اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۷، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۹، ص ۶۷۴-۶۶۳

پیش‌بینی رژیم هیدرولوژیک مبتنی بر رژیم بارندگی با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف دوبعدی در حوضهٔ انزلی

فهیمه رضی[۱]، علیرضا شکوهی[۲*]، علیرضا اسلامی[۳]

۱. دانش‌آموختهٔ دکتری مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین

۳. استادیار پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۱۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۳/۲۶)

چکیده

به‌رغم ضرورت پیش‌بینی رژیم جریان در رودخانه‌ها به‌خصوص در شرایط خشکسالی هیدرولوژیک، پیشرفت چندانی در این زمینه به وجود نیامده است و همچنان برای پیش‌بینی جریان، از سری زمانی دبی و یا شاخص‌های بدون بعد استفاده می‌شود. در مطالعهٔ پیش رو، پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیک جریان در رودخانه براساس وضعیت حوضه از نظر بارندگی با استفاده از مفاهیم زنجیرهٔ مارکوف صورت گرفته است و برای مطالعهٔ موردی از حوضهٔ تالاب انزلی با ۹ ایستگاه هواشناسی و ۲۰ ایستگاه هیدرومتری طی سال‌های آماری ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ استفاده شده است. برای پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیک رودخانه‌ها بعد از مشاهدهٔ هر حالت هواشناسی از نظر بارش در حوضه، از ماتریس احتمال انتقال دوبعدی مارکوف استفاده شد. وجه مشخصهٔ ماتریس احتمال انتقال دوبعدی نسبت به آنچه تا کنون مرسوم بوده است، استفاده از دو فاز مختلف جریان رطوبت در پروسهٔ هیدرومتئورولوژیکی در کنار هم است، به گونه‌ای که ستون‌های ماتریس معرف حالت هواشناسی و سطرهای آن، معرف شرایط هیدرولوژیک هستند. ارزیابی شرایط حوضهٔ انزلی نشان داد با احتمال بیش از ۵۰ درصد وضعیت حوضه از نظر هواشناسی و هیدرولوژیک در هر ماه یکسان است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از ماتریس دوبعدی احتمال انتقال، پیش‌بینی می‌شود در صورتی که حوضه از نظر هواشناسی در شرایط نرمال، مرطوب و خشک باشد، وضعیت جریان در رودخانه‌ها در ماه بعد با احتمال به‌ترتیب ۸۰، ۵۰ و ۴۰ درصد در شرایط یادشده خواهد بود. براساس نتایج به‌دست‌آمده با محاسبهٔ امید ریاضی دبی‌های متناظر با شرایط هیدرولوژیک پیش‌بینی‌شده براساس وضعیت هواشناسی گام قبل، میزان جریان محتمل در حوضه پیش‌بینی می‌شود.

کلیدواژگان: پیش‌بینی جریان، زنجیرهٔ مارکوف دوبعدی، فاز هواشناسی، فاز هیدرولوژیک.

* نویسندهٔ مسئول

Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

معمول‌ترین روش پیش‌بینی جریان برای گام‌های زمانی کوتاه (در حد کسری از سال)، استفادهٔ مستقیم از دبی مشاهده‌شده و بهره‌گیری از مدل‌های سری زمانی مانند مدل‌های خانوادهٔ ARMA برای پیش‌بینی در یک یا چند گام زمانی است. روش دیگر برای دوری جستن از مشکلات اعمال روش‌های پارامتریک روی داده‌های خام، استفاده از شاخص‌هایی مانند SDI و SRI و سپس، برازش یک مدل سری زمانی به منظور پیش‌بینی در کنار استفاده از منحنی دبی کلاسه یا منحنی تداوم جریان برای پیش‌بینی کلاس خشکسالی یا ترسالی در گام زمانی بعد و در نهایت، تبدیل مقدار اندکس پیش‌بینی‌شده به دبی محتمل است. استفاده از روش‌های رگرسیونی با استفاده از مؤلفهٔ زمان به جای متغیر مستقل (x) و دبی جریان یا شاخص بدون بعد نیز مرسوم است. یک روش معمول برای پیش‌بینی وضعیت عمومی جریان، استفادهٔ ضمنی از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی برای ارزیابی وضعیت یک منطقه از نظر خشکسالی/ترسالی و اعلام کمبود/مازاد بارش برای عموم، به عنوان معرف تمام ابعاد خشکسالی/ترسالی منطقه است. با الهام گرفتن از این واقعیت که وقوع هر تغییری در شرایط هیدرولوژیک حوضه تابعی از شرایط پیشین بارش در همان حوضه است، در پژوهش حاضر، سعی شده است تا با استفاده از مفهوم و تکنیک زنجیرهٔ مارکوف به پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه با توجه به میزان بارش در گام زمانی قبل اقدام شود.

مدل زنجیرهٔ مارکوف در علوم مختلفی مانند هواشناسی، آب و هواشناسی، اقتصاد و صنعت کاربرد وسیعی دارد. پژوهشگران زیادی از مدل مارکوف برای پیش‌بینی بارش و خشکسالی با اهداف مختلف بهره جسته‌اند. شائو و همکاران توالی دوره‌های خشک و تر را با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف همانندسازی کردند [۱]. هس از مدل زنجیرهٔ مارکوف برای پیشگویی ساعتی هشت کلان‌شهر ایتالیا در بازهٔ ۶ تا ۱۸ ساعته استفاده کرد و نشان داد در بازهٔ ۳ ساعته نیز این روش جواب‌گو است [۲]. مارتین و گومز بر مبنای طول دوره‌های خشک محاسبه‌شده به کمک زنجیرهٔ مارکوف، نواحی مختلف شبه‌جزیرهٔ اسپانیا را تقسیم‌بندی کردند. به این ترتیب، روش مارکوفی در نواحی شمال اسپانیا پذیرفته شد، اما نواحی جنوبی اسپانیا تطبیقی با این روش نداشت و اختلاف محسوسی بین مقادیر تجربی برآوردشده برای طولانی‌ترین دوره‌ها وجود داشت [۳]. حقیقت‌جو و همکاران در مطالعه‌ای احتمال خشکسالی در رودخانهٔ هیرمند را با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف حدود ۳۸ درصد برآورد کردند [۴]. علاوه بر آن آشگر و همکاران [۵] برای تحلیل مارکوفی خشکسالی استان خراسان و رضیئی و همکاران [۶] برای تحلیل تداوم و فراوانی خشکسالی‌های استان سیستان و بلوچستان از این مدل استفاده کردند. عساکره و مازینی به بررسی احتمال وقوع روزهای خشک در استان گلستان با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که احتمال تداوم روزهای خشک در ناحیهٔ پرباران جنوبی بسیار کمتر از روزهای مشابه در ناحیهٔ کم‌باران شمالی است [۷]. یوسفی و همکاران احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف و توزیع نرمال را برای منطقهٔ قزوین به کار بردند. بررسی خشکسالی در استان قزوین نشان داد خشکسالی در این استان اغلب فصلی است و از نظم خاصی پیروی می‌کند، به گونه‌ای که در فصول آینده به احتمال ۶۰ تا ۷۰ درصد ترسالی خواهد بود [۸]. این در حالی است که در مطالعه‌ای دیگر که رحیمیان و قانع در استان سمنان و با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف انجام دادند، احتمال ترسالی حدود ۳۷ درصد به دست آمد [۹]. در مطالعهٔ مفیدی‌پور و همکاران نتایج بررسی خشکسالی در حوضهٔ اترک و به کمک شاخص SPI نشان داد بیشترین گسترش خشکسالی در مقیاس ۱۲ ماهه رخ داده است [۱۰]. علیجانی و همکاران در پژوهشی از مدل نهان زنجیرهٔ مارکوف برای مطالعهٔ بارش‌های جنوب ایران به منظور مدیریت بهینهٔ منابع آب استفاده کردند [۱۱]. ماه‌آورپور از مدل زنجیرهٔ مارکوف برای پیش‌بینی احتمال وقوع بارش‌های روزانه در ایران استفاده کرد. وی با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اول با دو حالت بارش و بی‌بارش، آرایهٔ فراوانی تشکیل داد و سپس، به روش حداکثر درست‌نمایی، آرایهٔ احتمال انتقال را محاسبه کرد. انجام آزمون نیکویی برازش χ^2 پیروی داده‌ها از مدل انتخاب‌شده را در سطح بالایی تأیید کرد [۱۲]. اسلامی به‌منظور پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک براساس خشکسالی هواشناسی، یک مدل ریاضی برگرفته از مفهوم زنجیرهٔ مارکوف را توسعه داد. در تحقیق یادشده، احتمال وقوع حالت‌های مختلف خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف یک‌بعدی محاسبه شد. سپس، ماتریس احتمال انتقال با عنوان ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژیکی

استخراج و با استفاده از این ماتریس، احتمال وقوع وضعیت‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیک برمبنای وضعیت‌های مختلف خشکسالی هواشناسی به دست آمد [۱۳]. تیموری و فتح‌زاده با استفاده از نمایهٔ SWSI اصلاح‌شده و مدل زنجیرهٔ مارکوف به پایش شاخص منابع آب سطحی در حوضهٔ اترک پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها بیانگر این موضوع بود که احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت، محتمل‌تر از گذر به سایر شرایط (بین ۶۰ تا ۸۰ درصد) است و هر یک از ایستگاه‌ها مدت زیادی از طول سال را به احتمال زیاد در حالت تعادل قرار دارند [۱۴].

نالبانتیس با مقایسهٔ شاخص SDI با شاخص‌های هیدرولوژیک دیگر مانند PHDI و SWSI بیان داشت که این شاخص همانند شاخص SPI و RDI ساده است و نیاز به داده‌های متنوع ندارد. علاوه بر آن در این شاخص معیار مهم، جریان رودخانه است که عاملی تعیین‌کننده در خشکسالی هیدرولوژیک است [۱۵]. آبهیشک و همکاران به مقایسهٔ شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI) و شاخص استانداردشدهٔ رواناب (SRI) پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد برای دوره‌های ۹ و ۱۲ ماهه ارتباط خوبی بین دو شاخص وجود دارد [۱۶]. شوکلا و وود به مقایسهٔ شاخص‌های SPI و SRI برای حوادث خشکسالی در مناطق برف‌گیر پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این دو شاخص در طولانی‌مدت بسیار مشابه یکدیگرند، اما برای مقیاس‌های ماهانه و فصلی شاخص SRI برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک بهتر نتیجه می‌دهد [۱۷]. سلیمانی ساردو و بهره‌مند به ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص SDI در حوضهٔ هلیل‌رود پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد همبستگی زیادی بین شاخص بارش استاندارد به‌عنوان شاخص هواشناسی با شاخص هیدرولوژیک وجود دارد [۱۸]. آذره و همکاران به بررسی رابطهٔ خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضهٔ سد کرج پرداختند. نتایج تحقیق آنان نشان داد در سطح یک درصد، فاصلهٔ زمانی حداکثر سه‌ماهه بین دو خشکسالی وجود دارد و خشکسالی هواشناسی با یک ماه تأخیر روی خشکسالی هیدرولوژیک تأثیر می‌گذارد [۱۹].

در مطالعهٔ حاضر، سعی شده است احتمال رخداد شرایط هیدرولوژیک پس از رخداد هر وضعیت هواشناسی با توجه به گام زمانی استفاده‌شده در تحلیل سری زمانی بارش برآورد شود. یکی از کاربردهای مهم این برآورد، برآورد امید ریاضی یا محتمل‌ترین میزان جریان در هر رودخانه با استفاده از منحنی دبی کلاسهٔ همان رودخانه است. برای دستیابی به اهداف تحقیق، از زنجیرهٔ مارکوف خاصی که به آن عنوان زنجیرهٔ مارکوف دوبعدی داده شد، استفاده شده است. علت دوبعدی نامیدن این زنجیرهٔ مارکوف، تولید ماتریس احتمال انتقالی است که برای بردن فاز هواشناسی به فاز هیدرولوژیک از ساختار ویژه‌ای استفاده می‌کند که ستون‌های آن معرف حالت خشکسالی هواشناسی و سطرهایش معرف حالت خشکسالی هیدرولوژیک هستند.

تحقیق حاضر برمبنای فرضیاتی بنا شده است که عبارت‌اند از:

۱. شرایط هواشناسی مؤثرترین عامل در تعیین شرایط هیدرولوژیک حوضه هستند.

۲. با داشتن وضعیت هواشناسی می‌توان شرایط هیدرولوژیک را به طور مستقیم پیش‌بینی کرد.

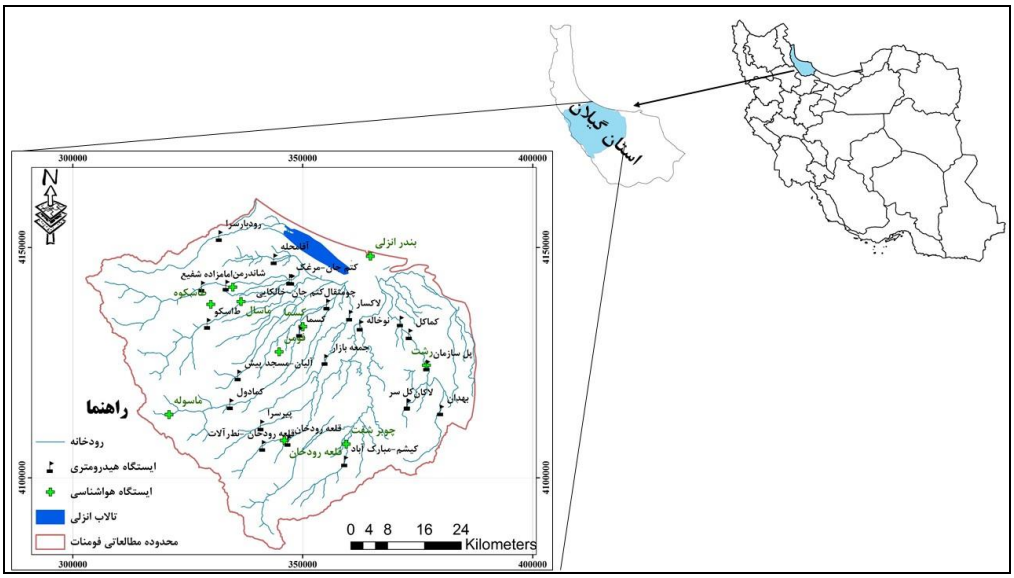
۳. گام زمانی پیش‌بینی همان گام زمانی تحلیل فاز هواشناسی است.

۴. با داشتن فاز هواشناسی می‌توان به کمک منحنی دبی کلاسه و با تعریف دبی میانگین در هر کلاس، میزان دبی محتمل را پیش‌بینی کرد. آنچه در تحقیق حاضر ملاحظه می‌شود، ارائهٔ الگوریتم پیش‌بینی فاز هیدرولوژیک بر مبنای فاز هواشناسی موجود است و با یک مثال ساده بدون ورود به محاسبات تفصیلی، کاربرد نتایج به‌دست‌آمده نشان داده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعاتی

منطقهٔ مطالعه‌شده حوضهٔ تالاب انزلی (فومنات) با مساحتی برابر با ۳۷۴۰ کیلومترمربع است. کمترین و بیشترین ارتفاع از سطح دریا در حوضه به‌ترتیب برابر با ۱۶- تا ۱۸۱۵ متر، میانگین بارندگی در حوضه برابر با ۱۲۶۰میلی‌متر، بیشینه و کمینهٔ دمای هوا برابر با ۱- و ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد است. حوضهٔ مورد نظر دارای ۹ ایستگاه هواشناسی و ۲۰ ایستگاه هیدرومتری دارای آمار ۳۰ ساله می‌باشد. نقشهٔ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی در محدودهٔ مطالعاتی فومنات

شاخص شرایط هواشناسی

برای تعیین شرایط حوضه از نظر هواشناسی و به بیان بهتر، شدت خشکسالی/ترسالی هواشناسی، شاخص‌های بسیاری معرفی شده‌اند که از این میان شاخص بارش استاندارد (SPI[1]) برای ایران پرکاربردترین شاخص در میان شاخص‌ها به‌حساب می‌آید. این شاخص که توسط مک‌کی و همکاران [۲۰] توسعه یافته است، احتمال بارش را برای هر بازه زمانی مشخص می‌کند و برای تحلیل خشکسالی/ترسالی فقط به دادهٔ بارندگی نیاز دارد. فرض اصلی در این روش، آن است که بارندگی از توزیع گاما تبعیت می‌کند، اما از آنجا که تابع چگالی احتمال گاما برای صفر تعریف نشده است (روزهای بدون بارندگی را نمی‌تواند پوشش دهد)، بنابراین از توزیع تجمعی برای حل مشکل استفاده می‌شود. این توزیع درنهایت، به توزیع نرمال استاندارد Z تبدیل می‌شود که میانگین آن صفر و انحراف معیار آن یک است. بنابراین، مقادیر منفی (سمت چپ توزیع نرمال) در این شاخص معرف خشکسالی و مقادیر مثبت (سمت راست توزیع نرمال) معرف ترسالی هستند. نخستین گام در محاسبهٔ SPI، برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه مشخص است. پس از محاسبهٔ احتمال تجمعی کل، مقدار متغیر تصادفی نرمال استاندارد هم‌احتمال با احتمال یادشده که میانگین صفر و انحراف معیار یک دارد، محاسبه می‌شود. جدول ۱ طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس این شاخص را نشان می‌دهد.

جدول۱. طبقه‌بندی شرایط هواشناسی بر اساس شاخص SPI [۲۰]

شدت ترسالی یا خشکسالی	مقدار شاخص
ترسالی بسیار شدید	SPI > 2
ترسالی شدید	1.99 > SPI > 1.5
ترسالی متوسط	1.49 > SPI >1
ترسالی خفیف	0.99 > SPI > 0.5
نرمال	0.49 > SPI > -0.49
خشکسالی خفیف	-0.5 > SPI > -0.99
خشکسالی متوسط	- 1 > SPI > -1.49
خشکسالی شدید	-1.5 > SPI > -1.99
خشکسالی بسیار شدید	-2 > SPI

شاخص شرایط هیدرولوژیک

شاخص‌هایی که تا کنون برای تعیین شرایط هیدرولوژیک حوضه معرفی شده‌اند، معدود و محدود به سه شاخص SWSI[2]، SRI[3] و SDI[4] هستند. از این میان، شاخص SWSI به‌طور معمول برای مناطق برف‌گیر و کوهستانی استفاده می‌شود و به‌شدت وابسته به ذخایر برف و باران و آب پشت سدها است. به همین سبب، در مطالعهٔ حاضر از این شاخص استفاده نشد. از طرفی، نتایج دو شاخص دیگر نیز برای منطقهٔ مطالعاتی بر هم منطبق بود و تفاوت

1. Standardized Precipitation Index

2. Surface Water Supply Index
3. Standardize Runoff Index
4. Streamflow Drought Index

معناداری میان دو شاخص وجود نداشت. بنابراین، برای تعیین شدت خشکسالی هیدرولوژیک شاخص جریان رودخانه (SDI) استفاده شد. این شاخص که بر اساس حجم تجمعی جریان رودخانه است، توسط نالبانتیس [۱۵] ارائه شد و سپس، توسط نالبانتیس [۲۱] برای تعیین خشکسالی هیدرولوژیک توسعه داده شد. این شاخص به لحاظ محاسباتی مشابه شاخص SPI است، اما از نظر مقیاس زمانی به صورت ماهانه یا فصلی استفاده می‌شود. جدول ۲ شدت‌های خشکسالی/ترسالی هیدرولوژیک بر اساس این شاخص را نشان می‌دهد.

شاخص $SDI_{i,k}$ نیاز به ارقام حجم جریان $Q_{i,j}$ در iاُمین سال هیدرولوژیک و jاُمین ماه طی سال هیدرولوژیک دارد. حجم تجمعی جریان ($V_{i,k}$) برای iاُمین سال هیدرولوژیک و kاُمین دورهٔ مبنا، این‌گونه طبق معادلات ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{8k} Q_{i,j} \quad i=1,2,\dots \; j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \qquad (۱)$$

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \qquad (۲)$$

جدول ۲. طبقه‌بندی شرایط هیدرولوژیک بر اساس شاخص SDI [۱۵]

شدت خشکسالی	مقدار شاخص
نرمال	SDI>=0
خشکسالی ضعیف	-1<=SDI<0
خشکسالی متوسط	-1.5<=SDI<-1
خشکسالی شدید	-2<=SDI<-1.5
خشکسالی بسیار شدید	SDI<-2

زنجیرهٔ مارکوف

مدل زنجیرهٔ مارکوف از فنون ریاضی برای تحلیل پدیده‌های تصادفی است که تداومی از مشاهدات را طی زمان نشان می‌دهد. در واقع، در روش زنجیرهٔ مارکوف یک سری از مشاهدات و تغییر هر یک از مشاهدات از حالتی به حالت دیگر بررسی می‌شود. زنجیرهٔ مارکوف با روش‌های سادهٔ ریاضی (مانند ضرب آرایه‌ها) حل احتمالات مربوط به فرایندهای وابسته را بسیار آسان کرده است. اگر (...،۲، ۱، ۰) X_n (n= فرایندی تصادفی باشد که در آن متغیر تصادفی بتواند هر مقدار متناهی از مقادیر ممکن را به خود اختصاص دهد، هرگاه این فرایند در وضعیت i باشد، با احتمال ثابت (P_{ij}) می‌توان تغییر حالت آن به j را در آینده برآورد کرد:

$$probability(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = p_{ij} \qquad (۳)$$

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^{N} n_{ik}} \qquad (۴)$$

معادلهٔ ۳ توزیع شرطی هر حالت آتی X_{n+1}، با توجه به حالت موجود X_n و حالت‌های گذشته $X_0, X_1, \dots, X_{n-1}$ وابسته به n-1 حالت موجود و مستقل از حالت‌های قبل از آن است. حال اگر وابستگی متغیر در فردا فقط به شرایط متغیر در امروز و مستقل از شرایط روزهای گذشته باشد، چنین فرایند تصادفی‌ای را زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اول می‌نامند. در این فرایند P_{ij} که از آن با عنوان احتمال ثابت یاد شد، بیانگر احتمال انتقال از حالت i به حالت j است. درجهٔ همبستگی میان حالت‌های مختلف را می‌توان به کمک احتمال انتقال حالت نشان داد مجموعهٔ این احتمالات به‌صورت ماتریس احتمال انتقال نشان داده می‌شود (رابطهٔ ۵).

$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & \cdots \\ p_{10} & p_{11} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{i1} & p_{i1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

در صورتی که ماتریس احتمال انتقال بی‌نهایت بار در خود ضرب شود، احتمال انتقال از حالت‌های مختلف به عدد ثابتی میل می‌کند که ماتریس احتمال تعادل نامیده می‌شود و به کمک آن وضعیت زنجیره در درازمدت (احتمال رخداد به طور متوسط در درازمدت) قابل پیش‌بینی خواهد بود. بر این اساس، می‌توان گفت که اگر ماتریس تعادل برای پارامترهای هواشناسی مانند بارش تعریف شود، شرایط اقلیمی منطقه را نشان می‌دهد.

الگوریتم استفاده‌شده برای توسعهٔ زنجیرهٔ مارکوف استفاده‌شده در تحقیق حاضر براساس یک سری مبانی شکل گرفته است: نخست چون هدف تحقیق، برآورد شرایط هیدرولوژیک حوضه بعد از وقوع بارش است، درایه‌های ماتریس احتمال انتقال دوبعدی باید احتمال انتقال از هر وضع هواشناسی به یک حالت هیدرولوژیک را

نشان دهند. دوم اینکه از آنجا که بر اساس فیزیک پدیدهٔ بارندگی اعتقاد بر این است که احتمال وقوع روز خشک یا تر بیشتر به یک روز قبل وابسته است، زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اول مد نظر قرار می‌گیرد. در توضیح ماتریس انتقال دوبعدی که مفهوم آن برای نخستین‌بار توسط اسلامی [۱۳] مطرح شد، می‌توان گفت که براساس آنچه تا کنون مرسوم بوده، زنجیرهٔ مارکوف برای انتقال از یک حالت هواشناسی یا هیدرولوژی به یک حالت دیگر در یک گام زمانی به کار گرفته شده است. برای مثال، در ماتریس ۶ که معرف یک زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ یک دوحالته و یک‌بعدی است اگر منطقه اکنون در حالت مرطوب (W) باشد، احتمال اینکه در گام بعد برای مثال به حالت خشک (D) برسد برابر با P_{01} خواهد بود (رابطهٔ ۶).

$$P = \begin{array}{c} \\ W \\ D \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} W & D \end{array} \\ \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (۶)$$

در ماتریس دوبعدی که در تحقیق حاضر از آن استفاده شد، ماتریس احتمال انتقال همان شرایط و ساختار ماتریس یک‌بعدی یادشده را دارد با این تفاوت که این بار ستون اول شامل دو حالت فاز هواشناسی W و D و سطر اول نشان‌دهندهٔ فاز هیدرولوژی با همان دو حالت تر و خشک (W و D) خواهد بود و بر این اساس، P_{01} احتمال رفتن از حالت مرطوب هواشناسی به حالت خشک هیدرولوژی را به دست می‌دهد. در نهایت برای مطالعهٔ حاضر، با توجه به محدودهٔ مقادیر نمایه‌های هواشناسی (SPI) و هیدرولوژی (SDI) سه وضعیت هواشناسی و هیدرولوژی برای متغیرهای حالت زنجیرهٔ مارکوف یعنی احتمال وقوع حالت‌های نرمال، خشک و تر مورد توجه واقع شد. بر این اساس، زنجیرهٔ مارکوف استفاده‌شده در مطالعهٔ حاضر، زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اول، سه‌حالته و دوبعدی است.

نتایج و بحث

کلاس‌های هواشناسی و هیدرولوژیک

برای تعیین شرایط هواشناسی و هیدرولوژیک بر اساس شاخص‌های SPI و SDI در مقیاس ماهانه از نرم‌افزار DrinC [۲۲] استفاده شد. همان‌طور که گفته شد، در مطالعهٔ حاضر از سه کلاس نرمال (N)، خشک (D) و مرطوب (W) استفاده شده است.

ماتریس احتمال انتقال هواشناسی

در مرحلهٔ اول، احتمال انتقال از هر حالت هواشناسی به حالت دیگر هواشناسی بررسی شد. همان‌گونه که گفته شد، با ضرب ماتریس احتمال انتقال در خودش، می‌توان به ماتریس احتمال تعادل رسید که بیانگر شرایط حوضه در درازمدت (شرایط اقلیمی) است. جدول ۳ ماتریس‌های احتمال انتقال و تعادل هواشناسی را به طور نمونه برای ایستگاه انزلی نشان می‌دهد. ماتریس سمت چپ، ماتریس احتمال انتقال از هر حالت به حالت دیگر و ماتریس سمت راست، احتمال تعادل را نشان می‌دهد. عدد نوشته‌شده در کنار حرف M نشان‌دهندهٔ تعداد دفعات ضرب شدن ماتریس در خودش است. ماتریس احتمال تعادل همهٔ ایستگاه‌های هواشناسی حوضهٔ مطالعه‌شده با ۲ و یا ۳ بار ضرب ماتریس احتمال انتقال در خودش (اینجا ۳ بار) به دست آمد.

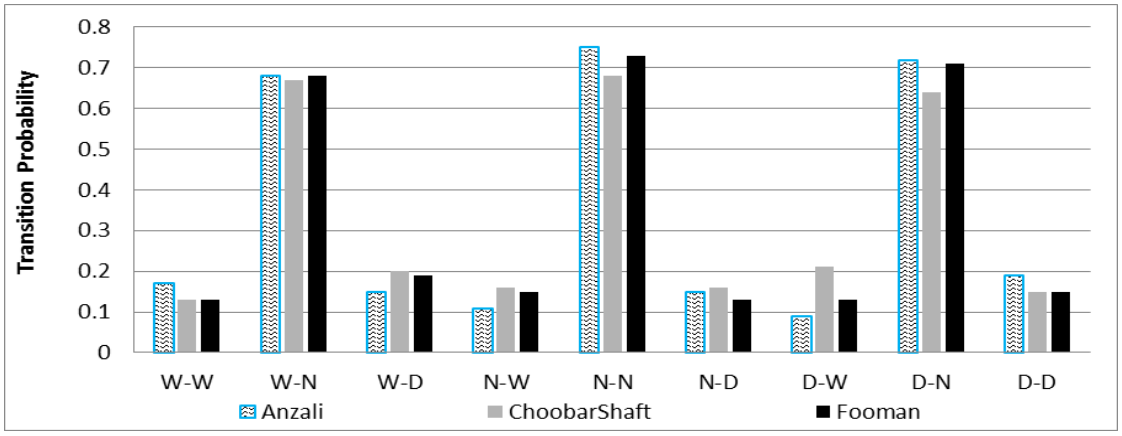
جدول ۳. ماتریس احتمال انتقال هواشناسی ماهانه برای ایستگاه انزلی

	W	N	D	M3	W	N	D
W	0.17	0.68	0.15	W	0.11	0.74	0.15
N	0.11	0.74	0.15	N	0.11	0.74	0.15
D	0.09	0.72	0.19	D	0.11	0.74	0.15

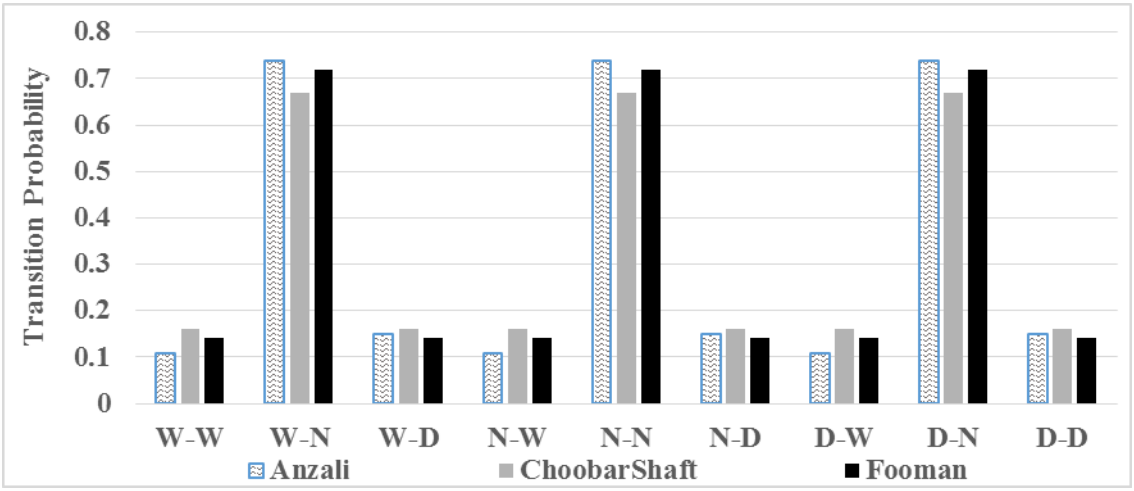
همان‌طور که گفته شد، درایه‌های ماتریس احتمال انتقال مارکوف یک‌بعدی احتمال گذر از هر حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهند. در شکل ۲ این احتمالات برای سه ایستگاه انزلی، چوبرشفت و فومن ترسیم شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این نمودار نشان می‌دهد احتمال رسیدن از کلاس خشکسالی به کلاس نرمال برای همهٔ ایستگاه‌ها بیش از احتمالات دیگر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در حوضهٔ فومنات و برای آمار ۳۰ سالهٔ بارندگی، پس از وقوع خشکسالی، شرایط همواره در جهت بازگشت به حالت نرمال پیش رفته است. در همین شکل با توجه به اینکه احتمال رفتن از حالت خشکی به خشکی کمتر از ۲۰ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۸۰ درصد مواقع این سه

ایستگاه حوضهٔ مطالعه‌شده، خشکسالی‌های درازمدت را تجربه نکرده‌اند. این احتمال برای کل حوضه حدود ۷۰ درصد به دست آمد. در درجهٔ دوم، احتمال گذر از حالت خشک به خشک قرار دارد که نشان می‌دهد حوضه طی دورهٔ آماری، با احتمال حدود ۲۰ درصد خشکسالی‌های بیش از یک‌ماهه را تجربه کرده است. این در حالی است که احتمال ترسالی‌های بیش از یک‌ماهه، کمی بیشتر از ۱۰ درصد است. این امر در واقع به آن مفهوم است که رهایی حوضهٔ تالاب انزلی از دام خشکسالی در صورت بروز دورهٔ خشک، سخت‌تر از حالتی است که به حالت ترسالی وارد می‌شود.

ماتریس احتمال تعادل ایستگاه‌های هواشناسی، همین نتایج را برای درازمدت نیز تأیید می‌کند. به این مفهوم که احتمال رسیدن از همهٔ حالت‌ها به حالت نرمال بیشترین مقدار را دارد و برای همهٔ ایستگاه‌ها از ۶۵ تا ۷۴ درصد است. این در حالی است که احتمال رسیدن به حالت خشک از ۱۴ تا ۲۰ درصد و احتمال رسیدن به حالت مرطوب از ۱۱ تا ۱۶ درصد متغیر است. برای مشاهدهٔ بهتر این نتایج، شکل ۳ برای ایستگاه‌های انزلی، چوبرشفت و فومن ترسیم شد. همان‌طور که گفته شد، به کمک زنجیرهٔ مارکوف و ماتریس احتمال انتقال در حالت تعادل می‌توان رفتار حوضه را در درازمدت در مورد خشکسالی هواشناسی قضاوت کرد. قطر ماتریس تعادل بهترین ارقام برای قضاوت روی وضعیت اقلیمی حوضه است. همان‌طور که در مورد انزلی در جدول ۳ ملاحظه می‌شود و در مورد کل حوضه نیز از شکل ۳ استنباط می‌شود، حوضهٔ فومنات تقریباً در ۷۰ درصد مواقع در وضعیت نرمال، در ۲۰ درصد مواقع در وضعیت خشکسالی و در ۱۰ درصد موارد در وضعیت ترسالی هواشناسی به سر می‌برد.



شکل ۲. احتمال انتقال کلاس‌های هواشناسی



شکل ۳. احتمال انتقال کلاس‌های هواشناسی در حالت تعادل

ماتریس احتمال انتقال هیدرولوژیک

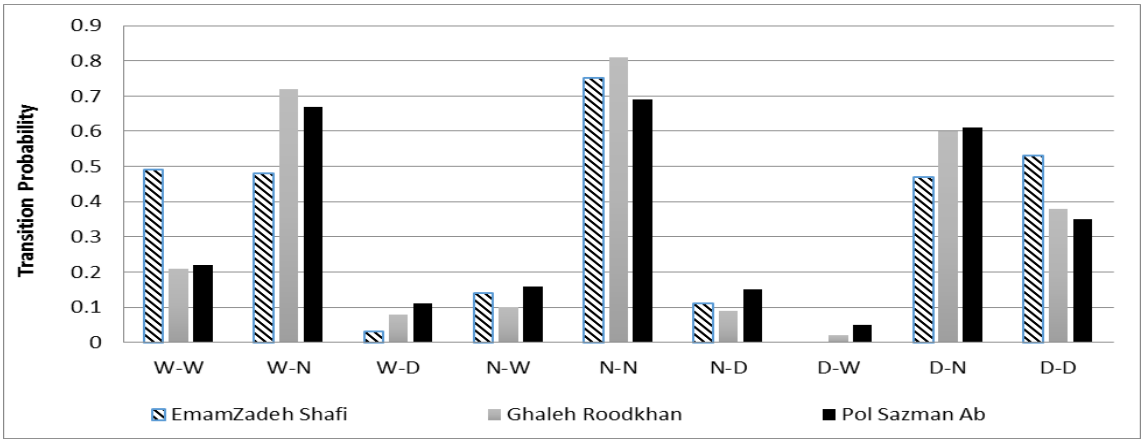
در مرحلهٔ بعد احتمال انتقال از هر حالت هیدرولوژیک به حالت دیگر آن تعیین شد. جدول ۴ ماتریس احتمال انتقال حالت‌های مختلف هیدرولوژیک و نیز ماتریس احتمال تعادل را به صورت نمونه برای ایستگاه قلعه‌رودخان نشان می‌دهد. در این مورد نیز شماره کنار حرف M نشان‌دهندهٔ تعداد دفعات ضرب ماتریس احتمال در خودش است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با ۴ بار ضرب ماتریس در خودش، احتمال تعادل به دست آمده است.

برای مشاهدهٔ احتمال انتقال از حالت‌های مختلف هیدرولوژیک نیز به همان شیوهٔ هواشناسی، نمودار احتمال انتقال برای سه ایستگاه امامزاده شفیع، قلعه‌رودخان و پل سازمان آب در شکل ۴ ترسیم شد. علت انتخاب این سه ایستگاه، محل قرارگیری و پراکندگی مناسب آن‌ها در حوضه است. نتایج بیانگر آن است که در مورد خشکسالی هیدرولوژیک نیز احتمال رسیدن از همهٔ حالت‌ها به حالت نرمال بیشترین مقدار را دارد و از ۶۰ تا ۸۰ درصد متغیر است. البته، این تفاوت در ماتریس یادشده در مقایسه با ماتریس احتمال انتقال هواشناسی وجود دارد که در اینجا احتمال گذر از حالت مرطوب به نرمال، بیش از احتمال گذر از حالت خشک به نرمال است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، احتمال باقی ماندن در حالت خشک و سپس احتمال باقی ماندن در حالت مرطوب کمتر از احتمال باقی ماندن در حالت نرمال است. بر این اساس، می‌توان گفت که شرایط هیدرولوژیک حوضه نیز در درجهٔ نخست تمایل به بازگشت به حالت نرمال را دارد و پس از آن، احتمال باقی ماندن در شرایط پیشین بیش از گذر از حالت مرطوب به خشک و یا به عکس است. نکتهٔ دیگری که از ماتریس احتمال انتقال هیدرولوژیک برداشت می‌شود، آن است که با توجه به نزدیکی مقادیر آن به ماتریس انتقال هواشناسی، احتمالاً رابطهٔ مناسبی بین دو فاز یادشده در حوضهٔ مطالعاتی قابل دست‌یابی است.

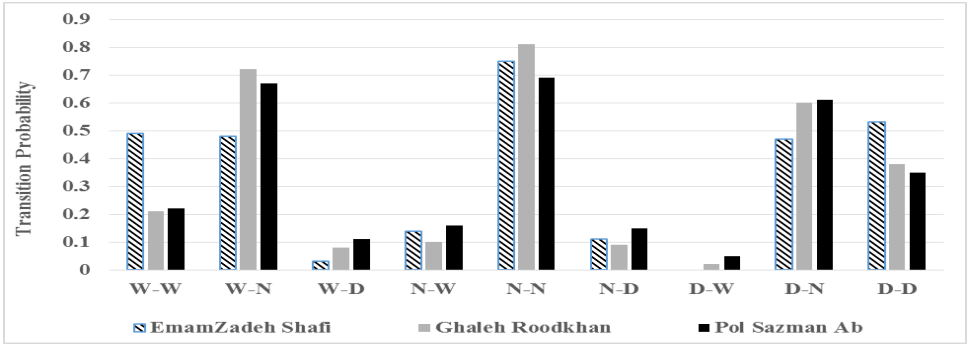
ماتریس‌های احتمال تعادل ایستگاه‌های هیدرومتری همین نتایج را برای درازمدت نیز تأیید می‌کنند. در اینجا نیز احتمال رسیدن از همهٔ حالت‌ها به حالت نرمال بیشترین مقدار را دارد و برای همهٔ ایستگاه‌ها از ۶۵ تا ۷۴ درصد است. این در حالی است که احتمال رسیدن به حالت خشک از ۱۲ تا ۱۸ درصد و احتمال رسیدن به حالت مرطوب از ۱۱ تا ۱۸ درصد متغیر است. برای مشاهدهٔ بهتر این نتایج، نمودار ۵ برای ایستگاه‌های امامزاده شفیع، قلعه‌رودخان و پل سازمان آب ترسیم شد.

جدول ۴. ماتریس احتمال انتقال هیدرولوژیک ماهانه برای ایستگاه قلعه‌رودخان

	W	N	D	M4	W	N	D
W	0.20	0.72	0.08	W	0.11	0.77	0.12
N	0.10	0.81	0.09	N	0.11	0.77	0.12
D	0.02	0.60	0.38	D	0.11	0.77	0.12



شکل ۴. احتمال انتقال کلاس‌های هیدرولوژیک



شکل ۵. احتمال انتقال کلاس‌های هیدرولوژیک در حالت تعادل

نتیجه‌ای که از مقایسهٔ نمودارهای حالت تعادل خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک به دست می‌آید، آن است که در هر دو نمودار احتمال رسیدن به حالت نرمال حدود ۷۰ درصد است. یعنی در ۷۰ درصد از دورهٔ آماری، حوضه در وضعیت نرمال قرار داشته است. از طرف دیگر، احتمال انتقال از حالت خشک به حالت خشک، در درازمدت هم برای خشکسالی هواشناسی و هم برای خشکسالی هیدرولوژیک حدود ۲۰ درصد است. به بیان دیگر، حوضه با احتمال ۲۰ درصد، خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک با دوام یک‌ماهه و بیشتر از آن را تجربه می‌کند.

ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی

پس از بررسی احتمال انتقال حالت‌های مختلف هواشناسی و هیدرولوژیک، ارتباط میان دو فاز و نیز پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیک بر اساس وضعیت هواشناسی (بارندگی) حوضه بررسی شد. به این منظور، برای رودخانه‌هایی که روی آن‌ها هم ایستگاه هواشناسی و هم ایستگاه هیدرولوژی وجود دارد، ماتریس احتمال انتقال دوبعدی هیدروکلیماتولوژی تشکیل داده شد. ماتریس یادشده این خصوصیت را دارد که یک بعد آن (ستون اول ماتریس) حالت‌های متغیر هواشناسی و بعد دیگر (سطر اول ماتریس) آن حالت‌های متغیر هیدرولوژیک است. با تبعیت از خاصیت عمومی ماتریس‌های احتمال انتقال، با ضرب این ماتریس در خودش، ماتریس احتمال تعادل هیدروکلیماتولوژیکی به‌دست می‌آید. جدول ۵، ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی و ماتریس احتمال تعادل متناظر آن برای ایستگاه مشترک هواشناسی و هیدرولوژیک قلعه‌رودخان را نشان می‌دهد.

جدول ۵. ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتولوژی و تعادل برای ایستگاه قلعه‌رودخان

	W	N	D	M4	W	N	D
W	0.38	0.60	0.02	W	0.09	0.80	0.11
N	0.06	0.86	0.08	N	0.09	0.80	0.11
D	0.05	0.58	0.37	D	0.09	0.80	0.11

تفسیر نتایج جدول ۵ به این‌صورت است که اگر برای مثال، منطقهٔ قلعه‌رودخان در شرایط نرمال هواشناسی قرار گیرد، به احتمال ۸۶ درصد شرایط هیدرولوژیک منطقه نیز نرمال خواهد بود و اگر از نظر هواشناسی در وضعیت خشکسالی قرار گیرد، منطقه فقط با شانس ۵۹ درصد در وضعیت نرمال هیدرولوژیک است. در حالی که با احتمال ۳۷ درصد در وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک و با احتمال بسیار ضعیف ۵ درصد در شرایط ترسالی هیدرولوژیک خواهد بود. اهمیت نتایج به‌دست‌آمده آن است که با دانستن شرایط خشکسالی هواشناسی در حال حاضر در منطقهٔ مد نظر می‌توان شرایط خشکسالی هیدرولوژیک در منطقه را با توجه به گام زمانی استفاده‌شده در مطالعه با احتمالی که در ماتریس هیدروکلیماتولوژیکی به دست آمده است، پیش‌بینی کرد. با این پیش‌بینی و با توجه به اینکه محدودهٔ دبی در هر کلاس برای هر رودخانه مشخص است، می‌توان به مقدار محتمل دبی رودخانه بعد از مشاهدهٔ وضعیت بارندگی دست یافت. این روش سریع برای پیش‌بینی دبی محتمل در رودخانه‌ها رقیبی جدی در مقابل روش‌های سری زمانی و

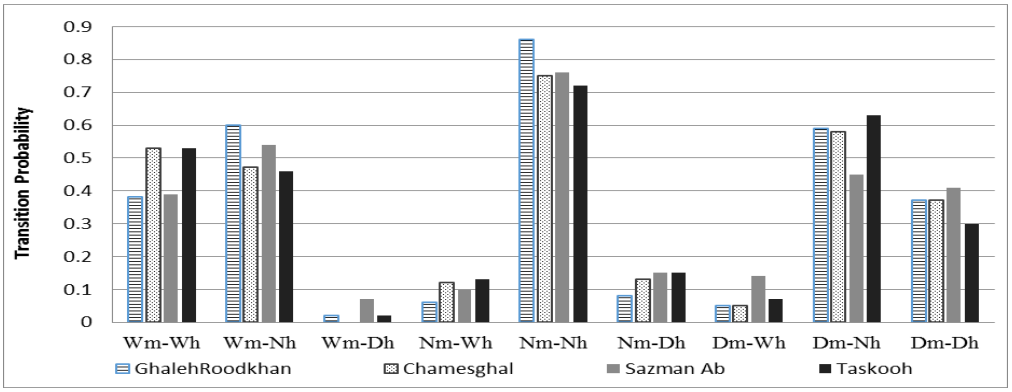
همچنین، به‌کارگیری مدل‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی مانند SWAT که برای مطالعات بیلان به خدمت گرفته می‌شوند، است. محاسبات مربوط به ریسک تصمیم‌گیری در مورد مدیریت منابع آب رودخانه در محدودهٔ هدف‌های مقالهٔ حاضر نیست، ولی با توجه به ارقام به‌دست‌آمده در ماتریس احتمال انتقال می‌توان به‌راحتی میزان محتمل و به بیان بهتر، دبی مورد انتظار در گام زمانی بعد در رودخانه را محاسبه کرد. برای مثال، اگر با استفاده از منحنی تداوم جریان، دبی متوسط رودخانهٔ قلعه‌رودخان در دورهٔ خشکسالی ۰/۵ متر مکعب بر ثانیه، در دورهٔ نرمال ۱ مترمکعب بر ثانیه و در دورهٔ ترسالی ۲ مترمکعب بر ثانیه باشد و هم‌اکنون منطقه از نظر SPI در وضعیت خشکسالی باشد، برای گام زمانی در نظر گرفته‌شده (برای مثال، یک ماه بعد) دبی محتمل رودخانه (Q_{i+1}) بر اساس درایه‌های ماتریس هیدروکلیماتولوژی این رودخانه برابر خواهد بود با رابطهٔ ۷:

$$Q_{i+1} = (0.37*0.5) + (0.59*1) + (0.05*2) = 0.875\ m^3/sec \quad (۷)$$

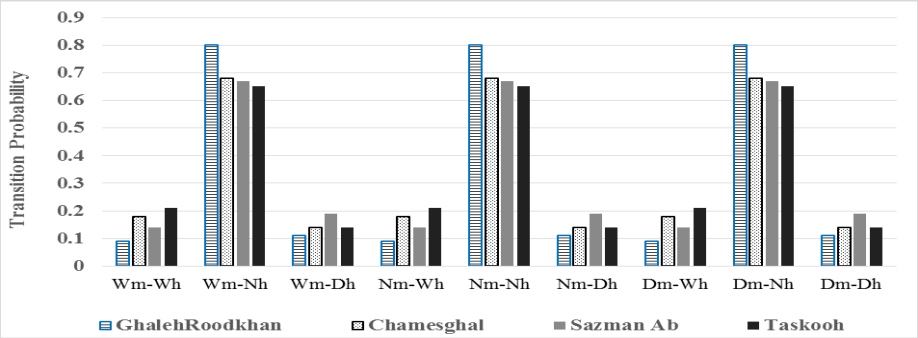
برای ماتریس تعادل نیز می‌توان گفت که برای مثال منطقهٔ قلعه‌رودخان در حالت کلی با قرار گرفتن در وضعیت نرمال هواشناسی به طور متوسط در ۸۰ درصد موارد در وضعیت نرمال هیدرولوژیک قرار دارد. از آنجا که ماتریس احتمال تعادل شرایط منطقه را در درازمدت مشخص می‌کند، می‌توان برای درازمدت شرایط هیدرولوژیک منطقه را بر اساس شرایط هواشناسی پیش‌بینی کرد. با استفاده از ماتریس احتمال انتقال دوبعدی، ریسک کوتاه‌مدت تأمین جریان و با ماتریس تعادل با روشی مشابه با روش محاسبهٔ دبی محتمل که پیش‌تر ملاحظه شد، می‌توان ریسک بلندمدت تأمین جریان در رودخانه و یا منطقهٔ مد نظر را محاسبه کرد. بحث روی ریسک کوتاه‌مدت و بلندمدت تأمین جریان به همراه بررسی منابع عدم قطعیت مترتب بر تشکیل ماتریس هیدروکلیماتولوژی موضوع پژوهشی دیگر است و در این مقوله نمی‌گنجد.

شکل ۶، نمودار احتمال انتقال کلاس‌های مختلف هیدروکلیماتولوژی را نشان می‌دهد. نتیجه‌ای که از این نمودار استنباط می‌شود آن است که احتمال قرار گرفتن در شرایط به‌ترتیب نرمال، مرطوب و خشک هیدرولوژیک در صورت داشتن حالت‌های یادشده در فاز هواشناسی به‌ترتیب ۸۰، ۵۰ و ۴۰ درصد است. این امر که احتمال رسیدن از هر شرایطی در فاز هواشناسی به حالت نرمال در فاز هیدرولوژی، در ماتریس هیدروکلیماتولوژی نیز مقدار زیادی دارد (احتمال آن از ۶۰ تا ۸۰ درصد متغیر است)، می‌تواند بیانگر این نکته باشد که بزرگی و یا دوام خشکسالی و یا ترسالی‌های هواشناسی در غالب دورهٔ آماری ضعیف‌تر از آن بوده است که بتواند منجر به تغییر شرایط هیدرولوژیک رودخانه از حالت نرمال به خشک و یا تر شود. شکل ۷، نمودار احتمال تعادل هیدروکلیماتولوژی را نشان می‌دهد. این نمودار، نتیجهٔ اخیر را تأیید می‌کند. طبق نتایج حاصل از این نمودار در درازمدت، احتمال انتقال از هر حالت هواشناسی به حالت نرمال هیدرولوژیک، بیشترین مقدار را دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل ضعیف بودن درجهٔ خشکسالی و یا ترسالی هواشناسی، شرایط هیدرولوژیک رودخانه در حالت نرمال باقی می‌ماند.

نتایج تحقیق حاضر، منطبق بر نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات رضی و شکوهی در همین حوضه و با استفاده از مدل SWAT است [۲۳].



شکل ۶. احتمال انتقال کلاس‌های هیدروکلیماتولوژی



شکل ۷. احتمال تعادل کلاس‌های هیدروکلیماتولوژی

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی وضعیت جریان براساس عوامل هیدرومتئورولوژیکی همواره مورد توجه کارشناسان منابع آب بوده است. استفاده از روش‌های رگرسیونی، مدل‌های سری زمانی، شبکهٔ عصبی و مدل‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی از مجموعهٔ این تلاش‌ها هستند که هر کدام قوت‌ها و ضعف‌های خود را دارند. در تحقیق حاضر از روشی استفاده شده است که پیش از این مورد استفادهٔ محققان نبوده است. مقالهٔ ارائه‌شده که مربوط به اعمال ماتریس دوبعدی احتمال انتقال برای پیش‌بینی فاز هیدرولوژیک براساس فاز هواشناسی است، برای نخستین‌بار ارائه شده و در ادبیات موضوع (در داخل و خارج) معادل ندارد. در روش استفاده‌شده در تحقیق حاضر با این فرض که سیستم هیدرولوژیک نسبت به شرایط آب‌وهوایی واکنش نشان می‌دهد و با یک زمان تأخیر متناسب با شرایط آب‌وهوایی حوضه رودخانه را تغذیه می‌کند [۲۳]، ماتریس احتمال انتقال هیدروکلیماتوژیکی تشکیل شد. در این ارتباط با به کار گرفتن مفاهیم زنجیرهٔ مارکوف و با بهره‌برداری از ایدهٔ تشکیل ماتریس دوبعدی (دو فازی) اقدام به پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیک بر اساس شرایط هواشناسی شد. در این حالت و به خلاف روش مرسوم، تشکیل ماتریس‌های احتمال انتقال مارکوفی که احتمال رفتن از یک حالت هواشناسی به حالت دیگر هواشناسی و یا از یک حالت هیدرولوژیک به حالت دیگر را به دست می‌دهند، ماتریس احتمال انتقالی تشکیل می‌شود که وضعیت انتقال از وضعیت (فاز) هواشناسی را در هر حالت خشک، نرمال و مرطوب به حالتی از وضعیت (فاز) هیدرولوژیک به دست می‌دهد. در این صورت، اگر حوضه در هر وضعیتی از هواشناسی باشد، می‌توان احتمال قرار گرفتن رودخانه در حالت‌های خشک، نرمال و مرطوب را به دست آورده و سپس، با در نظر گرفتن دورهٔ زمانی استفاده‌شده برای استخراج زنجیرهٔ مارکوف (هفتگی، ماهانه، فصلی یا سالانه) میزان دبی محتمل در رودخانه را به دست آورد. در تحقیق حاضر پیش‌بینی کلاس‌های مختلف هیدرولوژیک بر اساس شرایط هواشناسی مبتنی بر بارندگی با استفاده از ماتریس احتمال انتقال مرتبهٔ اول دوبعدی سه‌حالتهٔ مارکوف انجام شد که با استفاده از آن، احتمالات انتقال از حالت‌های مختلف هواشناسی به هیدرولوژیک به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد برای کلاس‌های مختلف هیدرومتئورولوژیکی با احتمال ۴۰ تا ۸۰ درصد کلاس‌های هواشناسی و هیدرولوژیک یکسانی در هر ماه به وقوع می‌پیوندد. از طرف دیگر، اگر دوام و شدت خشکسالی هواشناسی زیاد نباشد، شرایط هیدرولوژیک تمایل به ماندن در حالت نرمال دارد و تغییر وضعیت نخواهد داد. برای پیش‌بینی شرایط هیدرولوژیک بر اساس وضعیت هواشناسی در درازمدت، از ضرب متوالی ماتریس احتمال در خودش که ماتریس احتمال تعادل را تشکیل می‌دهد، استفاده شد. نتایج این ماتریس برای طولانی‌مدت نشان داد تغییر حالت از همهٔ حالت‌ها به حالت نرمال بیشترین احتمال وقوع (۶۵ تا ۸۰ درصد) را دارد. به این مفهوم که شرایط هیدرولوژیک تمایل به ماندن در حالت نرمال را داشته است. بنابراین، می‌توان برای حوضهٔ تالاب انزلی با استفاده از احتمالات به‌دست‌آمده و فقط با استفاده از شاخص SPI و بنابراین، فقط با داشتن مقادیر بارندگی شرایط هیدرولوژیک را پیش‌بینی کرد.

نتایج حاصل از مطالعهٔ حاضر می‌تواند برای تصمیم‌سازی‌های کلان در سطح حوضه، شرایط لازم را فراهم آورد. در مدیریت منابع آب در سطح حوضه‌ها، همواره این مهم مد نظر است که بتوان در صورت وقوع خشکسالی هواشناسی وضعیت منابع منطقه را حدس زد.

منابع

[1]. Cao C. Time serials of rainfall and their stochastic simulation. Urban storm drainage; Italy 25-28 July 1993, 45-62.

[2]. Hess G D. Operational, short term prediction of rainfall using a cycled Markov chain method. Australian meteorological magazine. 1990; 38(3): 201-205.

[3]. Martin- Vide Javier, Gomez Lnda. Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells. Int. J. Climatol. 1989; 19: 537-555.

[4]. Haghighatjou P, Shahmohammadi Heydari Z. Markov Chain Usage To Investigation Of Drought And Wet Possibilities Of The Sistan Region Due To Hirmand River Discharge. Proceedings Of The First National Conference On Solution To Coping With Water Crisis, Zabol University, Zabol. 2001. [Persian]

[5]. AshgarToosi Sh, Alizadeh A, Javanmard S. Probability of Drought Forecasting In Khorasan Province. Geographical research Quarterly. 2003; 70: 119-128. [Persian]

[6]. Raziei T, Daneshkar Arasteh P, Akhtari R and Shaghafian B. Investigation of Meteorological Droughts in the Sistan and Balouchestan Province, Using the Standardized Precipitation Index and Markov Chain Model. Journal of Iranian Water Resources Research. 2003; 3(1): 25-35. [Persian]

[7]. Asakereh H, Mazini F. Investigating the Probability of Dry Days in Golestan Province Using Markov Chain. Geography and Development. 2010; 17: 29-44. [Persian]

[8]. Yousei N, Hejam S, Irannejad P. Estimating Drought and Wetland Probabilities Using Markov Chain and Probability Distribution, Case Study: Qazvin. Geographical Research. 2007; 39(8): - [Persian]

[9]. Rahimian M, Ghane A. Monitoring and Forecasting of Semnan Drought Using SPI Index and Markov Chain. Proceedings of the First International Conference on Water Resources Management, Shahroud University of Technology, Shahroud. 2009. [Persian]

[10]. MofidiPour N, BardiSheikh V, Ounagh M, Sa`adoddin A. Meteorological and Hydrological Drought Survey in Atrak Watershed. Watershed Management. 2012; 3(5): 16-26. [Persian]

[11]. Alijani B, Mahmudi P, Rigi Chahi A, Khosravi P. Evaluation of Glacial Period Continuity in Iran Using Markov Chain Model. Natural Geography Research. 2010; 3: 1-20. [Persian]

[12]. Mahavar Pour Z. Probability of daily precipitation in Iran and its prediction by the Markov chain model. Geographical Research. 2014; 29(4): 229-240. [Persian]

[13]. Eslami A. Development of a mathematical model for hydroclimatological drought forecasting. Ph.D. dissertation. Universiti Putra Malaysia (UPM), Serdang, Malaysia. 2012.

[14]. Teymoori M, Fathzadeh A. Surface Water Resources Index Monitoring Using Modified SWSI Index, And Markov Chain Model, Case Study: Atrak Basin. Journal of Geography and Development. 2014; 34(1): 99-108. [Persian]

[15]. Nalbantis I. Evaluation of hydrological drought index. Journal of European water. 2008; 23(24): 67-77.

[16]. Abhishek A, Channaveerappa Dodamani B M. Comparison of two hydrological drought indices. Perspectives in science. 2016; 8: 626-628.

[17]. Shukla S, wood A. Use of standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical research letters. 2008; 35(2): L02405.

[18]. SoleimaniSardouf, Bahramand A. Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud Basin of Iran. International journal of environment resources research. 2014; 1(3): 279-288. [Persian]

[19]. Azareh A, Rahdari M R, Sardoii E R, Moghadam F A. Investigate the relationship between hydrological and meteorological drought in Karaj dam basin. European journal of experimental biology. 2014; 4(3): 102-107.

[20]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. Drought monitoring with multiple timescales. 9th conference on Applied Climatology, TX. USA. 1994; 233-236.

[21]. Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited. Water resources management. 2009; 23(5): 881-897.

[22]. DrinC Software: Drought Indices Calculator. Tigkas D, Sakiris G T, Vangelis H, Pangalou D. National University Athenes. 2005.

[23]. Razi F, Shokoohi A. Determining and Estimating the Lag time between Meteorological and Hydrological Drought Using a Water Balance Model. Watershed engineering and management. 2019; 13(1). [Persian]