

## Investigation of Markov Chain Uncertainty for Forecasting Hydrological Status Based on Meteorological Status

FAHIMEH RAZI<sup>1</sup>, ALIREZA SHOKOOHI<sup>\*1</sup>

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: March. 8, 2021- Revised: May. 12, 2021- Accepted: May. 17, 2021)

### ABSTRACT

Examining and quantifying the degree of uncertainty in the prediction results of the models is the most important step before using the results of the models in water resources decisions making. In this research, the Markov chain technique was used to predict the hydrological status of the basin according to the amount of precipitation in the previous time step. The present study aims to determine the degree of uncertainty of prediction using the confidence interval of the probability of occurrence of events in different meteorological and hydrological conditions. To assess the uncertainty of the predictions by the 2D Markov chain transfer probability matrix, 20 periods with similar characteristics to historical conditions were simulated by the Monte Carlo method. To determine the uncertainty in estimating the hydroclimatology transfer matrix components, the nonparametric method of ratios for large samples and the exact method based on the sign test for the median of the predicted matrix components were used. The results of the long-term hydroclimatology matrix showed that the hydrological conditions tended to remain normal. The results of uncertainty analysis also indicated that the sign test, as a non-parametric method, in assessing the uncertainty of the Markov Chain acts better, and because the range of probabilities of transfer from different meteorological states to hydrological states is almost the same for all stations, the study basin is considered meteorologically and hydrologically homogeneous.

**Keywords:** Uncertainty, Two-dimensional Markov Chain, Monte Carlo Simulation, Anzali Wetland Watershed.

## بررسی عدم قطعیت زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیک بر اساس وضعیت هواشناسی

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

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۲۷)

### چکیده

بررسی و به کمیّت درآوردن میزان عدم قطعیت در نتایج پیش‌بینی مدل‌ها، مهم‌ترین گام، قبل از استفاده از نتایج مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌های مربوط به پروژه‌های منابع آب است. در این پژوهش برای پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه با توجه به میزان بارش در گام زمانی قبل، از روش زنجیره مارکوف استفاده شد. هدف مطالعه حاضر تعیین میزان عدم قطعیت پیش‌بینی با استفاده از باند اعتماد احتمال رخ داد وقایع در حالت‌های مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌باشد. برای ارزیابی عدم قطعیت حاصله در پیش‌بینی انجام شده به کمک ماتریس احتمال انتقال دوبعدی مارکوف، ۲۰ دوره با وضعیت مشابه با شرایط تاریخی به روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد. برای تعیین عدم قطعیت در برآورد ماتریس احتمال انتقال هیدرولوژیکی به دست آمده با روش زنجیره مارکوف، روش ناپارامتریک نسبت‌ها برای نمونه‌های بزرگ و روش دقیق مبتنی بر آزمون نشانه برای میانه درایه‌های ماتریس پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ماتریس هیدرولوژیکی برای طولانی‌مدت نشان داد که شرایط هیدرولوژیکی تمایل به ماندن در حالت نرمال را دارد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نیز حاکی از آن بود که آزمون نشانه به عنوان یک روش ناپارامتریک در ارزیابی عدم قطعیت زنجیره مارکوف بهتر عمل می‌نماید و چون محدوده احتمالات انتقال از حالات مختلف هواشناسی به هیدرولوژیکی برای همه ایستگاه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد حوضه مورد مطالعه از نظر هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه‌ای همگن محسوب می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** عدم قطعیت، زنجیره مارکوف دو بعدی، شبیه‌سازی مونت کارلو، حوضه آبریز تالاب انزلی.

### مقدمه

و شاید پیچیده‌تر خود را نشان می‌دهد چون که پس از اعمال اثر خشکسالی بر وضعیت منابع آبی سطحی و زیرزمینی منطقه قابل محاسبه‌اند. به این سوال که آیا می‌توان از روی رابطه‌ای قابل اطمینان بعد از بروز خشکسالی هواشناسی و قبل از بروز خشکسالی هیدرولوژیکی با درجه‌ای از احتمال، به رخداد این واقعه پی‌برد پاسخ داده شده است (Razi and Shokoohi, 2020). این دستاورد در آنجا ارزش خود را نشان می‌دهد که بتوان به‌جای مدیریت بحران و به کمک پیش‌بینی به عمل آمده با توجه به زمان تأخیر میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (Razi *et al.*, 2020) از مدیریت ریسک استفاده نمود و بدین ترتیب از میزان خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و زیست‌محیطی ناشی از کمبود جریان کاست. هدف مقاله حاضر در نظر گرفتن عدم قطعیت در فازهای مختلف خشکسالی، زمان تأخیر میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و سپس عدم قطعیت در احتمال انتقال از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی که شرط موفقیت در مدیریت ریسک است، می‌باشد (Razi and Shokoohi, 2021). روش معمول برای پیش‌بینی وضعیت عمومی جریان، استفاده از شاخص‌های خشکسالی

ضرورت تحلیل عدم قطعیت در بررسی‌های هیدرولوژیکی، بخصوص در زمان استفاده از مدل‌های ریاضی، مسئله‌ای غیرقابل انکار می‌باشد. در این میان چگونگی به کمیّت درآوردن عدم قطعیت و یا تعیین میزان اعتمادپذیری نتایج، بسیار حائز اهمیت است. در مدیریت منابع آب آنچه به‌عنوان خشکسالی اثرگذار می‌باشد خشکسالی از نوع هیدرولوژیکی و یا به بیان دیگر، اثرات خشکسالی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی است. این در حالی است که مطالعات خشکسالی بیشتر معطوف به بررسی خشکسالی نوع اول و یا خشکسالی هواشناسی بوده و تحقیقات کمتری در زمینه خشکسالی هیدرولوژیک صورت پذیرفته است. از دیگر مسائل قابل بحث، یافتن ارتباط معنادار میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است. شاخص‌های خشکسالی هواشناسی قادر به تعیین وضعیت خشکسالی یک منطقه تنها پس از وقوع بارش هستند و از آنجا که پیش‌بینی بارش برای بازه‌های زمانی طولانی با عدم قطعیت بالایی همراه است نمی‌توانند در امر مدیریت حوضه‌های آبریز کارآمدی لازم را داشته باشند. این امر در مورد شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی نیز به صورتی دیگر

هواشناسی برای ارزیابی وضعیت یک منطقه از نظر شرایط خشک، تر و یا نرمال و استفاده از مقادیر بارش، به‌عنوان معرف شرایط منطقه می‌باشد. با استناد به این امر که تغییر در شرایط هیدرولوژیک حوضه بر اساس شرایط پیشین بارش در همان حوضه اتفاق می‌افتد و این درواقع به مفهوم اندرکنش دو متغیر تصادفی با یکدیگر می‌باشد، مقوله‌ای نیست که بتوان با آن بصورت قطعی برخورد نمود. در این پژوهش، سعی شده است عدم قطعیت زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه با توجه به میزان بارش در گام زمانی قبل بررسی گردد.

پژوهشگران زیادی از مدل مارکوف برای پیش‌بینی بارش و خشکسالی با اهداف مختلف بهره‌جسته‌اند. مارتین و گومز موفق به تقسیم‌بندی نواحی شمالی اسپانیا با استفاده از زنجیره مارکوف بر مبنای طول دوره‌های خشک گردیدند اما در اجرای این کار در جنوب این کشور موفقیتی کسب نکردند (Martin and Gomez, 1999). بعضی محققان توالی دوره‌های خشک و تر را با استفاده از زنجیره مارکوف همانندسازی کردند (Cao, 1993). گسم احتمال رخداد دوره‌های تر و خشک در منطقه جوبا واقع در جنوب سودان را به کمک زنجیره مارکوف محاسبه کرد و نشان داد دوره‌های تر و خشک طولانی مدت از روند مشخصی پیروی نمی‌کنند بلکه بی‌نظمی‌هایی در توالی این دوره‌ها دیده می‌شود (Gasm, 1987). تیموری و فتح‌زاده با استفاده از نمایه SWSI اصلاح‌شده و مدل زنجیره مارکوف به پایش شاخص منابع آب‌سطحی در حوضه آبخیز اترک پرداختند. نتایج به‌دست آمده حاکی از این بود که احتمال گذر از یک حالت معین به‌همان حالت محتمل‌تر از گذر به سایر شرایط (بین ۶۰ تا ۸۰ درصد) است و هر یک از ایستگاه‌ها مدت زیادی از طول سال را به‌احتمال زیاد در حالت تعادل قرار دارند (Teimouri and Fathzadeh, 2014). در تحقیقی از مدل زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی احتمال وقوع بارش‌های روزانه در ایران استفاده کرد. وی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه اول با دو حالت بارش و بی‌بارش، آرایه فراوانی تشکیل داده و سپس به‌روش حداکثر درست‌نمایی، آرایه احتمال انتقال را محاسبه نمود. انجام آزمون نیکویی برازش  $\chi^2$  پیروی داده‌ها از مدل انتخاب شده را در سطح بالایی تایید کرد (Mahavarpour, 2015). در تحقیقی در بررسی بارش روزانه لامرد در ابتدا مرتبه زنجیره مارکوف مناسب را تشخیص داده و سپس ماتریس احتمال انتقال مربوط به بارش‌های با دوام ۲ تا ۵ روز را بدست آوردند (Tavanpour et al., 2018). در این مطالعه و در تمام مطالعات نظیر آن به بررسی عدم قطعیت زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی پرداخته نشده است. این امر در بقیه مطالعات مصداق نداشته و بخاطر اهمیت ارزیابی عدم قطعیت، در مدل‌سازی منابع آب به طور

اعم و مدل‌سازی بارش-رواناب بطور خاص بدان توجه شده است. همانگونه که گفته شد بررسی و به کمیّت درآوردن میزان عدم قطعیت در نتایج پیش‌بینی مدل‌ها، مهم‌ترین گام، قبل از استفاده از نتایج مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌های منابع آب است. هدف اصلی از تحلیل عدم قطعیت، به کمیّت درآوردن ویژگی‌های آماری خروجی مدل است که به‌طور مستقیم به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها، ورودی‌های مدل و ساختار مدل بستگی دارد (Razi and Shokoochi, 2021). محققان دیگری احتمال وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کشف رود را با استفاده از زنجیره مارکوف بررسی نمودند. ایشان احتمال وقوع خشکسالی را ۹۵٫۵ درصد، ترسالی را ۲٫۲۸ و حالت متوسط دبی جریان را ۱٫۷۸ درصد برآورد نمودند. (Vafakhah and Bashiri, 2011). Delafkar et al., (2021) توانایی زنجیره مارکوف در پیش‌بینی حالت‌های مختلف خشکسالی در رودخانه شاپور استان بوشهر را قابل قبول برآورد نمودند. محققانی با مقایسه روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی در تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل مفهومی بارش-رواناب نتیجه گرفتند که الگوریتم‌های PSO و SCE کارایی بهتری نسبت به دو الگوریتم SFLA و PSO&Hybrid-GA دارند (Sadeghi Tabas and Pourreza, 2015). در مطالعه‌ای دیگر به مقایسه و ارزیابی منابع مختلف عدم قطعیت در مطالعه اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه اعظم-هرات یزد پرداختند و نتیجه گرفتند که عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی بسیار بزرگتر از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و عدم قطعیت مدل‌های AOGCM بزرگتر از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Yaghoobi and Massah Bavani, 2016). در تحقیقی به ارزیابی خشکسالی هیدرو-متنورولوژیکی حوضه رودخانه سرباز بر پایه شاخص تلفیق خشکسالی و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف پرداختند. ایشان با توجه به نتایج اعتبارسنجی و انطباق پیش‌بینی‌ها با واقعیت‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی‌های انتقال حالت‌های خشکسالی به-روش زنجیره مارکوف دارای اعتبار می‌باشند. (Nazari-poor et al., 2016). محققان به تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت بجنورد با استفاده از روش GLUE پرداختند. نتایج تحلیل عدم قطعیت پارامترها حاکی از امکان استفاده از مدل ریاضی آب زیرزمینی آبخوان بجنورد در پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های آتی بود. در این تحقیق از روش ناپارامتریک Sign در تحلیل عدم قطعیت زنجیره مارکوف دوبعدی استفاده گردید (Abedini et al., 2017). Zareie et al., (2017) به پایش و پیش‌بینی خشکسالی ماهانه با استفاده از شاخص بارش استاندارد و زنجیره مارکوف در جنوب شرقی ایران پرداختند. ایشان با پایش خشکسالی‌های

هواشناسی با شدت و دوام مختلف انجام می‌دهد برای اولین بار ارائه شده و روشی نوین را برای اتخاذ تصمیم و مدیریت ریسک در مدل‌هایی که از خواص زنجیره مارکوف برخوردار می‌باشند ارائه می‌نماید.

## مواد و روش‌ها

### خصوصیات منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز تالاب انزلی (فومنات) با مساحتی برابر با ۳۷۴۰ کیلومترمربع می‌باشد. بیشترین و کمترین ارتفاع از سطح دریا در حوضه به ترتیب برابر با ۱۶- تا ۱۸۱۵ متر، میانگین بارندگی در حوضه برابر با ۱۲۶۰ میلی‌متر، بیشینه و کمینه دما برابر با ۳۵ و ۱- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حوضه مورد نظر با نه ایستگاه هواشناسی و ۲۰ ایستگاه هیدرومتری دارای آمار ۳۰ ساله برای مطالعه انتخاب شد. نقشه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه در شکل (۱) آورده شده است.

اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی مورد نیاز از سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای گیلان اخذ گردید. پس از تعیین شرایط نرمال، خشک و یا مرطوب منطقه برای دوره‌های ماهانه با استفاده از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، ماتریس‌های احتمال انتقال شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی و نیز ماتریس تعادل هیدروکلیماتولوژی با استفاده از زنجیره مارکوف دو بعدی تعیین شدند. به منظور تولید داده‌های بارش حدی (ترسالی‌ها و خشکسالی‌های شدید) از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردید. دبی متناظر با بارش‌های مذکور نیز با استفاده از مدل بیلان آب SWAT کالیبره شده تولید شد. نهایتاً با استفاده از روش ناپارامتریک، باند اعتماد احتمال رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی پس از وقوع خشکسالی هواشناسی تعیین گردید.

### وضعیت‌های مختلف خشکسالی هواشناسی

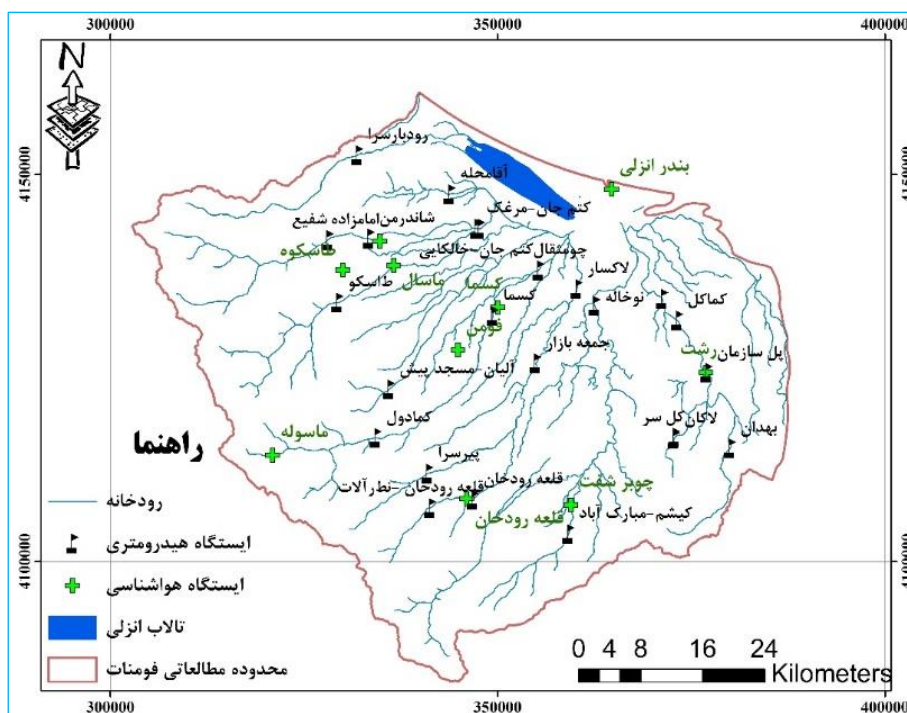
برای تعیین وضعیت خشکسالی هواشناسی شاخص‌های بسیاری معرفی شده‌اند که از این میان شاخص بارش استاندارد (SPI) برای ایران پرکاربردترین شاخص در میان شاخص‌ها به حساب می‌آید. این شاخص که در سال ۱۹۹۴ توسط مک‌کی و همکاران توسعه یافته است احتمال بارش را برای هر بازه زمانی مشخص می‌کند. این شاخص نیاز به دوره آماری ۳۰ ساله دارد. شاخص SPI بر این اصل استوار است که کمبود مقدار بارش تاثیر مختلفی روی آب زیرزمینی، ذخیره آب پشت سدها، رطوبت خاک، ذخیره برفی و جریان رودخانه‌ای دارد. شاخص SPI از داده‌های بارش ماهانه برای تشخیص کمبود میزان بارندگی در مقیاس‌های زمانی چندگانه

سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۴، خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۰ را با استفاده از زنجیره مارکوف پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت و احتمال گذر از حالت مرطوب به خشک، زیاد است درحالی‌که احتمال گذر از حالت خشک به تر کم است. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از روش MCMC در قالب الگوریتم DREAM-AZ به بررسی عدم قطعیت ۲۴ پارامتر بکار رفته در مدل HEC-HMS پرداختند و نتیجه گرفتند که عدد منحنی حساسترین پارامتر در این مدل محسوب می‌شود (Noorali *et al.*, 2017). پژوهشگران دیگری به تحلیل عدم قطعیت پارامترها برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه کرخه با روش GLUE پرداختند که نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل ALSIS-HBV به‌ویژه در دوره واسنجی بود (Shafiei *et al.*, 2018). محققان با استفاده از زنجیره مارکوف به تعریف سه سناریو برای تغییر کاربری اراضی حوضه آبریز سراب زاینده رود در سال ۲۰۳۰ پرداخته و اثرات تغییرات مذکور بر رواناب سطحی لحظه‌ای حاصل از بارش‌ها و رگبارها و نیز جریان متوسط رودخانه که متأثر از برداشت‌های کشاورزان است را با مدل SWAT پیش‌بینی نمودند (Rashtabri and Taleie, 2019). محقق دیگری برای پیش‌بینی سیلاب براساس سیگنال‌های ماهواره‌ای از زنجیره مارکوف یک مرحله‌ای ۲۰ حالت استفاده کردند و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از کمبود داده برای تولید ماتریس احتمال انتقال از روش مونت کارلو استفاده نمودند (Bonakdari *et al.*, 2019). در مطالعه‌ای دیگر در ارزیابی اثر میزان عدم قطعیت پارامترهای ورودی مدل HFLUX برای شبیه‌سازی درجه حرارت رودخانه‌ها از روش زنجیره مارکوف - مونت کارلو (MCMC) در قالب الگوریتم DREAM استفاده کردند و اثر عدم قطعیت پارامترهایی مانند عرض و عمق رودخانه، درصد سایه‌اندازی و میزان ابرناکی را در خروجی مدل ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند که الگوریتم DREAM در برآورد عدم قطعیت مدل‌های کیفیت آب توانمند می‌باشد (Abdi *et al.*, 2020).

همانطوری که ملاحظه گردید در تحقیقات پیشین یا بر توانایی زنجیره مارکوف در پیش‌بینی یک واقعه از طریق تشکیل ماتریس احتمال انتقال پرداخته شده است و یا به بررسی عدم قطعیت وقایع و یا مدل‌ها پرداخته شده است. براین اساس می‌توان گفت که تحقیق پیش‌رو که عدم قطعیت زنجیره مارکوف را با تعیین باند اعتماد درایه‌های ماتریس احتمال انتقال دو بعدی و در واقع روی متغیرهای حالت براساس شبیه‌سازی داده‌های پایه مورد نیاز برای تشکیل ماتریس احتمال انتقال با هدف پیش‌بینی شدت و دوام خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس خشکسالی‌های

استاندارد هم احتمال با احتمال مذکور که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است محاسبه می‌گردد. جدول (۱) طبقه‌بندی شرایط هواشناسی بر اساس این شاخص را نشان می‌دهد.

(۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه) استفاده می‌کند. اولین گام در محاسبه SPI برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه مشخص است (McKee et al., 1995). پس از محاسبه احتمال تجمعی کل، مقدار متغیر تصادفی نرمال



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی در محدوده مطالعاتی

می‌گردد. جدول (۲) شدت‌های حالت‌های هیدرولوژیک بر اساس این شاخص را نشان می‌دهد. بخش مرطوب این شاخص معادل بخش خشکسالی با علامت مخالف بوده و لذا نمایش داده نشده است.

جدول ۱- حالت‌های هواشناسی بر اساس شاخص SPI

مقدار شاخص	شدت ترسالی یا خشکسالی
$SPI > 2$	ترسالی بسیار شدید
$1/5 > SPI > 1/99$	ترسالی شدید
$1 > SPI > 1/49$	ترسالی متوسط
$0/5 > SPI > 0/99$	ترسالی خفیف
$-0/49 > SPI > 0/5$	نرمال
$-0/99 > SPI > -0/5$	خشکسالی خفیف
$-1/49 > SPI > -1$	خشکسالی متوسط
$-1/99 > SPI > -1/5$	خشکسالی شدید
$SPI < -2$	خشکسالی بسیار شدید

جدول ۲- طبقه‌بندی مقادیر شدت شاخص SDI

مقدار شاخص	شدت واقعه
$SDI \geq 0$	نرمال
$0 < SDI < 1$	خشکسالی ضعیف
$-1 < SDI < -1/5$	خشکسالی متوسط
$-1/5 < SDI < -2$	خشکسالی شدید
$SDI < -2$	خشکسالی بسیار شدید

### شاخص وضعیت‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیکی

زنجیره مارکوف وقوع رویدادهایی نظیر خشکسالی، ترسالی، سیلاب، بارش با مقدار معین، ریزش برف در یک زمان خاص، موج گرمایی، آستانه دمایی معین و ... را که نمی‌توان نتیجه آن‌ها را پیش از رخ دادن به طور قطع معلوم کرد فرآیندهای تصادفی می‌نامند. بنابراین در مشاهده‌های مختلف از این رخدادها و هر پدیده مشابه دیگر نتیجه متفاوتی حاصل می‌شود که به‌طور قطع قابل پیش‌بینی نیست. با این وصف از مشاهده پیاپی این قبیل رخدادها آگاهی‌های مفیدی

در این مطالعه برای تعیین وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک، شاخص جریان رودخانه (SDI) مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص که بر اساس حجم تجمعی جریان رودخانه می‌باشد توسط نالبانتیس ارائه شد (Nalbantis, 2008) و سپس در سال ۲۰۰۹ توسط نالبانتیس و ساکاریس برای تعیین خشکسالی هیدرولوژیک توسعه داده شد (Nalbantis and Tsakiris, 2009). شاخص مزبور به‌لحاظ محاسباتی مشابه شاخص SPI است اما از لحاظ مقیاس زمانی به صورت ماهانه یا فصلی (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) استفاده

بزرگ و کوچک، متجاوز از بیست سری زمانی بارش که دارای وقایع حدی با بزرگی، طول و شدت‌های متفاوت تولید و سپس جریان کلیه رودخانه‌های حوضه جریان با استفاده از مدل بیلان آب SWAT شبیه‌سازی شده و به تعداد سری زمانی تولید شده ماتریس احتمال انتقال محاسبه و نهایتاً عدم قطعیت ملازم با زنجیره مارکوف دوبعدی تولید شده برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی از روی خشکسالی هواشناسی، تحلیل گردید. داده‌های پایه مورد نیاز جهت اجرای مدل بیلان آب SWAT که بصورت یک افزونه در نرم افزار ArcMap با نام ArcSwat می‌باشد شامل لایه‌های شیب (DEM)، زمین‌شناسی و کاربری اراضی می‌باشد که از سازمان‌های نقشه‌برداری کشور، زمین‌شناسی کشور و امور اراضی سازمان جهاد کشاورزی استان گیلان اخذ گردید. اطلاعات هواشناسی اعم از بارش، دما، تبخیر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و ... نیز از سازمان هواشناسی کشور (ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی) و شرکت آب منطقه‌ای گیلان (ایستگاه‌های تبخیرسنجی و بارانسنجی) اخذ گردید. مدل مذکور قادر به ترسیم رودخانه‌ها و آبراهه‌ها از روی نقشه DEM می‌باشد و تنها مختصات ایستگاه‌های آب‌سنجی (هیدرومتری) از شرکت آب منطقه‌ای گیلان اخذ گردید. اطلاعات دبی و رواناب در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی به منظور کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که هدف این مطالعه بررسی کارایی مدل بیلان آب در شبیه‌سازی سری‌های جریان نیست از بیان آن خودداری می‌گردد. برای شناخت بیشتر نسبت به زنجیره مارکوف دوبعدی و نحوه استفاده از مدل بیلان آب می‌توان به مراجع (Razi and Shokoohi, 2020) و (Razi et al., 2020) مراجعه نمود.

به منظور تعیین باند اعتماد برای احتمالات به‌دست آمده از ماتریس احتمال انتقال برای حالات مختلف خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، لازم است از روش باند اعتماد ناپارامتریک نسبت-ها استفاده نمود. در روش باند اعتماد ناپارامتریک برای نسبت‌ها، از توزیع دوجمله‌ای استفاده می‌شود. با توجه به تعداد نمونه‌ها، فرمول مورد استفاده برای باند اعتماد متفاوت خواهد بود. در روش اول پس از مرتب کردن نسبت‌ها، برای جامعه بزرگ یعنی تعداد نمونه  $n \geq 20$ ، با استفاده از جدول توزیع نرمال استاندارد، مقدار  $Z_{\alpha/2}$  با توجه به سطح معناداری موردنظر (برای مثال ۰.۹۵) تعیین و با استفاده از معادلات ۱ و ۲ حد بالا و پایین شماره ردیف نسبت‌ها به دست خواهد آمد:

$$R_l = np + z_{\alpha/2} * \sqrt{np(1-p)} + 0.5 \quad (\text{رابطه ۱})$$

به‌دست می‌آید که از طریق قوانین احتمالی قابل تعریف هستند. زنجیره مارکوف، از جمله روش‌های پیش‌بینی احتمالاتی برای سری‌های زمانی ناپیوسته است. مدل زنجیره مارکوف از تکنیک‌های ریاضی برای تحلیل پدیده‌های تصادفی است که تداومی از مشاهدات را در طول زمان نشان می‌دهد. در واقع در روش زنجیره مارکوف یک سری از مشاهدات و تغییر هر کدام از مشاهدات، از حالتی به حالت دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. زنجیره مارکوف با روش‌های ساده ریاضی (مانند ضرب آرایه‌ها) حل احتمالات مربوط به فرآیندهای وابسته را بسیار آسان نموده است. در صورتی که ماتریس احتمال انتقال بی‌نهایت بار در خود ضرب شود، احتمال انتقال از حالت‌های مختلف به عدد ثابتی میل داده می‌شود که ماتریس احتمال تعادل نامیده شده و به کمک آن وضعیت زنجیره در درازمدت قابل پیش‌بینی خواهد بود. به‌منظور برآورد احتمال رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی با داشتن احتمال رخداد خشکسالی هواشناسی، از زنجیره مارکوف خاصی استفاده می‌گردد که برخلاف آنچه که متعارف است، سطرهایش معرف وضعیت خشکسالی هواشناسی و ستون‌هایش معرف وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی باشند (Razi et al., 2020). در این مطالعه سعی شده است عدم قطعیت این ماتریس که اصطلاحاً ماتریس زنجیره مارکوف دوبعدی نامیده می‌شود بررسی شود.

#### عدم قطعیت زنجیره مارکوف

عدم قطعیت از دو منبع ناشی می‌شود. عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش<sup>۱</sup> و دیگری عدم قطعیت ناشی از ذات تصادفی داده‌ها<sup>۲</sup>. در حالت اول انتخاب نوع مدل قابل برازش بر پدیده، تعیین دقیق پارامترهای مدل و در حالت دوم تعداد داده کافی از متغیر تصادفی معرف میزان عدم قطعیت می‌باشد (Habibnejad and Shokoohi, 2020; Amirmoradi et al., 2020). براین اساس وجود عدم قطعیت در برآورد ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف محرز است و این عدم قطعیت برای هر یک از درایه‌های ماتریس احتمال انتقال وجود دارد. مشکلی که در اینجا ظاهر می‌شود آن است که کل سری آماری تاریخی هواشناسی و جریان ثبت شده در رودخانه‌های حوضه آبریز تحت مطالعه، عملاً فقط یک آزمون محسوب شده و به عبارت بهتر، جامعه آماری لازم برای محاسبه عدم قطعیت درایه‌های ماتریس احتمال انتقال با روش‌های معمول وجود ندارد. در مطالعه حاضر برای ایجاد جامعه لازم برای نمونه‌گیری به‌منظور تحلیل عدم قطعیت، از روش مونت کارلو استفاده شد. در این راستا و با توجه به تعادل رسیدن ماتریس احتمال انتقال و قرار گرفتن در مرز نمونه‌گیری از جامعه

قلعه‌رودخان در شرایط نرمال هواشناسی قرار گیرد، به احتمال ۸۶٪ شرایط هیدرولوژیک منطقه نیز نرمال خواهد بود و اگر از نظر هواشناسی در وضعیت خشکسالی قرار گیرد منطقه تنها با شانس ۵۹٪ در وضعیت نرمال هیدرولوژیک است. در حالی که با احتمال ۳۷٪ در وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک و با احتمال بسیار ضعیف ۵٪ در شرایط ترسالی هیدرولوژیک خواهد بود. اهمیت نتایج بدست آمده آن است که با دانستن شرایط خشکسالی هواشناسی در حال حاضر در منطقه موردنظر می‌توان شرایط خشکسالی هیدرولوژیک در منطقه را با توجه به گام زمانی مورد استفاده در مطالعه با احتمالی که در ماتریس هیدروکلیماتولوژیکی بدست آمده است، پیش‌بینی نمود. برای ماتریس تعادل (سمت راست در جدول ۳) نیز می‌توان گفت که به عنوان مثال منطقه قلعه‌رودخان در حالت کلی با قرار گرفتن در وضعیت نرمال هواشناسی به‌طور متوسط در ۸۰ درصد موارد در وضعیت نرمال هیدرولوژیک قرار دارد. از آنجا که ماتریس احتمال تعادل شرایط منطقه را در درازمدت مشخص می‌نماید، می‌توان برای درازمدت شرایط هیدرولوژیک منطقه را بر اساس شرایط هواشناسی پیش‌بینی نمود. شکل (۲) نمودار احتمال انتقال کلاس‌های مختلف هیدروکلیماتولوژی را نشان می‌دهد. نتیجه‌ای که از این نمودار استخراج می‌شود آن است که احتمال باقی ماندن در شرایط به ترتیب نرمال، مرطوب و خشک ۸۰، ۵۰ و ۴۰ درصد می‌باشد. شکل (۳) نمودار احتمال تعادل هیدروکلیماتولوژی را نشان می‌دهد. این نمودار نتیجه اخیر را تایید می‌نماید. بر طبق نتایج حاصل از این نمودار در درازمدت، احتمال انتقال از هر حالت هواشناسی به حالت نرمال هیدرولوژیکی از بالاترین مقدار برخوردار است.

جدول ۳- ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی و تعادل برای ایستگاه قلعه‌رودخان

	M1	W	N	D		M4	W	N	D
W	۰/۳۸	۰/۶	۰/۰۲		W	۰/۰۹	۰/۸	۰/۱۱	
N	۰/۰۶	۰/۸۶	۰/۰۸		N	۰/۰۹	۰/۸	۰/۱۱	
D	۰/۰۵	۰/۵۹	۰/۳۷		D	۰/۰۹	۰/۸	۰/۱۱	

آخرین و مهمترین گام مطالعه حاضر، بررسی عدم قطعیت-های موجود و تعیین باند اعتماد نتایج به‌دست آمده از ماتریس احتمال انتقال مارکوف برای پیش‌بینی حالات خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس خشکسالی هواشناسی می‌باشد. برای پیش‌بینی شرایط حدی هیدرولوژیکی، نیاز به تولید دوره‌های طولانی‌تر و با بزرگی بیشتر خشکسالی هواشناسی وجود دارد. از

$$R_{ii} = np + z_{[1-\alpha/2]} * \sqrt{np(1-p)} + 0.5 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در معادلات فوق  $n$  تعداد نمونه،  $p$  احتمال وقوع و  $R_{ii}$  و  $R_{ij}$  نیز به ترتیب حد پایین و حد بالای باند اعتماد برای هر عضو ماتریس انتقال را نشان می‌دهند. روش دوم برای تعیین باند اعتماد زنجیره مارکوف، استفاده از روش دقیق برای تعداد نمونه کوچک  $n \leq 20$  است. آماره آزمون در این حالت از توزیع دوجمله‌ای تبعیت می‌کند که برای میانه، باند اعتماد بزرگتری نسبت به فرمول‌های ۱ و ۲ به دست می‌دهد. برای تعیین باند اعتماد حول میانه در حالت دقیق می‌توان از آزمون نشانه<sup>۱</sup> برای  $p=0.5$  استفاده نمود. در این مطالعه روش دوم به دلیل ناپیوستگی درایه‌های ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف برای بررسی عدم قطعیت بکارگرفته شد و نتایج آن با روش مخصوص جوامع بزرگ کنترل گردید.

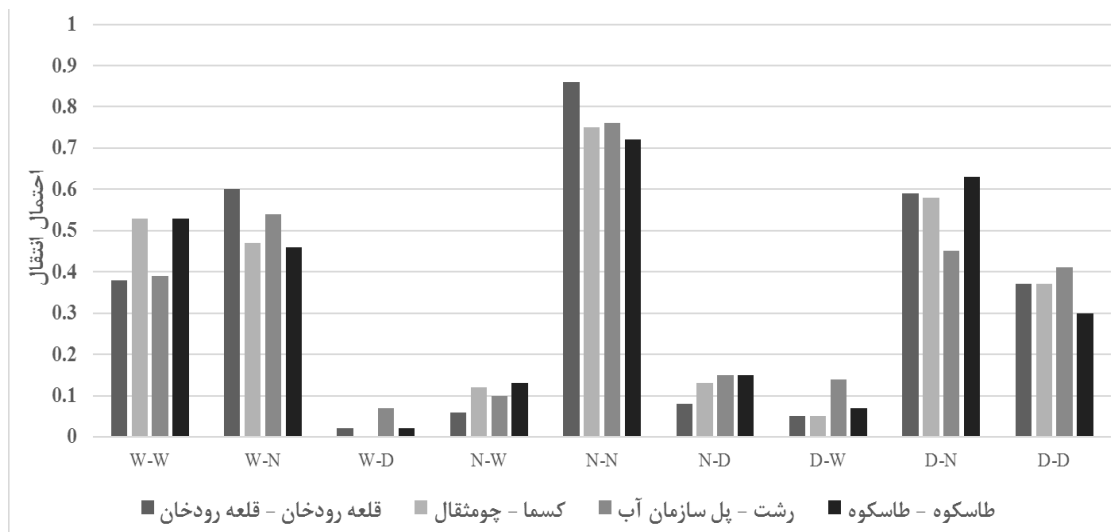
## نتایج

پیش از رسیدن به ماتریس هیدروکلیماتولوژی، ماتریس‌های هواشناسی و هیدرولوژی تشکیل شده و سپس بر اساس این دو ماتریس، ماتریس هیدروکلیماتولوژی به‌دست می‌آید (Razi et al., 2020). به‌منظور دست یافتن به هدف اصلی مطالعه که یافتن عدم قطعیت ناشی از ارتباط میان دو نوع خشکسالی و اثر آن بر پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک بر اساس خشکسالی هواشناسی می‌باشد، برای رودخانه‌هایی که بر روی آن‌ها هم ایستگاه هواشناسی و هم ایستگاه هیدرولوژی وجود دارد، ماتریس احتمال انتقال دوبعدی هیدروکلیماتولوژی تشکیل داده شد. خاصیت این ماتریس آن است که یک بعد آن وضعیت هواشناسی و یک بعد آن وضعیت هیدرولوژیک حوضه را نشان می‌دهد. با ضرب این ماتریس در خودش ماتریس احتمال تعادل به‌دست می‌آید. جدول (۳) ماتریس هیدروکلیماتولوژی (سمت چپ) و ماتریس احتمال تعادل متناظر آن (سمت راست) برای ایستگاه مشترک هواشناسی و هیدرولوژیک قلعه‌رودخان را نشان می‌دهد. ستون‌های حرفی در هر دو بخش راست و چپ جدول حالت‌های<sup>۲</sup> ممکن هواشناسی و سطرها حرفی معرف حالت‌های ممکن هیدرولوژیکی حوضه می‌باشند. در جدول (۳) حروف W, N و D به ترتیب نشان‌دهنده فازهای نرمال، مرطوب و خشک هواشناسی و هیدرولوژیک می‌باشد. از طرفی M4 بدان معناست که با ۴ مرتبه ضرب کردن ماتریس در خودش، حالت تعادل به دست آمده است. تفسیر نتایج جدول (۳) برای ماتریس احتمال انتقال (سمت چپ در جدول ۳) به این صورت است که اگر به‌عنوان مثال منطقه

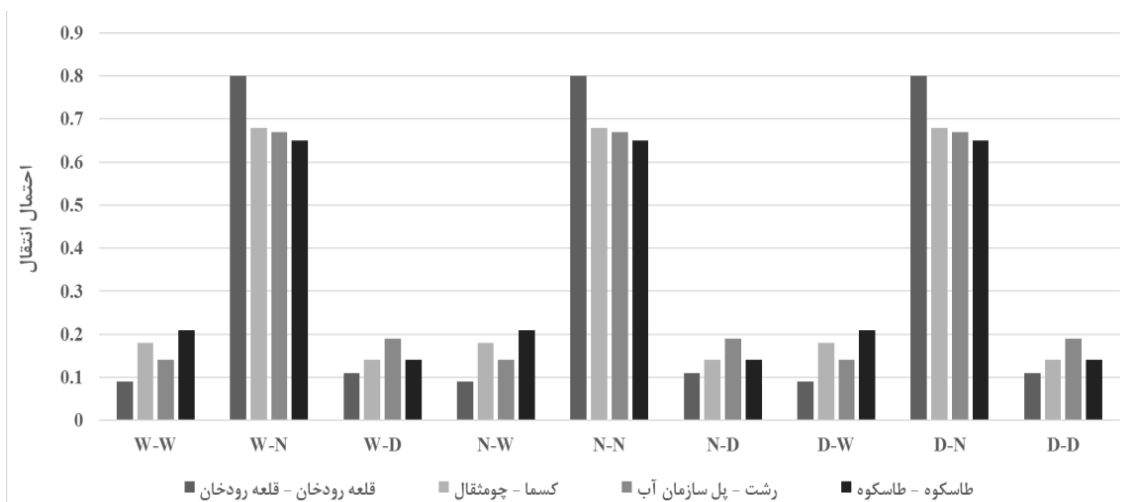
(سطر به رنگ زرد) مربوط به روش میان (روابط ۱ و ۲) و باند اعتماد کوچکتر (سطر به رنگ آبی) مربوط به روش نسبتها می‌باشد. جدول (۵) خلاصه نتایج مربوط به باند اعتماد ماتریس-های احتمال انتقال را برای کلیه ایستگاههای مشترک در روش برآورد دقیق نسبتها با استفاده از آزمون نشانه را نشان می‌دهد. در جداول ۴ و ۵ حروف نشان‌دهنده گذر از فاز هواشناسی به فاز هیدرولوژیکی می‌باشد. برای نمونه ND گذر از فاز نرمال هواشناسی به فاز خشک هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد.

همانگونه که در جدول (۵) ملاحظه می‌گردد، محدوده احتمالات انتقال از حالات مختلف هواشناسی به هیدرولوژی برای هر چهار ایستگاه مورد مطالعه تقریباً یکسان می‌باشد و تفاوت چشمگیری بین آنها مشاهده نمی‌شود. یکی از نتایج حاصله از این نزدیکی اعداد در هر حالت انتقال می‌تواند آن باشد که حوضه مورد مطالعه نه تنها از نظر هواشناسی بلکه از نظر هیدرولوژیکی نیز به تقریب حوضه‌ای همگن می‌باشد.

طرف دیگر با تولید سری داده‌های حدی می‌توان عدم قطعیت نتایج زنجیره مارکوف را نیز با تعیین باند اعتماد برای احتمالات به دست آمده، مدنظر قرار داد. همانگونه که گفته شد با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، ۲۰ سری داده‌های بارش شبیه‌سازی و به عبارت دیگر تولید شده و سپس مقادیر دبی متناظر با این بارش‌ها با استفاده از مدل بیان آب SWAT به دست آمد و در نهایت شدت‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک محاسبه شد. بدین ترتیب برای همه حالت‌های شبیه‌سازی شده، ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی تشکیل و سپس ماتریس احتمال تعادل متناظر با آن محاسبه گردید. بدینوسیله با احتساب ماتریس احتمال انتقال مشاهداتی، ۲۱ ماتریس احتمال انتقال به-دست می‌آید که برای تعیین باند اعتماد از روش ناپارامتریک برای نسبتها استفاده می‌شود. جدول (۴) نتایج محاسبه باند اعتماد برای احتمالات انتقال برای ایستگاه مشترک هواشناسی و هیدرومتری قلعه‌رودخان را نشان می‌دهد. باند اعتماد بزرگتر



شکل ۲- نمودار احتمال انتقال کلاس‌های هیدروکلیماتولوژی



شکل ۳- نمودار احتمال تعادل کلاس‌های هیدروکلیماتولوژی



جدول ۴- باند اعتماد ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی ایستگاه قلعه رودخان

	DD	DN	DW	ND	NN	NW	WD	WN	WW	
۱	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۱۷	۱
۲	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۳۸	۲
۳	۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۵۲	۳
۴	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۵۳	۴
۵	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۷۸	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۵۵	۵
۶	۰/۵۹	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۵۶	۶
۷	۰/۶۴	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۱	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۵۹	۷
۸	۰/۶۶	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۲	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۶۴	۸
۹	۰/۶۷	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۲	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۶۵	۹
۱۰	۰/۶۷	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۸۳	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۶۵	۱۰
۱۱	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۸۴	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۶۶	۱۱
۱۲	۰/۷۹	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۸۴	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۶۹	۱۲
۱۳	۰/۸۱	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۸۵	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۷۰	۱۳
۱۴	۰/۸۲	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۸۶	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۷۰	۱۴
۱۵	۰/۸۴	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۸۷	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۳۶	۰/۷۳	۱۵
۱۶	۰/۸۶	۰/۳۷	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۸۹	۰/۱۷	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۷۳	۱۶
۱۷	۰/۹۰	۰/۶۴	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۷۶	۱۷
۱۸	۰/۹۳	۰/۶۸	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۹۱	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۴۵	۰/۷۶	۱۸
۱۹	۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۹۲	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۴۷	۰/۷۹	۱۹
۲۰	۱/۰۰	۰/۷۶	۰/۲۲	۰/۱۰	۰/۹۹	۰/۲۴	۰/۰۷	۰/۶۰	۰/۹۴	۲۰
۲۱	۱/۰۰	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۷۶	۰/۹۴	۲۱

جدول ۵- باند اعتماد ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی برای ایستگاه‌های مشترک

ایستگاه	WW	WN	WD	NW	NN	ND	DW	DN	DD
قلعه رودخان	۰/۵۹-۰/۷۳	۰/۲۷-۰/۳۶	۰-۰	۰/۰۹-۰/۱۶	۰/۸۱-۰/۸۷	۰/۰۱-۰/۰۵	۰-۰/۰۹	۰/۰۷-۰/۲۵	۰/۶۴-۰/۸۴
کسما-چومثقال	۰/۷۲-۰/۷۹	۰/۲۱-۰/۲۸	۰-۰	۰/۰۵-۰/۰۸	۰/۸۴-۰/۸۷	۰/۰۶-۰/۰۸	۰-۰	۰/۳۷-۰/۲۸	۰/۷۲-۰/۶۳
رشت-پیربازار	۰/۷۴-۰/۸	۰/۲۰-۰/۲۶	۰-۰	۰/۰۶-۰/۰۸	۰/۸۶-۰/۸۸	۰/۰۵-۰/۰۷	۰-۰	۰/۲۱-۰/۲۴	۰/۷۶-۰/۸۳
طاسکوه-طاسکوه	۰/۷۱-۰/۸۴	۰/۱۶-۰/۲۹	۰-۰	۰/۰۵-۰/۰۹	۰/۸۳-۰/۸۸	۰/۰۷-۰/۰۸	۰-۰	۰/۳۳-۰/۳۵	۰/۷۷-۰/۷۹

### بحث

حالتها به حالت نرمال بود. از این یافته می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل ضعیف بودن درجه خشکسالی و یا ترسالی هواشناسی و یا کم بودن تداوم آن، شرایط هیدرولوژیک رودخانه در دراز مدت در حالت نرمال باقی می‌ماند.

یکی از مهمترین‌های یافته‌های تحقیق مربوط به باند اعتماد حول مقادیر درایه‌های ماتریس احتمال انتقال می‌باشد. براساس یافته‌های جدول (۵) در تقریباً همه موارد آریبی در باند اعتماد یعنی نابرابری فاصله میان حد بالا و پایین تا میانه مقدار محاسبه شده برای درایه‌های احتمال انتقال دیده می‌شود. این امر اولاً نشان می‌دهد تکیه بر استفاده از روش مونت کارلو که با توسل به قضیه حد مرکزی بنا را بر نرمال بودن توزیع نمونه حاصل از شبیه‌سازی به تکرار زیاد پارامتر مورد نظر می‌گذارد در این مورد قابل استفاده نبوده و از طرف دیگر استفاده از روش دقیق در مقابل استفاده از آماره Z برای تعیین میزان عدم قطعیت از صحت

براساس یافته‌های تحقیق که در جدول (۳) و شکل (۲) نشان داده شد احتمال آنکه کلاس خشکسالی هیدرولوژیکی با خشکسالی هواشناسی همان ماه یکسان باشد از ۴۰ تا ۸۰ درصد است که نشان‌دهنده وجود حالت پایداری (persistence) در منطقه طرح است. همینطور براساس یافته‌های مندرج در جدول و شکل مزبور احتمال رسیدن از هر شرایطی به حالت نرمال، در ماتریس هیدروکلیماتولوژی از مقدار بالایی برخوردار است که می‌تواند بیانگر این مهم باشد که بزرگی و یا دوام خشکسالی و یا ترسالی‌های هواشناسی در غالب اوقات دوره آماری (احتمال ۶۰ تا ۸۰ درصد) کمتر از آن بوده است که بتواند منجر به تغییر شرایط هیدرولوژیک رودخانه از حالت نرمال به خشک و یا تر گردد. همینطور براساس یافته‌ها، در ماتریس احتمال تعادل هیدرولوژیکی (شکل ۳) بیشترین احتمال مربوط به انتقال همه

درازدت تایید نمود.

برای تعیین باند اعتماد برای نتایج پیش‌بینی‌های ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی از دو روش ناپارامتریک نسبت-ها برای نمونه‌های بزرگ و آزمون دقیق نشانه برای باند اعتماد حول میانه به عنوان معیار عدم قطعیت در پیش‌بینی در تکنیک زنجیره مارکوف استفاده شد. از آنجا که وضعیت موجود به ازای ۳۰ سال دوره آماری تنها یک عضو از ماتریس احتمال انتقال را بدست می‌دهد شرایط تاریخی هواشناسی با استفاده از روش مونت کارلو برای ۲۰ دوره سی ساله تکرار گردید. با استفاده از مدل SWAT مقادیر بارش در هر دوره شبیه‌سازی به رواناب تبدیل شد و در نهایت ماتریس احتمال انتقال دو بعدی هیدروکلیماتولوژیکی با ۲۰ تکرار بدست آمد. برای تعیین میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیکی بر اساس شرایط هواشناسی از باند اعتماد حول میانه به عنوان عضوی با احتمال رخداد ۵۰ درصد استفاده به عمل آمد. از میان دو روش تعیین عدم قطعیت دقیق مبتنی بر توزیع دو جمله‌ای و روش جوامع بزرگ به علت آریبی باند اعتماد حول میانه روش دقیق برای محاسبه عدم قطعیت پیش‌بینی روش مناسب‌تری تشخیص داده شد. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به دستیابی به عدم قطعیت درایه‌های ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف با روش مونت-کارلو، علیرغم آنکه ماهیت داده‌ها به‌وقایعی ناپیوسته اشاره دارد اشاره نمود. کم بودن عدم قطعیت پیش‌بینی در تمام حالت‌های انتقال هیدروکلیماتولوژیکی نشان می‌دهد که درحوزه مطالعاتی می‌توان از میانه سری زمانی هواشناسی - هیدرولوژیکی در هر زیرحوزه از حوضه فومنتات برای پیش‌بینی شرایط آبی و بدون توسل به روش‌های پیچیده شبیه‌سازی نظیر مونت کارلو استفاده نمود. از طرف دیگر همگنی حوضه آبریز تالاب انزلی از منظر هواشناسی و هیدرولوژیکی به مدیران و تصمیم‌گیران منابع آب این امکان را می‌دهد تا وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی و زمان وقوع آن را از روی وضعیت و زمان وقوع خشکسالی هواشناسی با دقتی مناسب تخمین بزنند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abdi B, Bozorg-Haddad O, Loáiciga, H.A. (2020) Analysis of the effect of inputs uncertainty on riverine water temperature predictions with a Markov chain Monte Carlo (MCMC) algorithm. *Environ Monit Assess*, 192, 100. <https://doi.org/10.1007>
- Abedini M, Ziai A, Shafiei M, Ghahraman B, Ansari H, Meshkini J. (2017) Uncertainty assessment of groundwater flow modeling by using the generalized likelihood uncertainty estimation method (case study: Bojnourd plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(6): 755-769. (In Farsi)
- Amirmoradi K, Shokoohi A, Azizian A. (2020) Evaluating the risk of economic loss due to river flood in urban areas (study area: Kan watershed, 50(9): 2239-2259. (In Farsi)
- Bonakdari H, Zaji AH, Binns AD, Gharabaghi B (2019) Integrated Markov chains and uncertainty analysis techniques to more accurately forecast floods

بیشتری برخوردار است. از طرف دیگر مقایسه عدد میانه برای تمام درایه‌های ماتریس انتقال در سراسر حوضه که در جدول (۵) آورده شده است نشان می‌دهد که اختلاف میانه با حد بالا و پایین باند اعتماد در اکثر موارد کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. این امر از یک طرف نشان‌دهنده وضعیت باثبات هواشناسی و هیدرولوژیکی منطقه می‌باشد و از طرف دیگر نشان می‌دهد که استفاده از میانه داده‌ها برای پیش‌بینی می‌تواند با خطایی کم، مقرون به واقعیت باشد؛ لذا می‌توان برای تولید سناریوهای مدیریت منابع آب در منطقه مستقیماً از عدد میانه و بدون توسل به روش‌هایی نظیر مونت کارلو برای دیدن کلیه حالت‌های ممکن استفاده نمود. در نهایت تناسب نتیجه بدست آمده برای باند اعتماد درایه‌ها با مشاهدات منطقه، که هم داده‌های هواشناسی و هم داده‌های هیدرولوژیکی آن از ضریب تغییرات کمی برخوردار می‌باشند، نشان‌دهنده صحت روش مورد استفاده در شبیه‌سازی بارش، رواناب و نهایتاً تولید زنجیره مارکوف (ماتریس احتمال انتقال) و باند اعتماد تولید شده با روش مونت کارلو برای بیان میزان عدم قطعیت پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی بر اساس وضعیت هواشناسی می‌باشد. همگنی حوضه از منظر هواشناسی و هیدرولوژیکی به مدیران و تصمیم‌گیران منابع آب این امکان را می‌دهد تا وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی و زمان وقوع آن را از روی وضعیت و زمان وقوع خشکسالی هواشناسی تخمین بزنند.

## نتیجه‌گیری

برای پیش‌بینی کلاس‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس خشکسالی هواشناسی با استفاده از ماتریس احتمال انتقال مرتبه اول دو بعدی سه حالت مارکوف، احتمالات انتقال از حالات مختلف خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی به دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان داد با احتمال ۴۰ تا ۸۰ درصد کلاس‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی یکسانی در هر ماه به وقوع می‌پیوندد. از طرف دیگر اگر دوام و شدت خشکسالی هواشناسی زیاد نباشد شرایط هیدرولوژیکی تمایل به ماندن در حالت نرمال داشته و تغییر وضعیت نخواهد داد. ماتریس احتمال تعادل هیدروکلیماتولوژی نیز نتیجه اخیر را برای

- using satellite signals. *Journal of Hydrology*, 572: 75-95.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.027>
- Cao, C. (1993) Time serials of rainfall and their stochastic simulation', urban storm drainage. Italy, 25-28 July, 45-62.
- Delafkar H, Zareie T, Roohian M.(2012). Surface water resources Management using the Markov chain method (Case study: Occurrence of different hydrological states in Shapoor river of Bushehr province). The Second National Conference on Modern Management Sciences. (In Farsi)
- Gasm. A. M. (1987) An application of Markov chain model for wet and dry spells probabilities at Juba in Southern Sudan. *Geo Journal*, 15.4, 420-424.
- Habibnejad R, Shokoohi A. (2020) Uncertainty analysis of IDF curves simulation under climate change scenarios using a weather generator model (case study: Tehran). *Iran-Water Resources Research*, 16(2): 164-177. (In Farsi)
- Mahavarpour Z. (2015) The analyze occurrences daily precipitation probability in Iran by using the Markov Chain model. *GEOGRAPHICAL RESEARCH*, 4(115); 229-240.
- Martin- Vide J, Gomez, L. (1999) Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells. *Int. J. of Climatology*, 19: 537-555.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1995) Drought monitoring with multiple timescales. 9th conference on Applied Climatology, TX. The USA. 233-236.
- Nalbantis I, Tsakiris G. (2009) Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*, 23(5): 881-897.
- Nalbantis, I. (2008) Evaluation of hydrological drought index. *Journal of European water*, 23/24: 67-77.
- Nazaripoor H, Karimi Z, Sedaghat M. (2016). Hydro-meteorological drought assessment based on integrated drought index and its forecast with Markov chain in Sarbaz river basin (southeast of Iran). *Journal of Soil and Water Sciences*. 20(1). 151-169. (In Farsi)
- Noorali M, Ghahraman B, Poorreza M, Davari K. (2017). Estimation of HEC-HMS Flood Simulation Model Uncertainty Using Markov Chain Monte Carlo Algorithm. *Watershed Management Research Journal*.15. 235-249. (In Farsi)
- Rashtabri M, taleie M. (2019) Prediction of land use changes and its hydrological effects using Markov chain and SWAT model in Sarab Zayandehrood catchment area. *Journal of Spatial Information Technology Engineering*. 7(4). 41-59. (In Farsi)
- Razi F, Shokoohi A, Eslami A. (2020) Forecasting Hydrological Regime Based on Rainfall Regime Using Two-dimensional Markov Chain in Anzali Watershed. *Journal of ECOHYDROLOGY*, 7(3): 663-674. (In Farsi)
- Razi F, Shokoohi A. (2020) Determining and Estimating the Lag time between Meteorological and Hydrological Drought Using a Water Balance Model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 12(3): 712-724. (In Farsi)
- Razi F, Shokoohi A. (2021) Determining the Effect of Intensity and Duration of Drought on the Lag Time Between Meteorological and Hydrological Drought and Examining Uncertainties (Case Study: Anzali Basin). *Journal of ECOHYDROLOGY*, 7(4): 843-854. (In Farsi)
- Sadeghi Tabas S, Pourreza bilondi M. (2015) Comparison of optimization and uncertainty analysis methods in hydrological modeling. *Journal of Range and Watershed Management*, 68(3): 533-552. (In Farsi)
- Shafiei M, Ghahraman B, Saghafian B. (2018) A review on hydrological model-ling concepts, part2: uncertainty assessment concepts. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(1): 35-40. (In Farsi)
- Tavanpour N, Ghaemi A, Honar T, Shirvan A. (2018) Investigation the occurrence probability and persistence of rainy days by using Markov Chain model (case study: Lamerd city). *Iran-Water Resources Research*, 14(2): 89-99. (In Farsi)
- Teimouri M. Fathzadeh A. (2014) Monitoring of Surface water resources availability in the Atrak River using the modified SWSI index and Markov Chain model case study: Atrak basin. *GEOGRAPHY AND DEVELOPMENT*, 12(34): 99-107. (In Farsi)
- Vafakhah M. Bashiri seghale M.(2011).Investigation of the probability of occurrence of the wet season and hydrological drought using Markov chain in Kashfarood watershed. *Journal of Watershed Management Research*. 94. 1. (In Farsi)
- Yaghobi M, Massah Bavani A. (2016) Comparison and evaluation of different sources of uncertainty in the study of climate change impact on runoff in semi-arid basins (case study: Azam Harat river basin, 11(3); 113-130 (In Farsi)
- Zareie A, Moghimi M, Bahrani M. (2017). Monthly Drought Monitoring and Prediction Using Standard Precipitation Index and Markov Chain (Case Study: Southeast Iran). *Geography and Environmental Sustainability Journal*.23. 39-51. (In Farsi)