D. Student of Agricultural Meteorology, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Professor Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

3- Professor Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

4- Professor Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

5- Assistant Professor, Department of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(\* - Corresponding Author Email: mousavib@um.ac.ir)