



پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکف

مهدی قمقما^{۱*} و جواد بذرافشان^۲

*۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
نویسنده مسئول مکاتبات: mahdi.ghamghami@gmail.com
۲) استادیار هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۲۶

چکیده

مدیریت خشکسالی به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار ضروری است. یکی از روش‌های مدیریت خشکسالی، پیش‌آگاهی آن با استفاده از روش‌های احتمالاتی است. در این مطالعه، از آمار بارندگی ماهانه مربوط به ۳۳ ایستگاه سینوپتیک ایران طی دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در کشور استفاده شد، با توجه به وجود دوره‌های خشک بیش از شش ماه در برخی از ایستگاه‌های مناطق خشک کشور، پایش خشکسالی بر مبنای شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در مقیاس زمانی ۶ ماهه انجام شد. برای پیش‌بینی وضعیت خشکسالی تا سه ماه آینده، از مدل زنجیره مارکف مرتبه نخست استفاده شد. آزمون مدل بر مبنای سری زمانی شاخص بارندگی استاندارد در ایستگاه‌های تحت بررسی نشان داد که مدل مارکف توانایی شبیه‌سازی رفتار احتمالاتی خشکسالی را در گستره ایران دارد. نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو در گستره کشور نشان داد که با فرض هر وضعیتی از نظر بارندگی در کشور در ماه فعلی، بسیار محتمل است که در ماه‌های آتی، خشکسالی‌های شدید (۹ درصد ایستگاه‌ها) یا وضعیت نرمال (۸۷ درصد ایستگاه‌ها) در منطقه رخ دهد. همچنین، پایش خشکسالی بر مبنای سری متوسط منطقه‌ای بارندگی ماهانه در کشور نشان داد که روند تغییرات شدت خشکسالی‌های شدید در کشور رو به افزایش است.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی؛ پیش‌آگاهی؛ مدل مارکف

مقدمه

نظیر سیل و طوفان متمایز ساخته است (Dai, 2010). آمار و ارقام منتشر شده توسط پایگاه بین المللی بلایای طبیعی (EM-DAT) وابسته به مرکز تحقیقات اپیدمیولوژی بلایای طبیعی (CRED) در مورد رخداد و تبعات بلایای طبیعی طی سال‌های ۱۹۰۰-۲۰۱۱ در ایران نشان می‌دهد که خشکسالی در مقایسه با سایر بلایای طبیعی، از نظر متوسط جمعیت انسانی تحت تاثیر و متوسط خسارات اقتصادی (بیش از ۱/۶ میلیارد دلار) در

رخدادهای حدی آب و هوایی تاثیر زیادی بر فرآیندهای مختلف زیست-محیطی دارند. مدیریت موثر و پویای این رخدادها با پیش‌بینی آنها در جهت ایجاد آمادگی به منظور مقابله یا حفظ تعادل در فرآیندهای زیست-محیطی امکان‌پذیر است. در بین پدیده‌های حدی آب و هوایی، خشکسالی یک خطر طبیعی است که شروع آن می‌تواند تدریجی و نامحسوس و تاثیر آن طولانی و ماندگار باشد و شاید همین ویژگی، این پدیده را از سایر پدیده‌ها

ویژگی انعطاف‌پذیری این شاخص از نظر مقیاس زمانی می‌توان گفت که با محاسبه کمبود بارندگی در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌توان تاثیر خشکسالی را روی اجزای مختلف منابع آب مانند آبهای زیرزمینی، ظرفیت رطوبتی خاک و جریان‌های رودخانه‌ای نشان داد. به عنوان مثال، وضعیت رطوبتی خاک نسبت به ناهنجاری‌های بارشی کوتاه مدت (ماهانه) واکنش نشان می‌دهد، این در حالی است که ذخایر آبهای سطحی و زیرسطحی به ناهنجاریهای درازمدت (فصلی یا سالانه) پاسخ می‌دهند (Barua, 2010; Smakhtin & Haghes, Smakhtin, 2001; Keyanhash, 2004).

به‌طورکلی، دو طریق عمده برای پیش‌بینی پدیده‌های آب و هوایی ارائه شده است: الف) استفاده از قوانین دینامیکی حاکم بر اتمسفر (مدلهای گردش عمومی جو)، و ب) دسترسی به سری زمانی اطلاعات عناصر آب و هوایی و استفاده از مدل‌های آماری (از قبیل توابع توزیع احتمالاتی، مدل‌های استوکاستیک و زنجیره مارکوف) (یوسفی و همکاران، ۱۳۸۶). متداول‌ترین مدل آماری برای مدلسازی و پیش‌بینی کیفی متغیرهای محیطی، روش زنجیره مارکوف است که برای پیش‌بینی عناصر مختلف محیطی (بارش، رواناب، عملکرد زراعی و مرتعی، تبخیر-تعرق پتانسیل، عمق آبهای زیرزمینی و غیره) مورد استفاده قرار گرفته است (برای مثال، Banik et al., 2002; Campbell and Bates, 2001; Crystal Ng, 2003).

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل مارکوف انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. (Lohani & Loganathan (1997)

رتبه نخست قرار داشته است (EM-DAT, 2011).

خشکسالی یک وضعیت نسبی (و نه مطلق) به حساب می‌آید که ممکن است در هر دو منطقه پرباران و کم‌باران کره زمین اتفاق افتد. علت اولیه خشکسالی، کمبود یا فقدان ریزش‌های جوی در یک دوره‌ی زمانی ممتد است. این کمبود میزان بارندگی سبب افت رطوبت خاک، جریان‌های رودخانه‌ای و آبهای زیرزمینی می‌شود. اثرات خشکسالی از کمبود آب و برهم زدن تعادل بین عرضه و تقاضای این عنصر حیاتی گرفته تا کشاورزی و مسائل اقتصادی-اجتماعی جوامع، می‌تواند بخش قابل‌توجهی از مردم را تحت‌الشعاع خود قرار دهد (Barua, 2010; Wilhite & Glantz, 1985; Narendra, 2008).

نقطه‌ی مشترک همه‌ی مطالعات در زمینه‌ی خشکسالی آن است که برای پیش یا کمی‌سازی این پدیده از نمایه‌هایی استفاده می‌کنند. عناصر موجود در نمایه‌ها، عوامل آب و هوایی موثر در شکل‌گیری خشکسالی هستند. به عنوان مثال، در اغلب نمایه‌های خشکسالی هواشناسی از عامل بارندگی (در مقیاس‌های مختلف زمانی) استفاده می‌شود، زیرا امکان دسترسی به اطلاعات تاریخی این عامل در اکثر نقاط دنیا وجود دارد. کاربردی‌ترین نمایه‌ی خشکسالی هواشناسی، نمایه‌ی بارش استاندارد (SPI) است که توسط Mckee et al., (1993) توسعه یافته‌است. SPI به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های بارندگی و قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه به عنوان مناسب‌ترین نمایه برای پیش خشکسالی هواشناسی شناخته شده است (Hayes et al., 1999, رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶). در مورد

¹ Standardized Precipitation Index

زنجیره مارکف، طبقات نمایه‌ی SPI را تا سه گام زمانی آینده در پرتغال پیش‌بینی نمودند. آشگر طوسی و همکاران (۱۳۸۲) از شاخص درصد نرمال و SPI به ترتیب برای پیش‌خشکسالی‌ها در دو مقیاس سالانه و ماهانه و از زنجیره مارکف برای پیش‌بینی خشکسالی در استان خراسان رضوی استفاده نمودند. بعد از پیش‌وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی در ایستگاه‌های سینوپتیک استان، وضعیت آب‌وهوایی را برای سال ۲۰۰۸ پیش‌بینی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی سالانه حاکی از وقوع محتمل‌تر وضعیت نرمال آب و هوایی در اکثر ایستگاه‌ها و نتایج پیش‌بینی ماهانه حاکی از وقوع خشکسالی ملایم در برخی ایستگاه‌ها و ترسالی ملایم در برخی دیگر بود. رجبی و همکاران (۱۳۸۶) رفتار احتمالاتی سری زمانی SPI را در استان فارس با استفاده از مدل زنجیره مارکف شبیه‌سازی و طول مدت خشکسالی را طی یک دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی نمودند. Liu et al., (2009) در تحقیقی مشابه Lohani et al. (1998) امکان پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی در چین را بررسی نمودند. ایشان با استفاده از نمایه‌ی PDSI و مدل زنجیره مارکف، طبقات شدت خشکسالی را برای ۱۲ ماه طی سال ۲۰۰۰ پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل مارکف توان کافی برای پیش‌بینی طبقات مختلف SPI به ویژه برای حالات نرمال و خشکسالی خفیف را دارد.

بررسی تحقیقات داخلی نشان داد که تاکنون یک مطالعه جامع در زمینه پیش‌بینی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره‌ی کشور انجام نشده است. لذا، هدف اصلی این تحقیق، بررسی امکان پیش‌بینی اوضاع خشکسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکف در گستره‌ی ایران انتخاب

Lohani et al. (1998) با اعمال مدل زنجیره مارکف بر طبقات شاخص خشکسالی پالمر، یک سامانه‌ی پیش‌آگاهی برای مدیریت خشکسالی کشاورزی در دو منطقه متفاوت اقلیمی در ایالت ویرجینیا توسعه دادند. (Steinemann 2003) سه نمایه‌ی شاخص بارندگی استاندارد (SPI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) و شاخص خشکسالی هیدرولوژیک پالمر (PHDI) را به ترتیب برای پیش‌خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در جنوب‌شرقی ایالات متحده به کار گرفت. وی براساس تحلیل مارکفی بر روی طبقات خشکسالی به این نتیجه رسید که می‌توان از مدل ارائه شده برای آمادگی در برابر خشکسالی استفاده نمود. یوسفی و همکاران (۱۳۸۶) دو روش زنجیره مارکف و تابع توزیع نرمال را از نظر برآورد احتمال طبقات مختلف خشکسالی براساس بارش‌های سالانه و فصلی ایستگاه قزوین مقایسه و به این نتیجه رسیدند که مدل مارکف تخمین‌های بهتری نسبت به تابع توزیع نرمال ارائه می‌دهد. رضیئی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از مدل مارکف و نمایه‌ی SPI در مقیاس‌های سه و شش ماهه، احتمال وقوع یا گسترش خشکسالی را در استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در نواحی مرکزی استان، احتمال وقوع خشکسالی هواشناسی بیش از ۷۰ درصد و در نواحی شرقی کمتر از ۵۰ درصد است. به همین دلیل بخش مرکزی استان نسبت به سایر بخش‌ها آسیب‌پذیرتر است. Paulo & Pereira (2007) نشان دادند که رهیافت مدلسازی زنجیره مارکف در درک ویژگی‌های تصادفی پدیده‌ی خشکسالی از طریق تحلیل احتمالات انتقال مفید می‌باشد و با استفاده از

Keyanthash, 2004; Barua, Haghese, 2004 (2010). برای محاسبه‌ی این نمایه، ابتدا لازم است یک پنجره متحرک زمانی (برای مثال، ۳، ۶، ۹، یا ۱۲ ماه) تعریف نمود. سپس، سری زمانی مجموع بارندگی در هر پنجره متحرک تعیین می‌شود. برای مثال، بارندگی تجمعی با پنجره متحرک سه ماهه از مجموع بارندگی همان ماه و دو ماه قبل محاسبه می‌شود. با برازش یک توزیع آماری مناسب بر سری بارش در پنجره زمانی معین، و انتقال این توزیع به توزیع نرمال استاندارد، مقادیر نمایه بارندگی استاندارد به دست می‌آید. بذرافشان (۱۳۸۱) با مقایسه برازش هفت توزیع احتمال شامل نرمال، لوگ نرمال ۲ پارامتری، لوگ نرمال ۳ پارامتری، گامای ۲ پارامتری، پیرسون تیپ ۳ و لوگ پیرسون تیپ ۳ و گامبل در اقلیم‌های مختلف ایران به این نتیجه رسید که در ۴ پنجره زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه همواره توزیع گاما به لحاظ آماری برازش قابل قبولی بر داده‌های بارندگی دارد. در این تحقیق نیز از همین تابع توزیع استفاده شده است. جدول (۱) طبقات مختلف شاخص SPI را نشان می‌دهد. شرح کامل روش محاسبه SPI در منابع مختلف آمده است (برای مثال، McKee et al., 1993; Smakhtin and Haghese, 2004).

مدل زنجیره مارکف

برای پیش‌بینی حالات مختلف وقوع یک پدیده واجد وابستگی زمانی می‌توان از مدل زنجیره مارکف استفاده نمود (Cinlar, 1975; Paulo & Pereira, 2007). طبق تعریف، توالی زمانی از مقادیر یک متغیر تصادفی (X_t) می‌تواند به صورت یک زنجیره مارکف باشد، منوط به اینکه دو شرط زیر ارضاء شود: اولاً، هر مقدار از این متغیر متناظر با یک حالت معین باشد، برای

گردید تا به کمک آن با دید وسیع و کاربردی تری به مسئله پیش آگاهی وضعیت خشکسالی در کشور نگریسته شود.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از داده‌های بارندگی ۳۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در اقلیم‌های مختلف کشور استفاده شد. این ایستگاهها در دامنه‌ای از اقلیم‌های خشک تا بسیار مرطوب ایران (طبق کلاسه‌بندی اقلیمی شاخص دومارتن) قرار می‌گیرند (علیزاده، ۱۳۷۴). توزیع جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از بررسی‌های اولیه بر روی دوره آماری ایستگاه‌ها و درصد خلاءهای آماری بارندگی ماهانه مشخص شد که می‌توان از یک دوره مشترک ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برای انجام تحلیل‌های بعدی استفاده نمود. همگنی داده‌ها توسط آزمون جرم مضاعف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که همه‌ی ایستگاه‌ها دارای آمار همگن می‌باشند. در برخی از ایستگاه‌ها و برخی از سالها داده‌های مفقود مشاهده شد که به کمک روش‌های آماری بازسازی شدند. برای بازسازی داده‌ها از روش همبستگی با نزدیک‌ترین ایستگاه مجاور که دارای آمار کاملی است استفاده شد، به طوری که ایستگاه منتخب واجد همبستگی بالا و معنی دار با ایستگاه خلاء می‌باشد.

شاخص بارندگی استاندارد (SPI)

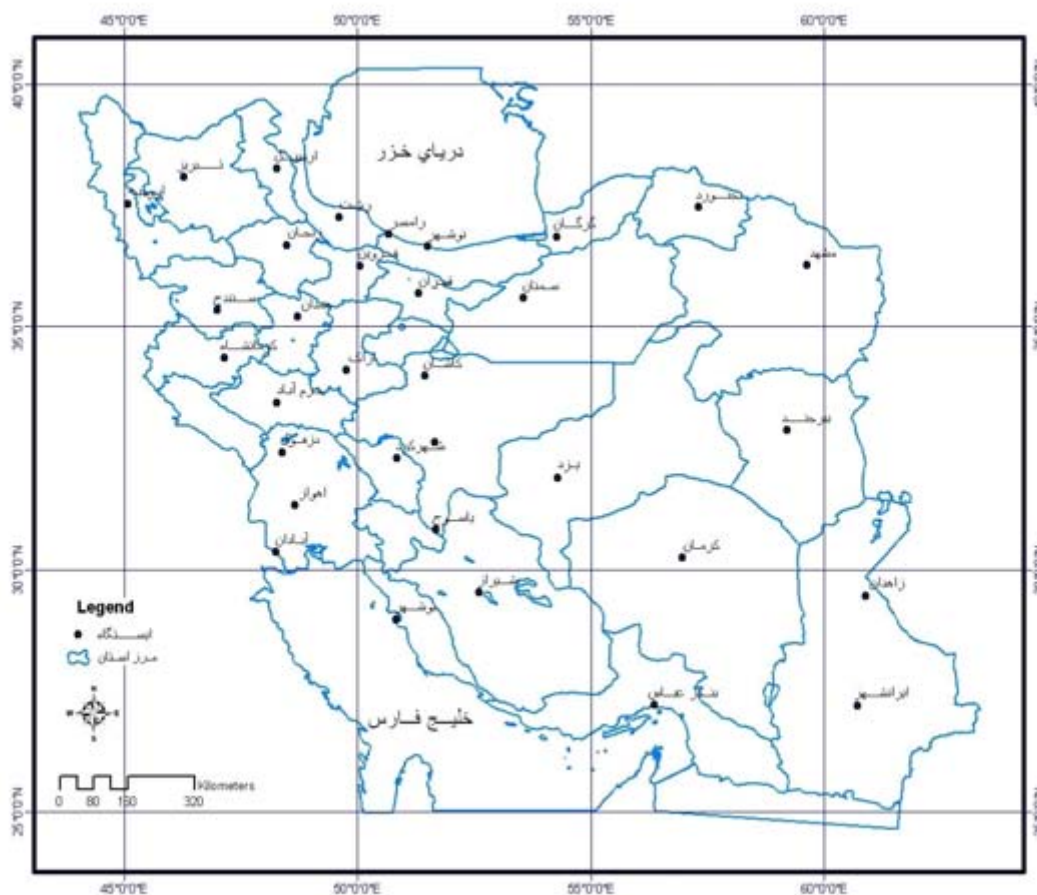
در این تحقیق برای کمی‌سازی خشکسالی هواشناسی از نمایه‌ی بارندگی استاندارد (SPI) استفاده شد. با توجه به اینکه تنها متغیر مورد استفاده در این شاخص، بارندگی است، نمی‌توان از آن در پایش دقیق خشکسالی کشاورزی و هیدرولوژیک استفاده نمود (Smakhtin and

دیگر تعیین می‌شود که به آن احتمالات انتقال یا گذر می‌گویند. ماتریسی که دربرگیرنده‌ی این احتمالات باشد، ماتریس احتمال انتقال نام دارد. پس یک زنجیره مارکف با یک مجموعه‌ای از حالات (s)، یک ماتریس احتمال انتقال بین حالات ($P_{i,j}$) و یک مرتبه‌ی معین از وابستگی-های قبلی تعریف می‌شود.

مثال اگر X_t ($t=n$) برابر با a_i ($i=1, \dots, s$) باشد، گفته می‌شود که سری زمانی در گام n م در حالت a_i قرار دارد. ثانیاً: هر مقدار از متغیر به مقدار یا مقادیر بلافاصله قبلی سری زمانی وابسته باشد که در اصطلاح به آن مرتبه‌ی زنجیره مارکف می‌گویند. رفتار یک زنجیر مارکف بوسیله مجموعه-ای از احتمالات در گذر از یک حالت به حالات

جدول ۱- طبقات مختلف شاخص SPI و کدهای اختصاص یافته به هر طبقه.

کد	طبقه	حدود شاخص بازنگری استاندارد (SPI)
۱	نرمال و بالاتر از نرمال	بزرگتر از ۱-
۲	خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۵-
۳	خشکسالی شدید	۲- تا ۱/۵-
۴	خشکسالی خیلی شدید	کمتر از ۲-



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاههای منتخب در گستره کشور.

سری داده‌ها و فرض یک (H1) حاکی از وجود وابستگی زمانی از مرتبه‌ی یک می‌باشد. برای انجام این آزمون ابتدا، از روی فراوانی‌های انتقال مشاهده شده (ماتریس ۳) فراوانی‌های مورد انتظار (e_{ij}) انتقال از یک حالت به حالت دیگر تعیین می‌شوند (Wilks, 2011):

$$e_{ij} = \frac{(n_{i+})(n_{+j})}{n} \quad (4)$$

که، n_{i+} مجموع فراوانی‌های مشاهده شده برای انتقال از حالت i به تمام حالات، n_{+j} مجموع فراوانی‌های مشاهده شده برای انتقال از تمام حالات به حالت j و n فراوانی کل است. آماره آزمون کای اسکوئر به صورت زیر تعریف شده است (Wilks, 2011):

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (5)$$

اگر مقدار آماره‌ی به دست آمده از رابطه فوق، از آماره‌ی جدول کای اسکوئر (در سطح $\alpha = 0.05$ و درجه آزادی $df = (s-1)^2$) بزرگتر باشد، فرضیه H_1 (معنی دار بودن وابستگی مرتبه یک داده‌ها) پذیرفته می‌شود. پس از ارزیابی برآزش مدل مارکف بر سری زمانی می‌توان احتمال حالت‌های مختلف سیستم را تا k گام زمانی بعد پیش‌بینی نمود:

$$P_{i,j}(t, t+k) = [P_{i,j}(t, t+1)]^k \quad (6)$$

که، $P_{i,j}(t, t+k)$: احتمال وقوع حالت‌های مختلف سیستم در k گام زمانی بعد است. پس از محاسبه ماتریس (۶) محتمل‌ترین کلاس شدت خشکسالی در پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو استخراج گردید.

نتایج و بحث

اوضاع کلی خشکسالی‌های تاریخی ایران

ساده‌ترین و پرکاربردترین شکل زنجیره مارکف، شکل مرتبه‌ی نخست است که در آن احتمال حالت آتی سیستم صرفاً به حالت فعلی آن بستگی دارد و به نوعی احتمال شرطی نیز محسوب می‌شود. شکل ریاضی یک زنجیره مارکف مرتبه‌ی نخست s حالت به صورت (Wilks, 2011):

$$P_{i,j} = P\{X_{t+1} = j | X_t = i\} \quad (1)$$

و ماتریس احتمال انتقال آن به صورت:

$$P = [p_{i,j}] = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,s} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{s,1} & p_{s,2} & \dots & p_{s,s} \end{bmatrix} \quad (2)$$

نشان داده می‌شود، که در آن $P_{i,j}$ احتمال انتقال از حالت i ام در زمان t به حالت j ام در زمان $t+1$ است. ویژگی این ماتریس آن است که مجموع عناصر واقع بر هر سطر آن برابر یک است. ماتریس (۲) پس از تعیین حالات سیستم در هر زمان و شمارش فراوانی‌های انتقال از یک حالت در زمان t به حالت دیگر در زمان $t+1$ بدست می‌آید. ماتریس فراوانی‌های انتقال مشاهده شده به صورت زیر است:

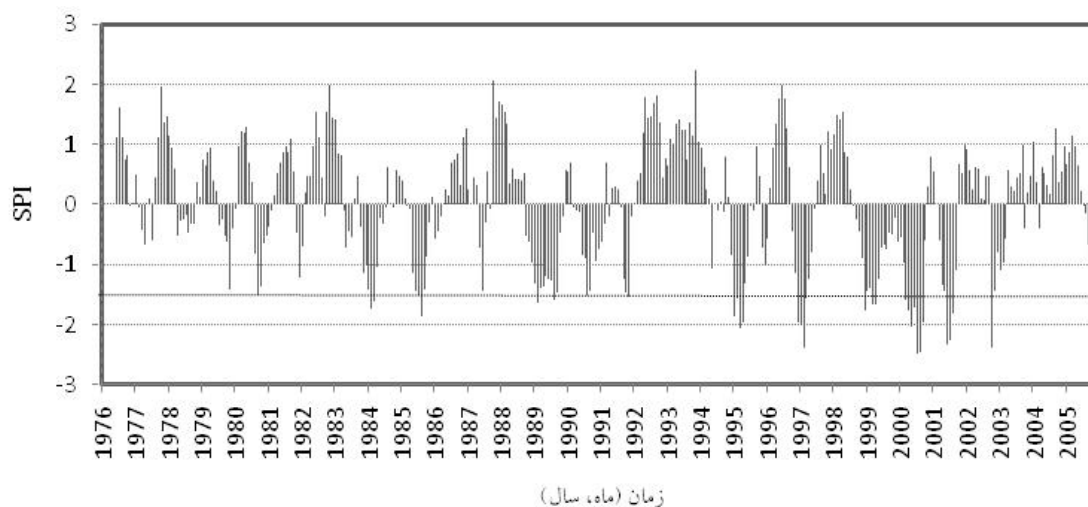
$$[n_{i,j}] = \begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} & \dots & n_{1,s} \\ n_{2,1} & n_{2,2} & \dots & n_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{s,1} & n_{s,2} & \dots & n_{s,s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

با توجه به این که بین مقادیر متوالی یک سری زمانی ممکن است وابستگی هر چند ناچیز وجود داشته باشد، لازم است قبل از اجرای مدل مارکف میزان معنی‌داری این وابستگی‌ها آزمون شود. در این مطالعه از آزمون کای اسکوئر (χ^2) برای بررسی میزان معنی‌داری استفاده شده است. فرضیه صفر (H_0) در این آزمون حاکی از استقلال زمانی

شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در مقیاس زمانی ۶ ماهه بر مبنای سری مذکور محاسبه شد (شکل ۲). بررسی مقادیر شاخص خشکسالی نشان می‌دهد که شدت خشکسالی‌های کشور بتدریج تا انتهای دوره افزایش یافته است. طولانی‌ترین خشکسالی‌های کشور در سالهای ۱۹۸۹ (با یک دوره ۹ ماهه) و ۲۰۰۰ (با یک دوره ۷ ماهه) اتفاق افتاده‌اند. گرچه مدت خشکسالی سال ۱۹۸۹ طولانی‌تر از ۲۰۰۰ است اما شدت خشکسالی سال ۲۰۰۰ (-۷) دو برابر سال ۱۹۸۹ (۳/۵-) است. نگاهی دقیق به شکل (۲) مویید این مطلب است که از سال ۱۹۹۷ به بعد شدت خشکسالی‌های کشور در محدوده طبقات شدید و بسیار شدید قرار گرفته است. این وضعیت حاکی از تشدید بحران آب در سالهای اخیر می‌باشد.

در این تحقیق ابتدا پایش خشکسالی در ۳۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک براساس SPI شش ماهه صورت گرفت. انتخاب مقیاس زمانی مناسب بخصوص برای مناطق کم‌باران حائز اهمیت است، زیرا وجود دوره‌های خشک بدون بارندگی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر از ۶ ماه در مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب خطا در محاسبه SPI می‌شود. بویژه، در صورتی که تعداد مقادیر صفر از ۵۰ درصد داده‌ها تجاوز کند، کل سری زمانی ترسالی اعلام می‌شود.

به منظور اطلاع بر مشخصات خشکسالی‌های تاریخی کشور، سری زمانی میانگین بارندگی در پهنه کشور برای هر یک از ماه‌های دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ (با استفاده از آمار بارندگی ۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشور) محاسبه گردید. سپس،



شکل ۲- سری زمانی SPI در مقیاس زمانی ۶ ماهه براساس میانگین بارندگی ایستگاهها برای طی دوره آماری مورد بررسی.

پیش‌بینی احتمالاتی خشکسالی

پس از محاسبه SPI در هر یک از ایستگاههای منتخب، طبقه‌بندی شاخص (مطابق جدول ۱) طی دوره آماری انجام شد. در نتیجه این طبقه‌بندی، هر یک از ماههای دوره آماری

مورد بررسی در یکی از کلاس‌های نرمال و بالاتر از نرمال (۱)، متوسط (۲)، خشکسالی شدید (۳) و بسیار شدید (۴) قرار گرفت. سپس، برآزش مدل زنجیره مارکف مرتبه نخست بر سری زمانی طبقات SPI با استفاده از آزمون آماری کای

اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب است.

بر اساس سری زمانی بارندگی متوسط ایران، با فرض حالت اولیه نرمال و خشکسالی متوسط، محتملترین پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو در طبقه نرمال قرار می‌گیرد. همچنین، با فرض حالت اولیه خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید، محتملترین پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو عمدتاً در طبقه خشکسالی شدید قرار می‌گیرد. بنابراین، در یک اظهار نظر کلی می‌توان گفت که بسیار محتمل است که در شرایط کشور ما، طی یک، دو، و سه ماه آینده شرایط نرمال یا خشکسالی‌های بسیار شدید اتفاق افتد تا خشکسالی‌های متوسط و بسیار شدید.

پس از انجام پیش‌بینی‌ها، فراوانی ایستگاهها از نظر محتملترین پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو معین گردید. جدول (۳) نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، مشاهده می‌شود که با فرض حالت اولیه نرمال، پیش‌بینی‌های یک تا سه گام به جلو در همه ایستگاه‌ها در وضعیت نرمال قرار می‌گیرند.

چنانچه در ماه فعلی در شرایط خشکسالی متوسط قرار داشته باشیم، در پیش‌بینی‌های دو و سه گام به جلو، همه ایستگاهها شرایط نرمال را محتملترین حالت دانسته‌اند. این در حالی است که در پیش‌بینی‌های یک گام به جلو، با فرض خشکسالی متوسط در زمان فعلی، محتملترین حالت در ۲۹ ایستگاه، وضعیت نرمال و ۴ ایستگاه، وضعیت خشکسالی متوسط پیش‌بینی شده است. در مورد خشکسالی‌های شدید، محتملترین حالت یک به جلو در ۹ ایستگاه، نرمال، در ۷ ایستگاه، خشکسالی متوسط، در ۱۵ ایستگاه، خشکسالی شدید، و مابقی خشکسالی بسیار شدید پیش‌بینی

اسکوئر (χ^2) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون در سطح اشتباه ۵ درصد نشان داد که زنجیره مارکف مرتبه نخست برازش قابل قبولی بر سری زمانی وضعیت خشکسالی در ایستگاههای مطالعاتی دارد. در مرحله بعد، با استفاده از ماتریس‌های احتمال انتقال بدست آمده در هر یک از ایستگاهها، پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو طبق معادله (۶) به انجام رسید. در نهایت نیز، محتملترین حالت یک، دو، و سه گام به جلو پس از هر یک از حالت‌های چهارگانه جدول (۱) از روی ماتریس احتمال پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو مشخص گردید. محاسبات محتملترین پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو برای ایستگاه‌های نمونه (معرف اقلیم‌های مختلف ایران) و متوسط بارندگی ایران در جدول (۲) ارائه شده است. عمده نتایج بدست آمده به تفکیک اقلیم‌های مختلف ایران به شرح زیر است:

- با فرض حالت اولیه نرمال و بالاتر از نرمال (کد ۱)، محتملترین پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو در تمام ایستگاههای منتخب و همچنین برای شرایط بارندگی متوسط ایران، وضعیت نرمال و بالاتر از نرمال (با احتمال بیش از ۸۰ درصد) می‌باشد.

- در تمام اقلیم‌های مورد بررسی، تداوم وضعیت نرمال در یک سری زمانی بیشتر از انواع خشکسالی‌های خفیف، متوسط و شدید می‌باشد.

- در اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب تعدیل وضعیت خشکسالی و رسیدن به آستانه نرمال زودتر از اقلیم خشک و نیمه خشک رخ می‌دهد. در نتیجه درست است که خشکسالی یک پدیده-ی فراگیر و متعلق به همه‌ی مناطق اعم از کم-باران و پر باران است، ولی تداوم و شدت آن در

شده است. در مورد خشکسالی‌های بسیار شدید، محتمل‌ترین حالت یک گام به جلو در اکثر ایستگاهها در طبقه خشکسالی بسیار شدید، و محتمل‌ترین حالت دو و سه گام به جلو در طبقه نرمال قرار می‌گیرد.

جدول ۲- محتمل‌ترین پیش‌بینی‌های ۱، ۲ و ۳ گام به جلو با توجه به حالت اولیه‌ی معین در اقلیم‌های نمونه و متوسط ایران.

۳ گام به جلو (t+3)		۲ گام به جلو (t+2)		۱ گام به جلو (t+1)		حالت اولیه
احتمال	حالت	احتمال	حالت	احتمال	حالت	
زاهدان (خشک)						
۰/۱۸۷۹	۱	۰/۱۸۹۵	۱	۰/۹۲۶	۱	۱
۰/۷۹۷	۱	۰/۷۳۸	۱	۰/۵۷۸	۱	۲
۰/۶۷۱	۱	۰/۵۶۳	۱	۰/۳۴۸	۱	۳
۰/۳۳۵	۴	۰/۴۶۶	۴	۰/۶۶۷	۴	۴
شیراز (نیمه‌خشک)						
۰/۱۸۸۲	۱	۰/۱۸۹۸	۱	۰/۹۲۸	۱	۱
۰/۷۷۴	۱	۰/۷۱۴	۱	۰/۵۶۱	۱	۲
۰/۶۲۲	۱	۰/۴۷۳	۱	۰/۲۷۸	۳	۳
۰/۵۶۹	۱	۰/۴۱۷	۱	۰/۴۴۴	۴	۴
گرگان (مدیترانه‌ای)						
۰/۹۰۴	۱	۰/۹۲۳	۱	۰/۹۵۲	۱	۱
۰/۶۸۴	۱	۰/۵۸۳	۱	۰/۴۲۳	۲	۲
۰/۵۵۷	۱	۰/۴۰۲	۱	۰/۳۷۵	۲	۳
۰/۴۶۲	۱	۰/۳۹۱	۲	۰/۶۶۷	۳	۴
یاسوج (مرطوب)						
۰/۱۸۸۴	۱	۰/۹۰۲	۱	۰/۹۳۴	۱	۱
۰/۷۳۵	۱	۰/۶۷	۱	۰/۵۲۹	۱	۲
۰/۵۸۲	۱	۰/۴۷۴	۱	۰/۳۷۵	۴	۳
۰/۴۳۵	۱	۰/۳۹۹	۴	۰/۵۵۶	۴	۴
رشت (بسیار مرطوب)						
۰/۱۸۵۳	۱	۰/۸۷	۱	۰/۹۰۸	۱	۱
۰/۷۹۱	۱	۰/۷۱۵	۱	۰/۵۱۰	۱	۲
۰/۷۸۴	۱	۰/۷۱۶	۱	۰/۵۷۷	۱	۳
۰/۶۹۲	۱	۰/۵۴۱	۱	۰/۳۶۸	۴	۴
متوسط ایران						
۰/۱۸۷۶	۱	۰/۱۸۹۹	۱	۰/۹۳۳	۱	۱
۰/۶۸	۱	۰/۶۲۲	۱	۰/۵	۱	۲
۰/۴۰۲	۱	۰/۳۲۳	۳	۰/۴۲۹	۳	۳
۰/۳۳۸	۳	۰/۴۲۴	۳	۰/۵	۳	۴

جدول ۳- فراوانی ایستگاهها از نظر محتملترین حالات در پیش‌بینی‌های یک، دو، و سه گام به جلو.

حالات انتقال (سطر به ستون)	نرمال و بالاتر از نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
پیش‌بینی یک گام به جلو:				
نرمال و بالاتر از نرمال	۳۳	-	-	-
خشکسالی متوسط	۲۹	۴	-	-
خشکسالی شدید	۹	۷	۱۵	۲
خشکسالی بسیار شدید	۱	۱	۸	۲۳
پیش‌بینی دو گام به جلو:				
نرمال و بالاتر از نرمال	۳۳	-	-	-
خشکسالی متوسط	۳۳	-	-	-
خشکسالی شدید	۳۲	-	۱	-
خشکسالی بسیار شدید	۲۰	۱	۶	۶
پیش‌بینی سه گام به جلو:				
نرمال و بالاتر از نرمال	۳۳	-	-	-
خشکسالی متوسط	۳۳	-	-	-
خشکسالی شدید	۳۳	-	-	-
خشکسالی بسیار شدید	۲۹	-	۳	۱

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک سامانه پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی تا سه ماه آینده با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد (SPI) و مدل زنجیره مارکف مرتبه نخست چهار حالت در ۳۳ ایستگاه سینوپتیک ایران مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی مدل پیشنهادی بر بارندگی‌های ایران نشان داد که مدل مارکف مرتبه نخست برازش قابل قبولی در سطح اشتباه ۵ درصد بر داده‌ها دارد. نتایج بدست آمده از اعمال مدل بر داده‌ها نشان داد که با فرض هر وضعیتی از نظر بارندگی در کشور، بسیار محتمل است که در ماه‌های آتی، خشکسالی‌های شدید یا وضعیت نرمال در منطقه اتفاق بیفتد.

منابع مورد استفاده

- آشگرطوسی، ش.، علیزاده، ا. و جوانمرد، س. ۱۳۸۲. پیش‌بینی احتمالات وقوع خشکسالی در استان خراسان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۳: ۱۱۹-۱۲۸.

(۲) بذرافشان، ج. ۱۳۸۱. مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

(۳) رجیبی، م.، مرادی، ح.، فرج‌زاده، م. و بذرافشان، ج. ۱۳۸۶. شبیه‌سازی رفتار احتمالی سری زمانی شاخص بارش استاندارد (SPI) با مدل زنجیره مارکف برای هشدار خشکسالی‌های استان فارس. نشریه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۶۰ (۴): ۱۱۵۷-۱۱۷۰.

(۴) رضیئی، ط.، دانش‌کارآراسته، پ.، اختری، ر. و تقفیان، ب. ۱۳۸۶. بررسی خشکسالی‌های هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۳ (۱): ۲۵-۳۵.

(۵) علیزاده، ا. ۱۳۷۴. اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ هفتم). انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۶۳۴ ص.

(۶) یوسفی، ن.، حجام، س. و ایران‌نژاد، پ. ۱۳۸۶. برآورد احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از زنجیره مارکف و توزیع نرمال (مطالعه موردی: قزوین). نشریه پژوهش‌های جغرافیایی، ۶: ۱۲۱-۱۲۸.

- Water Resources Association. 33: 1375-1386.
- 16) Lohani, V. K., Loganathan, G. V. and Mostaghimi, S. 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by Palmer Drought Severity Index. *Nordic Hydrology* 29 (1): 21-40.
 - 17) McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA.* 179- 184.
 - 18) Narendra, B. H., 2008. Drought monitoring using rainfall data and spatial soil moisture modeling. MSc Thesis, Faculty of Geography, Gadjah Mada University.
 - 19) Paulo, A. A. and Pereira, L. S. 2007. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resources Management*, 21 (10): 1813-1827.
 - 20) Smakhtin, V. U. 2001. Low-flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 240: 147-186.
 - 21) Smakhtin, V. U. and Hughes, D. A. 2004. Review, automated estimation and analysis of drought indices in South Asia. Working Paper 83, International Water Management Institute, Sri Lanka.
 - 22) Steinmann, A. 2003. Drought indication and triggers: A stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 39(5): 1217-1233.
 - 23) Wilhite, D. A., Glantz, M. H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10 (3): 111-120.
 - 24) Wilks, D. S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Third edition, Elsevier Inc., pp. 676.
 - 25) Pabitra Banik, P., Mandal, A., and Sayedur Rahman, M. 2002. Markov chain analysis of weekly rainfall data in determining drought-proneness. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 7 (4):231-239.
 - 7) Barua, S. 2010. Drought Assessment and Forecasting Using a Nonlinear Aggregated Drought Index. Ph.D. Thesis, School of Engineering and Science Faculty of Health, Engineering and Science Victoria University, Australia.
 - 8) Cinlar, E. 1975. *Introduction to stochastic processes*. Prentice-Hall, New Jersey, pp. 402.
 - 9) Campbell, E. P., and Bates, B. C. 2001. Regionalization of rainfall-runoff model parameters using Markov Chain Monte Carlo samples. *Water Resources Research*, 37 (3): 731-739.
 - 10) Crystal Ng, G. H. 2003. Probabilistic estimation and prediction of groundwater recharge in a semi-arid environment. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
 - 11) Dai, A. 2010. Drought under global warming: a review. John Wiley & Sons, Ltd. *WIREs Clim Change*, DOI: 10.1002/wcc. 81.
 - 12) Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A. and Vanyarkho, O. V., 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80 (3): 429- 437.
 - 13) Keyantash, J. A. and Dracup, J. A. 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40 (W09304), DOI: 10.1029/2003WR002610.
 - 14) Liu, X., Ren, L., Yuan, F., Yang, B., and Nanjing, P. R. 2009. Meteorological drought forecasting using Markov Chain model. In 11th International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Chania, Crete, Greece, 23-26.
 - 15) Lohani, V. K. and Loganathan, G. V. 1997. An early warning system for drought management using the Palmer drought index. *Journal of American*