جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۲۳، تابستان ۱۳۹۶
صص. ۵۱-۳۹

پایش و پیش‌بینی خشکسالی ماهانه با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیرهٔ مارکوف (مطالعهٔ موردی: جنوب شرق ایران)

عبدالرسول زارعی* - استادیار مهندسی بیابان‌زدائی، دانشگاه فسا، فارس، ایران
محمد مهدی مقیمی - استادیار علوم و مهندسی آب، دانشگاه فسا، فارس، ایران
مهدی بهرامی - استادیار علوم و مهندسی آب، دانشگاه فسا، فارس، ایران

وصول: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲ **پذیرش:** ۱۳۹۶/۳/۵

چکیده

خشکسالی یکی از بخش‌های جداپی‌ناپذیر نوسانات اقلیمی است که سالانه خسارات زیادی را به بخش‌های مختلف وارد می‌سازد. با توجّه به اثرات خشکسالی بر بخش‌های مختلف محیط‌زیست، کشاورزی، منابع طبیعی، حیات وحش و... پیش‌بینی آن می‌تواند برای مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از آن مفید باشد. در پژوهش حاضر، خشکسالی ماهانه بر اساس شاخص استاندارد بارش در ۱۲ ایستگاه موجود در جنوب شرق کشور طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ محاسبه گردید؛ سپس با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف اقدام به پیش‌بینی خشکسالی ماهانه برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ شد. طبق نتایج، بیشتر ایستگاه‌ها از نظر خشکسالی دارای وضعیّت نرمال، متوسّط و شدید هستند. ماتریس احتمال انتقال نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها، احتمال گذر از یک حالت معیّن به همان حالت و احتمال گذر از حالت مرطوب به خشک، زیاد؛ امّا احتمال گذر از حالت خشک به تر، کم است. همچنین نتایج پیش‌بینی در ایستگاه‌های مختلف با سطح دقّت متفاوت (در ایستگاه‌های ایرانشهر، زابل، زاهدان، بم و سراوان، دقّت پیش‌بینی ۷۵٪، در ایستگاه‌های جاسک، بندرعباس، کرمان و شهر بابک دقّت پیش‌بینی ۷۹/۱٪ و در ایستگاه‌های بندر لنگه، چابهار و سیرجان، دقّت پیش‌بینی ۸۳/۳٪) نشان داد که بیشترین احتمال وقوع خشکسالی طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مربوط به کلاس‌های نرمال، متوسّط و شدید است و در سطح منطقهٔ مورد بررسی کلاس‌های ۱ تا ۷ خشکسالی به ترتیب ۱۳/۳، ۲۵/۸۱، ۲۶/۷۴، ۳۶/۱۱، ۴/۷۵، ۲/۸۷ و ۰/۶۹٪ از ماه‌های پیش‌بینی‌شده را دربر می‌گیرند.

واژگان کلیدی: خشکسالی، شاخص استاندارد بارش، زنجیرهٔ مارکوف، پیش‌بینی خشکسالی، ایران.

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۷۹۳۱۵۲۵۷
E-mail: Ar_Zareiee@fasau.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

مقدّمه

خشکسالی، یکی از مهم‌ترین و شاید تأثیرگذارترین بلایای طبیعی است که بخش‌های مختلف محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ناصرزاده و احمدی، ۲۰۱۳؛ کوگان[1]، ۱۹۹۸). منظور از پایش وضعیّت خشکسالی در یک منطقه، بررسی آن وضعیّت در سری زمانی آمار موجود در منطقه است (علیزاده و آشگر طوسی، ۱۳۸۷). اقدامات اوّلیّهٔ پایش خشکسالی، بیشتر با تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشکسالی در مقیاس کوچک آغاز شد (میشرا و سینگ[2]، ۲۰۱۰؛ ویپل[3]، ۱۹۶۶)، سپس توسّط سایر پژوهشگران دنبال گردید. در دهه‌های گذشته معمولاً تحلیل خشکسالی به صورت توصیفی انجام می‌گرفت و کمتر به تحلیل کمّی آن توجّه می‌شد، اصولاً برای تحلیل کمّی خشکسالی، وجود یک شاخص مشخّص به منظور تعیین دقیق دوره‌های مرطوب و خشک بسیار ضروری است (سیلوا[4]، ۲۰۰۳). یکی از شاخص‌های مهمّ مورد استفاده و توصیه‌شده در مطالعات خشکسالی، شاخص بارش استاندارد است (سیتی[5] و همکاران، ۲۰۱۷؛ مک‌کی[6]، ۱۹۹۳؛ تساکریس و ونجلیس[7]، ۲۰۰۴).

پژوهش‌های متعدّدی در ایران در مورد پایش و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی و مدل زنجیرهٔ مارکوف صورت گرفته است؛ از جمله اینکه در مطالعه‌ای در حوضهٔ دریاچه نمک که با استفاده از چند شاخص اعم از شاخص دهک‌ها، شاخص درصد نرمال و شاخص استاندارد بارش[8] انجام شد، نشان داده شد که شاخص استاندارد بارش، مناسب‌ترین شاخص ارزیابی شدّت خشکسالی است (انصافی مقدم، ۱۳۸۶). در حوضهٔ آبریز کرخه با استفاده شاخص‌های استاندارد بارش و استاندارد دهک‌ها و همچنین مدل زنجیرهٔ مارکوف، وضعیّت خشکسالی، پیش‌بینی شد که نتایج این پژوهش، برخلاف تحقیق قبل نشان داد که با وجود همبستگی ضعیف بین دو شاخص استاندارد دهک‌ها[9] و استاندارد بارش، بر مبنای نتایج همبستگی و ارتباط بین مقادیر شاخص استاندارد دهک‌ها در دوره‌های مرجع مختلف، می‌توان با اطمینان بسیار بالایی در پیش‌بینی وضعیّت خشکسالی هیدرولوژیکی کلّ سال از شاخص استاندارد دهک‌ها شش‌ماهه (مهر - اسفند) استفاده نمود (اقتداری و همکاران، ۱۳۹۵)؛ همچنین با استفاده از شاخص بارش استانداردشده، خشکسالی در استان اصفهان پهنه‌بندی شد و نتایج این پهنه‌بندی نشان داد که عمدهٔ خشکسالی‌های شدید و متوسّط در قسمت‌های غربی استان مورد بررسی رخ داده است (سلطانی و سعادتی، ۱۳۸۶). به این ترتیب، استفادهٔ گسترده از شاخص استاندارد بارش در ایران موجب انتخاب این شاخص به منظور بررسی خشکسالی در مطالعهٔ حاضر شد.

پیش‌بینی خشکسالی به عنوان یکی از راهبردهای مقابله با این رخداد طبیعی و کاهش اثرات مخرّب آن، امری است که در سال‌های اخیر توجّه کارشناسان هواشناسی و کشاورزی را به خود جلب نموده است و فعّالیّت‌های گوناگونی برای پایش و پیش‌بینی این پدیده توسّط سازمان‌های مرتبط صورت پذیرفته است. مدل‌های خودهمبستگی و زنجیرهٔ مارکوف از جمله مدل‌های سری زمانی هستند که برای پیش‌بینی احتمالاتی بارندگی و رویدادهای خشکسالی به کار می‌روند. از مدل زنجیرهٔ مارکوف برای بیان و تعریف ویژگی‌های

1- Kogan
2- Mishra and Singh
3- Whipple
4- Silva
5- Siti
6- Mckee
7- Tsakiris & Vangelis
8- Standardized Precipitation Index (SPI)
9- Standardized Deciles Index (SDI)

Archive of SID

www.SID.ir

فرایندهای تصادفی (متغیّرهای هواشناسی و هیدرولوژی) استفاده می‌شود (کلودیا[1] و همکاران، ۲۰۱۷؛ چن[2] و همکاران، ۲۰۱۷؛ زیلاگی[3] و همکاران، ۲۰۰۶، تییر[4] و همکاران، ۲۰۰۶، گابریل و نیومن[5]، ۱۹۶۲). استفاده از روش زنجیرهٔ مارکوف به دلیل توانمندی‌های آن در محاسبهٔ دوره‌های تر و خشک و همچنین ساده‌کردن حلّ بسیاری از مسائل مربوط به فرایندهای وابسته، دارای سابقهٔ طولانی است (بوناکروزو[6] و همکاران، ۲۰۱۵).

تا کنون در مطالعات زیادی از روش زنجیرهٔ مارکوف به منظور پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی استفاده شده است. در پژوهشی، از مدل زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اوّل، به منظور پیش‌بینی دوره‌های خشک و تر روزانه استفاده شد که نتایج این تحقیق، بیانگر نوسان ۷۱ تا ۹۸ درصدی دورهٔ خشک متوالی، در دورهٔ آماری مورد بررسی بود (حجازی‌زاده و شیرخانی، ۱۳۸۴). در استان قزوین نیز با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف و توزیع نرمال و بر اساس بارش‌های سالانه و فصلی، احتمالات خشکسالی و ترسالی برآورد شد. نتیجهٔ این برآورد نشان داد که احتمال وقوع خشکسالی در فصل پاییز در این استان تقریباً دو برابر احتمال وقوع ترسالی است (یوسفی و همکاران، ۱۳۸۶). با وجود تفاوت مقیاس زمانی مورد استفاده در پژوهش اخیر، با تحقیق قبلی، نتایج به نوعی تأییدکنندهٔ فراوانی وقوع خشکسالی در مقایسه با ترسالی در دورهٔ آماری مورد مطالعه است. در پژوهشی دیگر در استان قزوین با استفاده از شاخص استاندارد بارش، مدل زنجیرهٔ مارکوف و روش‌های زمین‌آمار، پایش و پهنه‌بندی خصوصیات خشکسالی هواشناسی انجام گردید. با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر مثبت و منفی از نظر فراوانی کاهش و از نظر تداوم افزایش یافت؛ همچنین با توجّه به نتایج ماتریس احتمال انتقال، حالت تقریباً نرمال غالب بوده و کمترین دورهٔ بازگشت مربوط به حالت تقریباً نرمال و پس از آن، حالات مرطوب ملایم و خشک ملایم است (مقصود و همکاران، ۱۳۹۵). در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه نیز با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اوّل تداوم روزهای بارانی بررسی گردید و نتایج نشان داد که در دورهٔ مورد مطالعه، به طور میانگین ۲۵٪ روزها همراه با بارندگی بوده و در تمام ایستگاه‌ها، احتمال تعادل حالت خشک بیشتر از حالت بارانی است (جوان، ۱۳۹۵). نتایج این‌گونه پژوهش‌ها، با توجّه به منطقهٔ مورد تحقیق ممکن است گاه تفاوت چشمگیری داشته باشد؛ به طور مثال، نتایج بررسی خشکسالی در هند با استفاده از شاخص بارش استانداردشده و تبخیر و تعرّق[7] و زنجیرهٔ مارکوف نشان داد که احتمال انتقال از یک کلاس خشکسالی به کلاس‌های مرطوب‌شونده، بیشتر از احتمال انتقال خشکسالی به کلاس‌های خشک‌شونده است (آلم[8] و همکاران، ۲۰۱۷). هدف از این پژوهش نیز پایش و پیش‌بینی خشکسالی ماهانه با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیرهٔ مارکوف در جنوب شرق ایران است.

مواد و روش‌ها

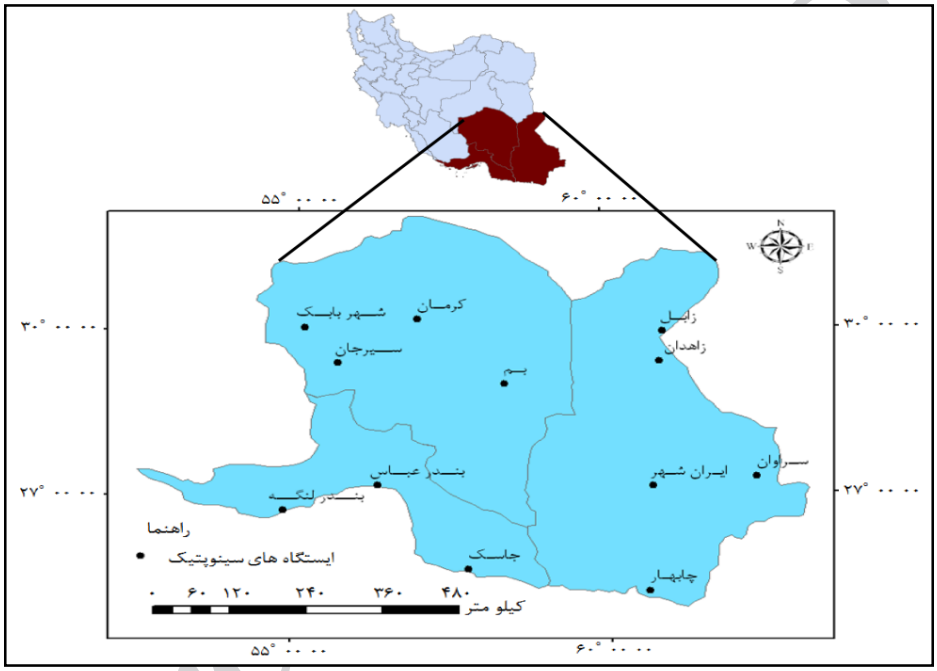
در این بررسی، از داده‌های هواشناسی ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در جنوب شرق ایران شامل استان‌های هرمزگان، کرمان و سیستان و بلوچستان طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ استفاده گردید. منطقهٔ مورد مطالعه با مساحت ۴۴۱۶۹۴/۶۷ کیلومتر مربع بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۶۲ درجه و ۵۸ دقیقهٔ

1- Claudia
2- Chen
3- Szilagyi
4- Thyer
5- Gabrial & Neumann
6- Bonaccorso
7- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)
8- Alam

www.SID.ir

شرقی و عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۷ دقیقهٔ شمالی واقع شده است (شکل ۱). متوسّط بارندگی سالانهٔ این منطقه ۱۱۰/۹۴ میلی‌متر و متوسّط دمای سالانهٔ آن ۲۳/۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد است. این منطقه دارای ارتفاع متوسّط ۲۲۲۲/۵ متر از سطح دریا است. برخی از خصوصیات ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

در مرحلهٔ بعد، با استفاده از شاخص استاندارد بارش که یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها بررسی شدّت خشکسالی است، اقدام به تعیین کلاس‌های مختلف شدّت خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی شد. این شاخص، بر مبنای داده‌های بارندگی استوار است (مک‌کی، ۱۹۹۳). کلاس‌های شدّت خشکسالی بر مبنای شاخص استاندارد بارش در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۱. ایستگاه‌های مورد بررسی و برخی از خصوصیات اقلیمی و مکانی آنها

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	متوسّط بارش سالانه (میلی‌متر)	شرایط اقلیمی*
بم	۵۸ ۲۱	۲۹ ۰۶	۱۰۶۷	۵۴/۳۲	خیلی‌خشک
بندرعباس	۵۶ ۲۲	۲۷ ۱۳	۱۰	۱۶۰/۱۸	خشک
بندر لنگه	۵۴ ۵۰	۲۶ ۳۲	۲۳	۱۲۲/۷۲	خشک
چابهار	۶۰ ۳۷	۲۵ ۱۷	۸	۱۲۱/۲۰	خشک
ایرانشهر	۶۰ ۴۲	۲۷ ۱۲	۵۹۱	۱۰۵/۱۵	خیلی‌خشک
جاسک	۵۷ ۴۶	۲۵ ۳۸	۵	۱۱۸/۶۴	خشک
کرمان	۵۶ ۵۸	۳۰ ۱۵	۱۷۵۴	۱۳۰/۱۳	خشک
سراوان	۶۲ ۲۰	۲۷ ۲۰	۱۱۹۵	۱۰۹/۷۴	خیلی‌خشک
شهر بابک	۵۵ ۰۸	۳۰ ۰۶	۱۸۳۴	۱۴۵/۶۹	خشک
سیرجان	۵۵ ۴۱	۲۹ ۲۸	۱۷۳۹	۱۳۴/۷۷	خشک
زابل	۶۱ ۲۹	۳۱ ۰۲	۴۸۹	۵۳/۱۲	خیلی‌خشک
زاهدان	۶۰ ۵۳	۲۹ ۲۸	۱۳۷۰	۷۵/۷۰	خیلی‌خشک

*** شرایط اقلیمی، بر اساس شاخص خشکی برگرفته از نسبت بارندگی به تبخیر و تعرّق گیاه مرجع (محاسبه‌شده از روش پنمن مونتیث فائو) تعیین شد.**

www.SID.ir

به طور کلّی، شاخص استاندارد بارش، حاصل برازش توزیع آماری گاما بر سری بارندگی و محاسبات احتمالات توزیع تجمّعی گاما است. تابع توزیع گاما به صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی به صورت رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$g(x) = x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}\frac{1}{\gamma(\alpha)\beta^{\alpha}}$$ رابطهٔ ۱

که در آن X: میزان تجمّعی بارش ماهانه و α و β: پارامترهای توزیع گاما است که با روش حداکثر درست‌نمایی با استفاده از روابط ۲، ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند.

$$\widehat{\alpha} = \frac{1}{4A}\left[1+\sqrt{1+\frac{4A}{3}}\right]$$ رابطهٔ ۲

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$ رابطهٔ ۳

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\dot{\alpha}}$$ رابطهٔ ۴

که در آن $\bar{x}$: میانگین سری داده‌ها با مقیاس مورد نظر (سالانه یا ماهانه) است. برای احتمالات تجمّعی، میزان شاخص استاندارد بارش با توجّه به روابط ۵ و ۶ به دست می‌آید:

$$G(x) = \frac{1}{\gamma(\hat{\alpha})}\int_0^x t^{\hat{\alpha}-1}e^{-t}\,d$$ رابطهٔ ۵

$$t = \frac{x}{\hat{\beta}}$$ رابطهٔ ۶

در این مطالعه، شاخص استاندارد بارش ماهانه برای تمامی ایستگاه‌های مربوطه با استفاده از نرم‌افزار اکسل[1] محاسبه، سپس بر مبنای جدول ۲ کلاس‌های شدّت خشکسالی تعیین گردید. در شکل ۲، تغییرات کلاس خشکسالی ماهانه در ایستگاه بندرعباس از ژانویهٔ ۱۹۸۰ تا دسامبر ۲۰۱۴ به عنوان نمونه ارائه شده است.

پس از محاسبهٔ شاخص استاندارد بارش در ایستگاه‌های مورد بررسی، با استفاده از فرایند مارکوف و زنجیرهٔ مارکوف، اقدام به مدل‌سازی و پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی شد. در بسیاری از مدل‌های منابع آب و هیدرولوژی فرض می‌شود که فرایند تصادفی X(t) یک فرایند مارکوف است. در یک فرایند مارکوف، مقادیر زمان (مرحلهٔ t+1) یک فرایند، تنها به مقادیر زمان t آن فرایند وابسته است (جعفری بهی، ۱۳۷۸: ۱۰؛ مقیمی و سپاسخواه، ۱۳۸۷). برای تعریف دقیق فرایند مارکوف خواهیم داشت: برای زمان‌های ... و ۰، ۱، ۲، ۳ = n فرض کنید {X(n)} یک فرایند تصادفی و {S(n)} مجموعهٔ دلخواهی از حالت‌های فرایند را نشان می‌دهند، گفته می‌شود فرایند در ویژگی مارکوف صدق می‌کند، اگر برای ... و ۳، ۲، ۱، ۰= n رابطهٔ ۷ برقرار باشد:

$$P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n), X(n-1) = S(n-1), \dots, X(0) = S(0)] = P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n)]$$ رابطهٔ ۷

در فرایند مارکوف، مقدار فعلی، حالت فرایند را دربر دارد. در نتیجه، مقدار فعلی فرایند غالباً به عنوان حالت فرایند در نظر گرفته می‌شود و این تعبیر، زمانی که از وقوع حالت خاص یا کلاس خاصّی از خشکسالی صحبت می‌شود معنای فیزیکی می‌یابد. یک نوع خاص از فرایند مارکوف، نوعی است که حالت X(t) آن، تنها بتواند مقادیر گسسته را اختیار کند. چنین فرایندی را زنجیرهٔ مارکوف گویند.

1- Excel

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. کلاس‌بندی شاخص خشکسالی شاخص استاندارد بارش

کلاس خشکسالی	مقدار شاخص	شمارهٔ کلاس
ترسالی بسیار شدید	بزرگ‌تر مساوی ۲	۱
ترسالی شدید	۱/۹۹ تا ۱/۵	۲
ترسالی متوسّط	۱/۴۹ تا ۱	۳
نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	۴
خشکسالی متوسّط	۱- تا ۱/۴۹-	۵
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-	۶
خشکسالی بسیار شدید	کوچک‌تر مساوی ۲-	۷

در مباحث هیدرولوژی و منابع آب، غالباً فرایندهای پیوسته با زنجیره‌های مارکوف تقریب زده می‌شوند (سیتی و همکاران، ۲۰۱۷). احتمال تغییر وضعیّت k مرحله‌ای زنجیرهٔ مارکوف به صورت رابطهٔ ۸ تعریف می‌شود:

$$P_n^k = (i \to j) = P[X(n+k) = j | X(n) = i] \qquad \text{رابطهٔ ۸}$$

این احتمال تغییر وضعیّت، برابر احتمال بودن در حالت j ام، k دورهٔ زمانی پس از بودن در حالت i ام با آغاز از زمان n است. همان‌طور که در قبل ذکر شد، بیشتر پژوهشگران برای شبیه‌سازی خشکسالی، تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای زنجیرهٔ مارکوف را مناسب تشخیص داده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۷). احتمال تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای برابر احتمال شرطی است که به صورت رابطهٔ ۹ تعریف می‌شود:

$$\mathrm{P}_n = (i \to j) = P[X(n+1) = j | X(n) = i] \qquad \text{رابطهٔ ۹}$$

احتمال تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای برابر احتمال رفتن از حالت i به حالت j در یک دورهٔ زمانی با آغاز از n بیان می‌شود. احتمال تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای، در نظریه و کاربرد زنجیره‌های مارکوف، نقش کلیدی ایفا می‌کند. احتمالات تغییر وضعیّت در رابطهٔ ۱۰ صدق می‌کند:

$$\sum_{j=1}^{n} P_{ij} = 1 \qquad \text{رابطهٔ ۱۰}$$

این احتمالات، می‌توانند در قالب یک ماتریس نیز ارائه شوند که به ماتریس تغییر وضعیّت زنجیرهٔ مارکوف مشهور هستند. در یک ماتریس تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای، ردیف‌ها، نشان‌دهندهٔ حالت i و ستون‌ها، نشان‌دهندهٔ حالت j هستند. لازم به ذکر است که احتمال‌های تغییر وضعیّت k مرحله‌ای با به توان k رساندن ماتریس تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای به دست می‌آید. در شبیه‌سازی کلاس‌های خشکسالی، ماتریس تغییر وضعیّت یک مرحله‌ای زنجیر مارکوف هفت‌حالتی (کلاس‌های تر بسیار شدید یا کلاس ۱، ترسالی شدید یا کلاس ۲، ترسالی متوسّط یا کلاس ۳، نرمال یا کلاس ۴، خشکسالی متوسّط یا کلاس ۵، خشکسالی شدید یا کلاس ۶ و خشکسالی بسیار شدید یا کلاس ۷ طبق جدول ۲) به کار می‌رود؛ بنابراین، یک ماتریس ۷×۷ وجود خواهد داشت. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار اس.پی.اس.اس.[1] اقدام به تهیّهٔ بردار احتمال انتقال آغازین (پای صفر) برای ایستگاه‌های مورد مطالعه گردید؛ سپس به منظور ایجاد امکان پیش‌بینی، اقدام به تهیّهٔ ماتریس احتمال انتقال تجمّعی در ایستگاه‌های مختلف گردید و به کمک نرم‌افزار R بر مبنای روابط ارائه‌شده، در پیوست ۱، اقدام به پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی ماهانه برای ۷۲ ماه (ژانویهٔ ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۰) گردید (پیوست ۱).

در نهایت، به منظور بررسی میزان دقّت پیش‌بینی صورت‌پذیرفته، اقدام به صحّت‌سنجی پیش‌بینی‌های انجام‌شده گردید؛ در این راستا، اقدام به پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استانداردشده در ۲۴ ماه از داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ که کلاس‌های خشکسالی آن قبلاً مشخّص شده بود، گردید و سپس از طریق مقایسهٔ کلاس‌های واقعی با کلاس‌های پیش‌بینی‌شده، صحّت پیش‌بینی انجام‌شده بررسی شد.

1- Statistical Package for Social Science (SPSS)

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج

ماتریس احتمال آغازین (پای صفر) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. ماتریس احتمال آغازین نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی، بیشترین فراوانی وقوع کلاس‌های خشکسالی مربوط به کلاس‌های نرمال، خشکسالی متوسّط و خشکسالی شدید است. بر اساس داده‌های این بردار، در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی، کمترین فراوانی وقوع مربوط به کلاس ترسالی بسیار شدید است. بر اساس نتایج این بردار، در ایستگاه‌های استان هرمزگان بیشترین فراوانی وقوع کلاس خشکسالی در دورهٔ مورد بررسی به ترتیب مربوط به کلاس خشکسالی متوسّط، نرمال و خشکسالی شدید است؛ در حالی که در ایستگاه‌های استان کرمان و سیستان و بلوچستان، بیشترین فراوانی وقوع عمدتاً مربوط به کلاس نرمال بوده است.

سپس اقدام به تهیّهٔ ماتریس احتمال انتقال از یک حالت به حالت دیگر (از یک کلاس خشکسالی به کلاس دیگر) برای ایستگاه‌های مورد بررسی گردید. بر مبنای نتایج حاصل از ماتریس احتمال انتقال، در کلّیّهٔ ایستگاه‌های مورد مطالعه، احتمال انتقال از تمام کلاس‌های خشکسالی به کلاس ۴ یا نرمال دارای بیشترین مقدار و احتمال انتقال به کلاس ترسالی بسیار شدید دارای کمترین احتمال است. بر این مبنا، احتمال انتقال به کلاس‌های خشکسالی اعم از خشکسالی متوسّط تا بسیار شدید زیادتر از احتمال انتقال به کلاس‌های ترسالی اعم از ترسالی متوسّط تا بسیار شدید است. در جدول ۴، این ماتریس برای ایستگاه بم و زاهدان به عنوان نمونه ارائه شده است. انتقال‌های صورت‌گرفته عمدتاً عبارتند از تغییر از یک کلاس به همان کلاس خشکسالی و یا تغییر از یک کلاس خشکسالی به کلاس خشک‌تر. بر اساس نتایج، انتقال از کلاس خشک به مرطوب، بسیارکم و گاه نزدیک به صفر است.

نتایج پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی ماهانه طی ۷۲ ماه (ژانویهٔ ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۰) نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی، بیشترین کلاس‌های خشکسالی ماهانه که طی ۵ سال آینده اتّفاق خواهد افتاد در سه کلاس نرمال، خشکسالی متوسّط و خشکسالی شدید خواهند بود (شکل ۲). این در حالی است که تقریباً در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی، کلاس‌های ترسالی بسیار شدید و شدید دارای کمترین فراوانی وقوع خواهند بود؛ به طوری که ایستگاه‌های چابهار، جاسک، کرمان، شهر بابک، سیرجان، زابل و زاهدان طی ۵ سال پیش‌بینی‌شده، حتّی یک ماه با وضعیّت ترسالی بسیار شدید را به خود نخواهند دید، در بقیهٔ ایستگاه‌ها نیز کمتر از ۳٪ ماه‌های پیش‌بینی‌شده کلاس ترسالی بسیار شدید دیده خواهد شد.

جدول ۳. ماتریس احتمال آغازین یا بردار احتمال پای صفر ($\underline{\pi_0}$) در ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	احتمال وقوع کلاس‌های مختلف خشکسالی در سری داده‌های در دسترس						
	ED	SD	MD	N	MW	VW	EW
بم	۵/۲	۲۵/۱	۲۹/۵	۳۲/۲	۴/۱	۲/۹	۱
بندرعباس	۴/۸	۲۱/۵	۳۳/۷	۳۲/۲	۳/۸	۳/۳	۰/۷
بندر لنگه	۴/۱	۱۰/۵	۵۱/۵	۲۵/۱	۶/۲	۱/۹	۰/۷
چابهار	۱/۲	۳۱/۷	۳۵/۱	۲۵/۳	۲/۹	۲/۶	۱/۲
ایرانشهر	۳/۶	۳۰/۳	۲۰/۳	۳۷/۲	۵/۵	۱/۹	۱/۲
جاسک	۴/۵	۱۲/۹	۵۰/۲	۲۶/۷	۳/۳	۱/۲	۱/۲
کرمان	۶/۹	۲۹/۳	۱۱/۵	۴۲	۷/۲	۲/۴	۰/۷
سراوان	۶/۲	۳۰/۵	۶/۲	۴۶/۴	۶	۲/۶	۲/۱
شهر بابک	۵	۲۴/۱	۱۳/۸	۴۵/۶	۶/۹	۲/۹	۱/۷
سیرجان	۵/۳	۳۳/۶	۶	۴۶/۲	۴/۳	۲/۹	۱/۷
زابل	۲/۴	۱۸/۶	۴۱/۵	۲۹/۴	۵/۳	۲/۶	۰/۲
زاهدان	۳/۳	۲۳/۲	۲۷/۴	۳۷/۳	۴/۵	۲/۴	۱/۹

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴. ماتریس احتمال انتقال (٪) کلاس‌های مختلف خشکسالی در سری داده‌های ایستگاه‌های بم و زاهدان

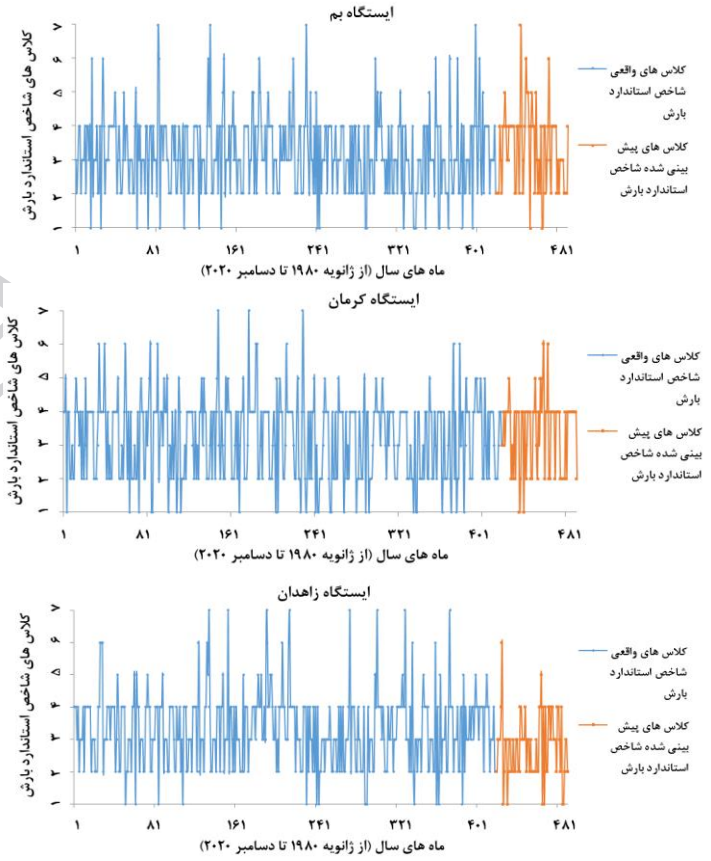
ایستگاه بم

	ED	SD	MD	N	MW	VW	EW
ED	۱۸/۲	۹/۱	۴/۵	۵۹/۱	۰	۹/۱	۰
SD	۱	۳۰/۸	۳۱/۷	۲۹/۸	۳/۸	۱/۹	۱
MD	۰/۸	۲۳/۲	۴۹/۶	۲۲/۴	۳/۲	۰/۸	۰
N	۹/۶	۲۶/۷	۱۶/۳	۳۶/۴	۵/۱	۳/۷	۲/۲
MW	۱۱/۸	۱۷/۶	۲۳/۵	۳۵/۳	۵/۹	۵/۹	۰
VW	۸/۳	۲۵	۱۶/۷	۴۱/۷	۸/۳	۰	۰
EW	۰	۰	۰	۷۵	۰	۲۵	۰

ایستگاه زاهدان

	ED	SD	MD	N	MW	VW	EW
ED	۱۴/۳	۲۱/۴	۷/۱	۴۲/۹	۱۴/۳	۰	۰
SD	۱	۳۰/۲	۲۷/۱	۳۶/۵	۳/۱	۲/۱	۰
MD	۰/۹	۲۰/۹	۵۵/۷	۱۹/۱	۰/۹	۰/۸	۱/۷
N	۵/۱	۱۹/۷	۱۴	۴۹	۷	۲/۷	۲/۵
MW	۵/۳	۲۶/۳	۵/۳	۵۲/۶	۵/۲	۰	۵/۳
VW	۱۰	۳۰	۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰
EW	۰	۲۵	۱۲/۵	۵۰	۰	۱۲/۵	۰

بر اساس نتایج، تمام ایستگاه‌های مورد بررسی در کمتر از ۵٪ ماه‌های پیش‌بینی‌شده کلاس ترسالی شدید را تجربه خواهند کرد؛ این در حالی است که تمام ایستگاه‌ها حداقل در ۵۰٪ از ماه‌های پیش رو (طی دورهٔ ۵ سالهٔ پیش‌بینی‌شده) کلاس‌های خشکسالی متوسّط و شدید را تجربه خواهند کرد (جدول ۵ و ۶).



شکل ۲. تغییرات کلاس‌های مختلف خشکسالی ماهانه (بر اساس داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده) در ایستگاه‌های مورد بررسی

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۵. کلاس‌های خشکسالی ماهانهٔ پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های مختلف (از ژانویهٔ ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۰)

ماه‌های سال	بم	بندرعباس	بندر لنگه	چابهار	ایران‌شهر	جاسک	کرمان	سراوان	شهر بابک	سیرجان	زابل	زاهدان
۱	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۲	۳	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۳	۲	۲	۳	۴	۲	۴	۲	۴	۳
۳	۲	۵	۳	۲	۲	۳	۳	۲	۴	۲	۲	۳
۴	۴	۱	۳	۴	۴	۳	۴	۳	۲	۲	۳	۳
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۷۹	۲	۴	۳	۳	۳	۴	۴	۲	۱	۴	۳	۳
۷۱	۲	۲	۴	۲	۴	۴	۴	۵	۲	۵	۲	۲
۷۲	۴	۵	۴	۲	۴	۳	۲	۱	۱	۱	۶	۲

جدول ۶. فراوانی وقوع کلاس‌های مختلف خشکسالی ماهانه در داده‌های پیش‌بینی‌شده (سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰) در ایستگاه‌های مورد بررسی (٪)

نام ایستگاه	EW	VW	MW	N	MD	SD	ED
بم	۱/۳۹	۲/۷۸	۶/۹۴	۴۰/۲۸	۱۸/۰۶	۲۶/۳۹	۴/۱۷
بندرعباس	۱/۳۹	۲/۷۸	۸/۳۳	۳۶/۱۱	۲۵	۲۳/۶۱	۲/۷۸
بندر لنگه	۱/۳۹	۴/۱۷	۵/۵۶	۲۶/۳۹	۵۶/۹۴	۵/۵۶	۰
چابهار	۰	۴/۱۷	۲/۷۸	۱۹/۴۴	۲۵	۴۷/۲۲	۱/۳۹
ایران‌شهر	۱/۳۹	۲/۷۸	۸/۳۳	۳۸/۸۹	۱۹/۴۴	۲۷/۷۸	۱/۳۹
جاسک	۰	۱/۳۹	۱/۳۹	۲۵	۵۶/۹۴	۱۵/۲۸	۰
کرمان	۰	۲/۷۸	۵/۵۶	۵۴/۱۷	۸/۳۳	۲۶/۳۹	۲/۷۸
سراوان	۲/۷۸	۲/۷۸	۵/۵۶	۵۱/۳۹	۲/۷۸	۲۹/۱۷	۵/۵۶
شهر بابک	۰	۰	۵/۵۶	۴۰/۲۸	۲۲/۲۲	۲۶/۳۹	۵/۵۶
سیرجان	۰	۴/۱۷	۲/۷۸	۵۶/۹۴	۴/۱۷	۲۹/۱۷	۲/۷۸
زابل	۰	۴/۱۷	۲/۷۸	۲۳/۶۱	۴۸/۶۱	۱۸/۰۶	۲/۷۸
زاهدان	۰	۱/۳۹	۱/۳۹	۲۰/۸۳	۳۳/۳۳	۳۴/۷۲	۸/۳۳

نتایج صحّت‌سنجی کلاس‌های خشکسالی ماهانهٔ پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد که در ایستگاه‌های بم، ایران‌شهر، سراوان، زابل و زاهدان، پیش‌بینی با دقّت ۷۵٪، در ایستگاه‌های بندرعباس، جاسک، کرمان و شهر بابک پیش‌بینی با دقت ۷۹/۱٪ و در ایستگاه‌های بندر لنگه، چابهار و سیرجان پیش‌بینی با دقت ۸۳/۳٪ انجام گرفته است که این موضوع مناسب بودن دقّت پیش‌بینی را نشان می‌دهد (جدول ۷).

بحث

در این پژوهش، بر مبنای استفاده از شاخص بارش استاندارد و مدل زنجیرهٔ مارکوف مرتبهٔ اوّل، احتمال گذر و ماندگاری از یک کلاس خشکسالی به کلاس دیگر در هفت حالت خشکسالی بسیار شدید، خشکسالی شدید، خشکسالی متوسّط، نرمال، ترسالی متوسّط، ترسالی شدید و ترسالی بسیار شدید مورد بررسی قرار گرفت. ذکر این نکته لازم است که از میان روش‌های مختلف ارائه‌شده برای پیش‌بینی خشکسالی (مثل مدل‌های سری زمانی) روش زنجیرهٔ مارکوف یکی از روش‌هایی است که با داده‌های گسسته سازگار است و امکان پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی را فراهم می‌کند؛ بنابراین، در این مطالعه، این روش به دیگر روش‌ها ترجیح داده شده است.

جدول ۷. سطح دقّت پیش‌بینی انجام‌شده با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف در ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	دقّت پیش‌بینی (٪)	نام ایستگاه	دقت پیش‌بینی (٪)	نام ایستگاه	دقّت پیش‌بینی (٪)
ایران‌شهر	۷۵	بم	۷۵	کرمان	۷۹/۱
جاسک	۷۹/۱	بندرعباس	۷۹/۱	سراوان	۷۵
زابل	۷۵	بندر لنگه	۸۳/۳	شهر بابک	۷۹/۱
زاهدان	۷۵	چابهار	۸۳/۳	سیرجان	۸۳/۳

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج این بررسی نشان داد که احتمال گذر از یک حالت به همان حالت به عنوان مثال از کلاس نرمال به نرمال در مقایسه با دیگر احتمالات گذر، دارای فراوانی بیشتری است. احتمال گذر از حالت خشکسالی به خشکسالی شدیدتر و یا کلاس مرطوب به خشک در مقایسه با گذر از کلاس خشک به مرطوب دارای احتمال وقوع بیشتری است. اسدی زارچ و همکاران (۲۰۱۱)، به ارزیابی خشکسالی با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف پرداختند، ایشان پیشنهاد دادند که به کمک باکس پلات، ماه‌های دارای مقدار بارش صفر حذف شده و مقدار شاخص خشکسالی برای دیگر ماه‌ها محاسبه شود. نتایج مطالعهٔ ایشان نیز نشان داده بود که احتمال انتقال از دیگر کلاس‌های خشکسالی به کلاس ۴ بیش از سایر کلاس‌ها است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیق اسدی زارچ و همکاران (۲۰۱۱) متفاوت است که این موضوع، ناشی از عدم حذف ماه‌های دارای بارش صفر در پژوهش حاضر است. زارعی و همکاران (۲۰۱۶، الف و ۲۰۱۶، ب) و زارعی و محمودی (۲۰۱۷)، در مطالعات خود بر افزایش دقّت بررسی خشکسالی به کمک شاخص‌های ارزیابی شدّت خشکسالی بدون حذف ماه‌های دارای بارش صفر تأکید نموده‌اند. مقصود و همکاران (۱۳۹۵) نیز به بررسی خشکسالی به کمک شاخص استاندارد بارش و زنجیرهٔ مارکوف بدون حذف ماه‌های دارای بارش صفر پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان داد که حالت تقریباً نرمال یا کلاس ۴ غالب بوده و بیشترین احتمال انتقال، احتمال انتقال به این کلاس است. نتایج مطالعهٔ حاضر با پژوهش مقصود و همکاران (۱۳۹۵)، مشابهت دارد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر نیز ماه‌های دارای بارش صفر از سری داده‌ها حذف نشده است. شکری کوچک و بهنیا (۱۳۹۲)، اقدام به پایش و پیش‌بینی خشکسالی در استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی استاندارد بارش و زنجیرهٔ مارکوف نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها، وضعیّت تقریباً نرمال، بیشترین فراوانی را داراست. بر اساس نتایج این مطالعه، احتمال گذر از یک حالت معیّن به همان حالت در زمان‌های متوالی بسیار بالا است و در عوض، احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس بسیار پایین است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج شکری کوچک و بهنیا (۱۳۹۲) متفاوت نیست.

با توجّه به نتایج پژوهش‌های انجام‌شده توسّط دیگر محقّقان، در بحث ارزیابی خشکسالی و پیش‌بینی آن به وسیلهٔ زنجیرهٔ مارکوف (بدون حذف ماه‌های صفر) و همچنین عدم وجود تفاوت بین نتایج تحقیقات انجام‌شده با پژوهش حاضر (به دلیل یکسانی شرایط اقلیمی منطقه‌های مورد مطالعه، عدم حذف ماه‌های دارای بارش صفر در مطالعات و همچنین یکسانی شاخص ارزیابی خشکسالی) استفاده از نتایج بررسی انجام‌شده به دلیل به‌روزتر بودن داده‌های اقلیمی، استفاده از ایستگاه‌هایی با پراکندگی مناسب و طول دورهٔ آماری کافی و همچنین شدّت زیاد آسیب‌پذیری منطقهٔ مورد مطالعه از خشکسالی (به دلیل خشک و نیمه‌خشک بودن اقلیم منطقه) می‌تواند در مدیریت بحران‌های ناشی از خشکسالی مؤثّر باشد.

نتیجه‌گیری

خشکسالی، یکی از پدیده‌های آب‌وهوایی و از جمله رخدادهای مصیبت‌باری است که همواره خسارت‌های زیادی به جوامع انسانی وارد می‌سازد. خشکسالی یا کاهش آب قابل دسترس می‌تواند به صورت‌های گوناگون مانند کمبود بارش، کاهش دبی رودخانه‌ها و کاهش حجم منابع آب مشاهده گردد. با توجّه به گسترش روزافزون نیاز و تقاضا در جامعه برای دسترسی به منابع آب سطحی و زیرسطحی در بخش‌های مختلف، مدیریت منابع آب کشور، از جنبه‌های مختلف با چالش‌های جدّی روبه‌رو می شود؛ از طرفی این چالش‌ها در اثر بروز خشکسالی، جدّی‌تر خواهد شد؛ لذا با توجّه به اهمّیّت موضوع، می‌بایستی اقدامات اساسی در سطح

Archive of SID

www.SID.ir

ملّی، همراه با راهکارهای مدیریتی متناسب، به منظور آمادگی‌های لازم در این خصوص صورت پذیرد؛ بنابراین، پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند در مدیریت درست بحران و کنترل خسارات ناشی از آن مؤثّر باشد. نتایج این بررسی نشان داد که طی ۵ سال آینده، وضعیّت منطقه از نظر نزولات جوّی چندان مناسب نخواهد بود. با توجّه به نتایج این بررسی، می‌توان اعلام نمود که بایستی توجّه بیشتری به خشکسالی‌های پیش رو و مدیریت مناسب آنها در راستای کاهش اثرات و خسارات ناشی از آن داشته باشیم. با وجود اینکه پیش‌بینی دارای قطعیّت نیست؛ امّا با توجّه به وضعیّت تغییرات اقلیمی جهان و خشکسالی‌هایی که سراسر کرهٔ زمین را فراگرفته است؛ همین میزان ناچیز نیز قابل توجّه است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود واجب می‌دانند از مسئولان و کارشناسان سازمان هواشناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های اقلیمی لازم، کمال تشکّر و قدرانی را به عمل آورند.

منابع

اقتداری، مهرنوش؛ بذرافشان، جواد؛ شفیعی، مریم؛ حجابی، سمیه (۱۳۹۵) پیش‌بینی خشکسالی جریان رودخانه با استفاده از شاخص SPI و زنجیرهٔ مارکوف در حوضهٔ آبریز کرخه، **پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک**، ۲۳ (۲)، صص. ۱۳۰-۱۱۵.

انصافی مقدم، طاهره (۱۳۸۶) ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضهٔ دریاچهٔ نمک، **تحقیقات مرتع و بیابان ایران**، ۱۴ (۲)، صص. ۲۸۸-۲۷۱.

جعفری بهی، خدابخش (۱۳۷۸) **تحلیل آماری دوره‌های تر و خشک بارندگی در چند نمونهٔ اقلیمی ایران با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف**، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، استاد راهنما: سهراب حجام، دانشگاه تهران، تهران.

جوان، خدیجه (۱۳۹۵) بررسی تداوم روزهای بارانی در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف، **نشریهٔ تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی**، ۱۶ (۴۳)، صص، ۱۹۳-۱۷۳.

حجازی‌زاده، زهرا؛ شیرخانی، علیرضا (۱۳۸۴) تحلیل و پیش‌بینی آماری خشکسالی و دوره‌های خشک کوتاه‌مدّت در استان خراسان، **پژوهش‌های جغرافیایی**، ۳۷ (۵۲)، صص. ۳۱-۱۳.

سلطانی، سعید؛ سعادتی، سیده سارا (۱۳۸۶) پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از نمایهٔ استاندارد بارش، **علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، ۱ (۲)، صص. ۶۷-۶۴.

شکری کوچک، سعید؛ بهنیا، عبدالکریم (۱۳۹۲) پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و زنجیرهٔ مارکوف، **علوم و مهندسی آبیاری (مجلّهٔ علمی کشاورزی)**، ۳۶ (۳)، صص. ۱۲-۱.

علیزاده، امین؛ آشگر طوسی، شادی (۱۳۸۷) توسعهٔ یک مدل برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی (مطالعهٔ موردی استان خراسان رضوی)، **علوم و صنایع کشاورزی، ویژهٔ آب‌وخاک**، ۲۲ (۱)، صص. ۲۳۴-۲۲۳.

مقصود، فاطمه؛ ملکیان، آرش؛ محسنی ساروی، محسن؛ بذرافشان، ام‌البنین (۱۳۹۵) پایش و پهنه‌بندی خصوصیات خشکسالی هواشناسی با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف و روش‌های زمین‌آمار (مطالعهٔ موردی: استان قزوین)، **مرتع و آبخیزداری**، ۶۹ (۴)، صص. ۱۰۹۹-۱۰۷۵.

مقیمی، محمد مهدی؛ سپاسخواه، علیرضا (۱۳۸۷) تولید داده‌های بارندگی در استان فارس در ایستگاه‌های فاقد آمار کافی، **علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، ۲ (۳)، صص. ۱۹-۱۱.

Archive of SID

www.SID.ir

یوسفی، نصرت‌اله؛ حجام، سهراب؛ ایران‌نژاد، پرویز (۱۳۸۶) برآورد احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از زنجیره‌های مارکوف و توزیع نرمال (مطالعهٔ موردی قزوین)، **پژوهش‌های جغرافیایی**، ۳۹ (۸)، صص. ۱۲۸-۱۲۱.

Alam, N. M., Sharma, G. C., Moreira, E., Jana, C., Mishra, P. K., Sharma, N. K., Mandal, D. (2017) Evaluation of Drought Using SPEI Drought Class Transitions and Log-Linear Models for Different Agro-Ecological Regions of India, **Physics and Chemistry of the Earth,** 100, pp. 31-43.

Asadi Zarch, M. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., Kousari, M. R. (2011) Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran, **Water Resources Management**, 25, pp. 3485-3504.

Bonaccorso, B., Cancelliere A., Rossi, G. (2015) Probabilistic Forecasting of Drought Class Transitions in Sicily (Italy) Using Standardised Precipitation Index and North Atlantic Oscillation Index, **Hydrology**, 562, pp. 136-150.

Chen, S., Shin J. Y., Kim, T. W. (2017) Probabilistic Forecasting of Drought: a Hidden Markov Model Aggregated with the RCP 8.5 Precipitation Projection, **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, 31 (5), pp. 1061-1076.

Claudia, F. A., Teixeira, G., Rita, D. C., Fraga, D., Gisele, M. D. (2017) Stochastic Modeling Using Markov Chain on the Forecast Standardized Precipitation Index, **Cientifica**, 45 (2), pp. 137- 144.

Gabrial, K. R., Neumann J. (1962) A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrences in Telaviv, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 88 (375), pp. 90-95.

Kogan, F. N. (1998) Global Drought Watch from Space, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 78 (4), pp. 621-636.

Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, **Preprints Eighth Conference on Applied Climatology**, 3, pp.179-184.

Mishra, A. K., Singh, V. P. (2010) A Review of Drought Concepts, **Hydrology**, 391 (1-2), pp. 202-216.

Naserzadeh, M. M., Ahmadi, E. (2013) Assessment the Performance of Meteorological Drought Indices in Drought Monitoring and Zoning in Qazvin Province, **Applied Researches in Geographical Sciences**, 12 (2), pp. 141-161.

Silva, V. P. (2003) On Climate Variability in Northeast Brazil, **Arid Environment**, 54 (2), pp. 256-367.

Siti, N. R., Niranjali, J., Muhammed A. B. (2017) Short-Term Droughts Forecast Using Markov Chain Model in Victoria, Australia, **Theoretical and Applied Climatology**, 129 (1-2), pp. 445-457.

Szilagyi, J., Balint, G., Csik, A. (2006) Hybrid, Markov Chain based model for daily stream flow generation at multiple catchment sites, **Hydrologic Engineering**, ASCE, 11 (3), pp. 245-256.

Thyer, M. A., frost, A. J., Akvczera, G. (2006) Parameters Imation and Model Identification for Stochastic Models of Annual Hydrological Data, **Hydrology**, 330 (1-2), pp. 313-327.

Tsakiris, G., Vangelis H. (2004) Towards a Drought Watch System Based on Spatial SPI, **Water Resources Management**, 18 (1), pp. 1-12.

Whipple, W. (1966) Regional Drought Analysis, **Irrigation and Drainage Division**, (92), pp. 3-11.

Zarei A. R., Moghimi M. M., Mahmoudi M. R. (2016, A) Analysis of Changes in Spatial Pattern of Drought Using RDI Index in South of Iran, **Water Resources Management**, 30 (11), pp. 3723-3743 **.**

Zarei A. R., Moghimi M. M., Mahmoudi M. R. (2016, B) Parametric and Non-Parametric Trend of Drought in Arid and Semi-Arid Regions Using RDI Index, **Water Resources Management**, 30, pp. 5479-5500.

Archive of SID

www.SID.ir

Zarei A. R., Mahmoudi M. R. (2017) Evaluation of Changes in RDIst Index Effected by Different Potential Evapotranspiration Calculation Methods, **Water Resources Management**, 31 (15), pp. 4981-4999.

پیوست‌ها

```
## Functions to check properties of Markov chains by simulation

## Author: Mohammad Reza Mahmoudi, 05.02.2016

## Function to simulate a Markov chain
# What do we need:
# q : vector of initial probabilities
# P : matrix with transition probabilities
# n : length of the Markov chain
# states : labels of the states

simMC <- function(q, P, n, states){

  # generate a vector of the desired length
  myMC <- rep(NA, n)
  # sample the initial state from the states vector using the initial probabilities.
  myMC[1] <- sample(states, 1, prob=q)
  # conditioning on where we at time i-1 we sample the next state at time i.
  for(i in 2:n){
    # we know the state at time i-1, which is myMC[i-1], to get the
    # corresponding line in P we use the function match.
    # The function math returns the position of myMC[i-1] in the
    # states vector, i.e the line in P that belongs to state myMC[i-1].
    myMC[i] <- sample(states, 1, prob=P[match(myMC[i-1], states),])
  }
  # return the Markov chain
  return(myMC)
}

# desired length of the Markov chain
n <- 100
# state space for the inventory models
states <- c(1,2,3,4,5,6,7)
# vector of initial probabilities.  Here, we say to start in state 2.
q <- c(0,1,0,0,0,0,0)
# transition matrix from the inventory model
P <- matrix(c(0,0.1,0.4,0.5,0,0,0,
              0,0.1,0.4,0,0,0,0.5,
              0.1,0,0,0,0.4,0.5,0,
              0,0,0,0,0.1,0.4,0.5), 7,7, byrow=T)

MC <- simMC(q=q, P=P, n=n, states=states)
MC
plot(MC, type="o", ylab="States", xlab="time")
```

پیوست ۱. دستورالعمل مورد استفاده در نرم‌افزار R به منظور پیش‌بینی بر مبنای زنجیرهٔ مارکوف

Archive of SID

www.SID.ir