

پایش و پیش بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف

محمد مهدی مقیمی^{۱*}، الهام کوهی^۲ و عبدالرسول زارعی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۹

چکیده

آگاهی از وضعیت خشکسالی خطر زیان‌های ناشی از این پدیده را تا حد شایان توجهی کاهش می‌دهد. در این مطالعه که در استان فارس انجام شد، به منظور بررسی خشکسالی، از آمار ماهانه ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان در دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۹۰) استفاده شد. شاخص مورد استفاده جهت پایش خشکسالی، RDI^۴ یک ماهه بود و مدل زنجیره مارکوف به منظور پیش بینی وضعیت خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت. شدت حالت‌های مختلف خشکسالی و وقوع حالت‌های مورد انتظار (پیش‌بینی) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه این بررسی نشان داد که احتمال انتقال به حالت نرمال بیشتر از دیگر حالت‌ها می‌باشد. همچنین احتمال تعادل دوره های خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید، خشکسالی متوسط، نرمال، ترسالی متوسط، ترسالی شدید و ترسالی خیلی شدید در استان فارس به ترتیب ۳/۳۷، ۸/۸۸، ۸/۳۳، ۶۳/۲، ۱۵/۶۸، ۰/۶ و ۰/۰ درصد به دست آمد که در بیشتر مواقع (درازمدت)، منطقه از نظر اقلیمی در حالت نرمال قرار دارد. احتمال تعادل دوره های مذکور خشکسالی در مرحله پیش بینی به ترتیب ۳/۹۵، ۱۰/۴۶، ۱۰/۶۸، ۵۵/۵۱، ۱۸/۳۷، ۱/۰۰ و ۰/۰۰ درصد به دست آمد. به طور کلی در سطح استان، درصد فراوانی وقوع کلاس های پیش بینی شده خشک نسبت به کلاس های مرطوب بیشتر است که بیانگر این است که خشکسالی کماکان در سطح استان فارس ادامه دارد. بیشترین فراوانی وقوع کلاسهای خشک در ایستگاه ایزدخواست (۳۱/۵ درصد) و کمترین آن در ایستگاه شیراز (۲۰ درصد) به دست آمد.

واژه های کلیدی: استان فارس، پایش خشکسالی، پیش بینی خشکسالی، شاخص RDI، زنجیره مارکوف.

^۱ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، ایران. * (نویسنده مسئول) moghimi@fasau.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، ایران.

^۳ استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، ایران.

^۴ Reconnaissance Drought Index

SPI انجام شده است (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶، Zamani et al., 2013، حنفی و همکاران، ۱۳۹۱ و شکرکی کوچک و بهنیا، ۱۳۹۲)؛ اما در این زمینه استفاده از شاخص RDI کمتر مشاهده شده است. یکی از علت‌های کاربرد کم شاخص RDI در این زمینه، در مقایسه با شاخص‌های دیگر پایش خشکسالی، نیاز به اطلاعات بیشتر برای محاسبه این شاخص از جمله اطلاعات مربوط به محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در منطقه مورد مطالعه است. این در حالیست که استفاده از این شاخص در پایش و پیش‌بینی خشکسالی منجر به نتایج واقعی تری خواهد شد.

هدف از این مطالعه پایش و سپس پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس به عنوان یکی از استان‌های به شدت آسیب‌پذیر با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و شاخص خشکسالی RDI می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در استان فارس و با استفاده از داده‌های ماهانه ۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) انجام شد. مشخصات و اطلاعات جغرافیایی مربوط به این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است. طبق میانگین آمارهای ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس، متوسط دما ۱۸/۸ درجه سانتی‌گراد و مقدار بارندگی ۳۰۶/۸ میلی‌متر است. شکل ۱ پهنه‌بندی اقلیمی استان فارس به روش دمارتن^۲ را نشان می‌دهد که بیانگر خشک و نیمه خشک بودن اقلیم استان است.

مقدمه

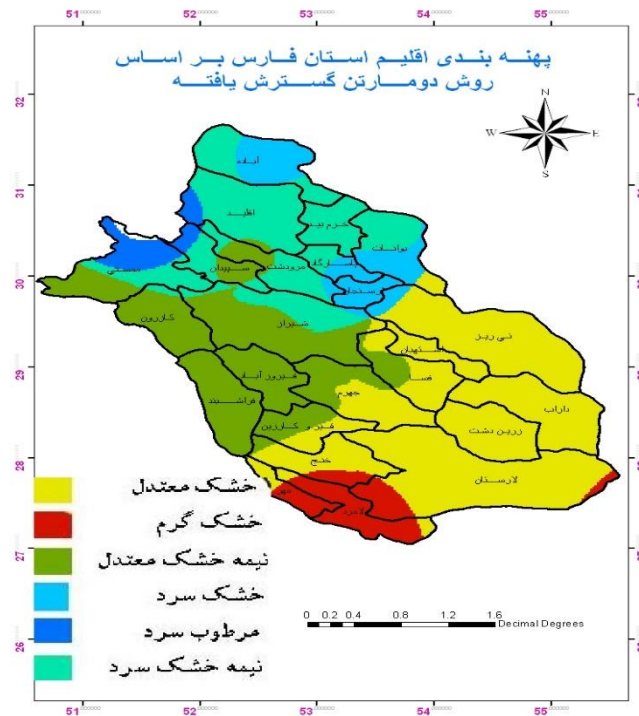
پدیده خشکسالی می‌تواند توسط شاخص‌های خشکسالی بررسی شده و ویژگی‌های آن به صورت عددی محاسبه شود. این شاخص‌ها خصوصیات خشکسالی را به صورت مقدار، مدت، شدت و الگوی مکانی شناسایی می‌کنند. در این مطالعه، از شاخص خشکسالی RDI استفاده شده است. RDI شاخصی جدید است که اولین بار توسط تیساکریس و همکاران در دانشگاه فنی ملی آتن معرفی شد (Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007). در محاسبه این شاخص، از تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) در مقیاس‌های زمانی متفاوت (۳، ۶ و ۱۲ ماهه) در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. یکی از مزایای استفاده از شاخص RDI در مقایسه با دیگر شاخص‌ها، حساسیت بیشتر آن نسبت به خشکسالی است.

به موازات توسعه شاخص‌های خشکسالی، محققین، علاقمند به پیش‌بینی ویژگی‌های خشکسالی و زمان وقوع و روند آن هستند. یکی از روش‌های معمول در پیش‌بینی خشکسالی، استفاده از زنجیره مارکوف است (Lohani et al., 1998; Ochola and Kerkidis, 2003; Steineman, 2003; Nalbantis and Tsakiris, 2009; Banimahd and Khalili, 2013). در تحقیق Paulo and Pereira (2006 & 2007)، جزئیات کاربرد زنجیره مارکوف به منظور پیش‌بینی ویژگی‌های خشکسالی را با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI_1) ارائه کردند. Khalili et al. (2011)، در مطالعه‌ای جهت بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های دو شاخص RDI و SPI، با استفاده از زنجیره مارکوف تحلیل مقایسه‌ای انجام دادند. در این تحقیق زمان ماندگاری در کلاس‌های مختلف خشکسالی و مدت زمان تا رسیدن به کلاس "نزدیک نرمال" بررسی گردید. نتایج نشان داد که شاخص RDI به دلیل استفاده از تبخیر و تعرق، به تغییرات آب و هوایی بسیار حساس‌تر است.

تاکنون مطالعات زیادی در پیش‌بینی ویژگی‌های خشکسالی توسط زنجیره مارکوف، با استفاده از شاخص

² De Martonne Method

¹ Standardized Precipitation Index



شکل ۱- پهنه بندی اقلیمی استان فارس

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	سال شروع آمار	حداکثر بارش روزانه
آباده	۵۲/۴۰	۳۱/۱۱	۲۰۳۰	۱۳۵۶	۵۸/۶
اقلید	۵۲/۳۸	۳۰/۵۴	۲۳۰۰	۱۳۷۸	۱۰۵
ایزدخواست	۵۲/۷	۳۱/۳۲	۲۱۸۸	۱۳۷۷	۵۵
داراب	۵۴/۱۷	۲۸/۴۷	۱۰۹۸	۱۳۷۳	۶۸/۲
درودزن	۵۲/۱۷	۳۰/۱۱	۱۰۶۵	۱۳۶۵	۱۲۶/۵
زرقان	۵۲/۴۳	۲۹/۴۷	۱۵۹۶	۱۳۶۵	۱۰۹
شیراز	۵۲/۳۶	۲۹/۳۲	۱۴۸۴	۱۳۵۰	۱۰۰/۴
فسا	۵۳/۴۱	۲۸/۵۸	۱۲۸۸	۱۳۵۳	۱۵۲/۸
لار	۵۴/۱۷	۲۷/۴۲	۷۹۲	۱۳۶۸	۱۰۶/۷
لامرد	۵۳/۱۲	۲۷/۲۲	۴۰۵	۱۳۷۲	۸۷/۶

انتخاب ماه‌های بارانی

از آنجایی که شرایط اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه، خشک و نیمه خشک است، ممکن است چندین ماه از سال، مقدار بارندگی حداقل یا صفر باشد. اگر ماه‌های غیر بارانی در محاسبات وارد شود منجر به تخمین غیر واقع بینانه دوره های مرطوب خواهد شد (Khalili et al., 2011). با توجه به اینکه در استان

محاسبات این مطالعه در ۳ مرحله انجام شد. در مرحله اول، ماه‌های بارانی در طول دوره آماری مورد استفاده انتخاب گردید. در مرحله دوم، با محاسبه شاخص RDI ماهانه پایش خشکسالی انجام شد و در مرحله سوم، کلاس های خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکوف پیش بینی گردید.

P_{ij} و PET_{ij} - به ترتیب بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل ماه زام از سال هیدرولوژیکی i ام،
 N - تعداد کل سال‌های مربوط به داده‌های در دسترس
 لازم به ذکر است که سال هیدرولوژیکی در ایران از ماه مهر آغاز می‌شود.
 در مرحله بعد RDI_n با استفاده از معادله زیر برای هر سال محاسبه گردید:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_k^{(i)}}{\alpha_k} - 1 \quad (2)$$

که در آن :

$\bar{\alpha}_k =$ میانگین هندسی مقادیر α_k در طول n سال است.

مرحله سوم، محاسبه RDI_{st} است که با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{y_k}} \quad (3)$$

که در آن y_k^i ، برابر با $\ln(\alpha_k^{(i)})$ ؛ \bar{y}_k ، برابر با میانگین هندسی y_k و $\hat{\sigma}_{y_k}$ برابر با انحراف معیار y_k می‌باشد.
 پس از محاسبه شاخص RDI ، با استفاده از کلاس-بندی پیشنهادی در جدول ۱ به تهیه نقشه آسیب-پذیری به خشکسالی بر مبنای RDI پرداخته شد.
 مقادیر طبقه‌های مختلف خشکسالی در شاخص RDI به صورت جدول ۱ است.

فارس در برخی از ماه‌ها بارندگی صفر یا نزدیک به صفر است، بنابراین قبل از شروع محاسبات باید ابتدا با انتخاب ماه‌های بارانی، ماه‌های غیر بارانی را که فاقد سهم لازم در تحلیل خشکسالی هستند از سری داده-های هریک از ایستگاه‌ها، حذف کرد. حذف ماه‌های غیر بارانی منجر به یک تخمین واقع بینانه از وضعیت خشکسالی می‌شود. برای انتخاب ماه‌های بارانی از روش باکس پلات که توسط Tokkey, 1977 معرفی شده است، استفاده شد. این روش نحوه توزیع داده‌ها را در اطراف میانه به نمایش می‌گذارد. این روش در تحقیقات Abolverdi and Khalili, 2011 و Tabrizi et al., 2010 نیز استفاده شده است.

پایش خشکسالی

در این پژوهش از شاخص خشکسالی RDI استفاده شد که در سه مرحله به شرح زیر محاسبه گردید:
 در مرحله اول مقدار اولیه RDI یا α_0 محاسبه شد. ممکن است مقدار اولیه برای هر ماه، فصل یا یک سال هیدرولوژیکی محاسبه شود. مقدار α_0 با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود :

$$\alpha_k^i = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i = 1 \text{ to } N \quad (1)$$

که در آن :

جدول (۱) : طبقه بندی کلاس خشکسالی یا استفاده از شاخص خشکسالی RDI (Zarei et al., 2016)

شماره کلاس	نماد کلاس	مقدار شاخص RDI	کلاس خشکسالی
۱	EW	$RDI \geq 2$	ترسالی بسیار شدید
۲	VW	$1/5 < RDI < 1/99$	ترسالی شدید
۳	MW	$1 < RDI < 1/49$	ترسالی متوسط
۴	N	$-0/99 < RDI < 0/99$	نرمال
۵	MD	$-1/49 < RDI < -1$	خشکسالی متوسط
۶	VD	$-1/99 < RDI < -1/5$	خشکسالی شدید
۷	ED	$RDI \leq -2$	خشکسالی بسیار شدید

پیش‌بینی خشکسالی

فرایند مارکوف و زنجیره‌های مارکوف

معمولاً در بسیاری از مدل‌های منابع آب فرض می‌شود که فرایند تصادفی $X(t)$ یک فرایند مارکوف است. در یک فرایند مارکوف، مقادیر زمان (مرحله) $t+1$ (Stage) یک فرایند، تنها به مقادیر زمان t آن فرایند وابسته است (شریفی و شهیدی پور، ۱۳۸۰).

برای تعریف دقیق فرایند مارکوف خواهیم داشت: برای زمان‌های $0, 1, 2, 3, \dots, n$ فرض کنید $\{X(n)\}$ یک فرایند تصادفی و $\{S(n)\}$ مجموعه دلخواهی از حالت‌های فرایند را نشان می‌دهند، گفته می‌شود فرایند در ویژگی مارکوف صدق می‌کند، اگر برای $0, 1, 2, 3, \dots, n$ تابع زیر برقرار باشد:

$$P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n), X(n-1) = S(n-1), \dots, X(0) = S(0)] = P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n)] \quad (4)$$

احتمال تغییر وضعیت k مرحله‌ای زنجیره مارکوف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_n^k(i \rightarrow j) = P[X(n+k) = j | X(n) = i] \quad (5)$$

این احتمال تغییر وضعیت، برابر احتمال بودن در حالت j ام، k دوره زمانی پس از بودن در حالت i ام با آغاز از زمان n است. در این تحقیق از تغییر وضعیت یک مرحله‌ای زنجیره مارکوف استفاده شد. احتمال تغییر وضعیت یک مرحله‌ای برابر احتمال شرطی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_n(i \rightarrow j) = P[X(n+1) = j | X(n) = i] \quad (6)$$

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

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (7)$$

این احتمالات در قالب یک ماتریس ارائه می‌شوند که به ماتریس تغییر وضعیت زنجیره مارکوف مشهور است. در یک ماتریس تغییر وضعیت یک مرحله‌ای ردیف‌ها، معرف حالت i و ستون‌ها، معرف حالت j هستند. لازم به ذکر است که احتمال‌های تغییر وضعیت k مرحله‌ای با به توان k رساندن ماتریس تغییر وضعیت یک مرحله‌ای به دست می‌آید. آرایه‌های ماتریس تغییر وضعیت $(P_{ij}(t))$ زنجیره مارکوف به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{ij}(t) = P[X(t) = j | X(t-1) = i] \\ = \frac{\text{تعداد حالت‌هایی که } X(t) = i \text{ به شرطی که } X(t-1) = j}{\text{تعداد حالت‌هایی که } X(t-1) = i} \quad (8)$$

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی کلاس‌های خشکسالی، ماتریس تغییر وضعیت یک مرحله‌ای زنجیره مارکوف هفت حالتی (کلاس‌های خشکسالی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ طبق جدول ۱) به کار می‌رود. بنابراین یک ماتریس 7×7 وجود خواهد داشت (جدول ۲). بدین ترتیب که با توجه به کل حالت‌های در نظر گرفته شده (خشکسالی خیلی شدید (ED^۱)، خشکسالی شدید (VD^۲)، خشکسالی متوسط (MD^۳)، نرمال (N^۴)، ترسالی متوسط (MW^۵)، ترسالی شدید (VW^۶)، ترسالی خیلی شدید (EW^۷))، وضعیت خشکسالی در گام بعدی می‌تواند با درصدی از احتمال هر یک از حالت‌های فوق باشد. احتمال یاد شده، احتمال انتقال نامیده شده و در صورت استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه اول و با توجه به وضعیت موجود به صورت یک احتمال شرطی برآورد می‌گردد.

¹ Extremely drought

² Very drought

³ Moderately drought

⁴ Normal

⁵ Moderately wet

⁶ Very wet

⁷ Extremely wet

جدول ۲- ماتریس احتمال تغییر وضعیت (احتمال انتقال) از یک کلاس خشکسالی به کلاس دیگر در سری داده

وضعیت کنونی	وضعیت آینده						
	ED	SD	MD	N	MW	VW	EW
ED	$P(ED ED)$	$P(ED SD)$	$P(ED MD)$	$P(ED N)$	$P(ED MW)$	$P(ED VW)$	$P(ED EW)$
SD	$P(SD ED)$	$P(SD SD)$	$P(SD MD)$	$P(SD N)$	$P(SD MW)$	$P(SD VW)$	$P(SD EW)$
MD	$P(MD ED)$	$P(MD SD)$	$P(MD MD)$	$P(MD N)$	$P(MD MW)$	$P(MD VW)$	$P(MD EW)$
N	$P(N ED)$	$P(N SD)$	$P(N MD)$	$P(N N)$	$P(N MW)$	$P(N VW)$	$P(N EW)$
MW	$P(MW ED)$	$P(MW SD)$	$P(MW MD)$	$P(MW N)$	$P(MW MW)$	$P(MW VW)$	$P(MW EW)$
VW	$P(VW ED)$	$P(VW SD)$	$P(VW MD)$	$P(VW N)$	$P(VW MW)$	$P(VW VW)$	$P(VW EW)$
EW	$P(EW ED)$	$P(EW SD)$	$P(EW MD)$	$P(EW N)$	$P(EW MW)$	$P(EW VW)$	$P(EW EW)$

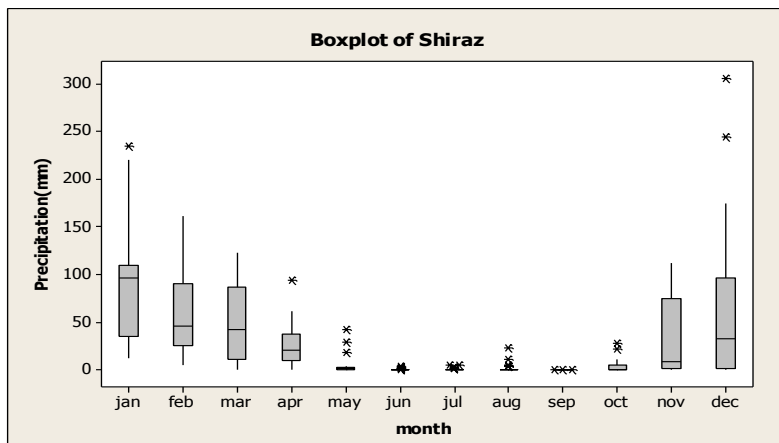
نتایج و بحث

انتخاب ماه‌های بارانی

یک باکس پلات نحوه توزیع داده‌ها را در اطراف میانه به نمایش می‌گذارد. به طور مثال شکل ۲، باکس پلات داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه شیراز را نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی مدل زنجیره مارکوف، با استفاده از داده‌های دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹، کلاس‌های خشکسالی در مدت زمان ۵ سال بعد (۲۰۱۰-۲۰۱۴) پیش‌بینی شد و سپس با مقایسه داده‌های واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده، میزان دقت و صحت پیش‌بینی بررسی شد.



شکل ۲- نتایج مربوط به انتخاب ماه‌های بارانی با استفاده از روش باکس پلات در ایستگاه شیراز

که مقدار بارندگی صفر یا خیلی نزدیک به صفر است که در تجزیه و تحلیل‌های خشکسالی در ایستگاه شیراز در نظر گرفته نشده است. این روش برای تمام ایستگاه‌ها اعمال شد.

همانطور که در شکل ۲ مشخص است، در برخی از ماه‌ها عدد میانه (خط افقی داخل باکس‌ها) نزدیک به صفر هستند که به عنوان ماه‌های غیر بارانی در نظر گرفته می‌شوند. ماه‌هایی که در آنها عدد مربوط به میانه بیشتر از صفر است در تجزیه و تحلیل خشکسالی مناسب هستند و به عنوان ماه‌های بارانی انتخاب می‌شوند. با توجه به شکل ۲، بازه زمانی از ماه می تا اکتبر

پایش خشکسالی

افزار SPSS 16 کلاس‌های خشکسالی، به صورتی که در جدول ۱ تعریف شده‌است، برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد. در مرحله بعد، اقدام به تشکیل ماتریس-های احتمال انتقال (تغییر وضعیت) گردید (جدول ۳).

در این تحقیق، ابتدا شاخص RDI یک ماهه برای ایستگاه‌های مورد بررسی در نرم افزار اکسل محاسبه گردید. پس از محاسبه شاخص RDI، با استفاده از نرم-

جدول ۳- ماتریس احتمال انتقال (%) کلاس‌های مختلف خشکسالی در سری داده‌های ایستگاه‌های آباده(الف) و

ایزدخواست(ب)

حالت	MW	N	MD	VD
MW	۰/۲۷۳	۰/۶۹۷	۰	۰/۰۳
N	۰/۱۵۴	۰/۶۱۸	۰/۰۹۸	۰/۱۳
MD	۰/۰۵۶	۰/۶۱۱	۰/۰۵۶	۰/۲۷۸
VD	۰/۱۶	۰/۵۲	۰/۲	۰/۱۲

(الف)

حالت	MW	N	MD	ED	VD
MW	۰/۱۱۱	۰/۸۳۳	۰	۰/۰۵۶	۰
N	۰/۰۹۲	۰/۷۱۴	۰/۰۶۷	۰/۰۴۲	۰/۰۸۴
MD	۰/۲۱۴	۰/۴۲۹	۰/۲۸۶	۰/۰۷۱	۰
ED	۰/۱۱۱	۰/۶۶۷	۰	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
VD	۰/۰۷۷	۰/۵۳۸	۰/۱۵۴	۰/۰۷۷	۰/۱۵۴

(ب)

این نتیجه مشاهده شد که احتمال انتقال به وضعیت خشکسالی بسیار شدید، بعد از حالت نرمال احتمال وقوع بالایی دارد.

همچنین احتمال وقوع در ایستگاه‌های مورد مطالعه برای حالت‌های هفت‌گانه محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ احتمال انتقال زنجیره مارکوف را برای شاخص RDI ماهانه در ایستگاه‌های آباده و ایزدخواست را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌شود، احتمال انتقال به حالت نرمال بیشتر از دیگر حالت‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در برخی از ایستگاه‌ها همچون شیراز، لار، فسا، داراب، اقلید و آباده

جدول ۴- درصد فراوانی وقوع کلاس‌های مختلف خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	ED	VD	MD	N	MW	VW	EW
آباده	-	۱۲/۶	۹	۶۱/۸	۱۶/۶	-	-
داراب	-	۱۳/۴	۸/۱	۵۹/۷	۱۸/۸	-	-
درودزن	۹/۴	۳/۴	۴	۶۸/۵	۱۴/۸	-	-
اقلید	-	۱۶/۶	۶	۶۱/۸	۱۵/۶	-	-
ایزدخواست	۷/۵	۵/۲	۸/۱	۶۸/۸	۱۰/۴	-	-
فسا	-	۱۴/۱	۸/۱	۵۷/۷	۲۰/۱	-	-
لامرد	-	۱۶/۱	۴	۵۸/۴	۲۱/۵	-	-
لار	-	-	۲۴/۶	۵۲/۳	۱۷/۶	۵/۵	-
شیراز	۸/۷	۲/۷	۵/۴	۷۲/۵	۱۰/۷	-	-
زرقان	۸/۱	۴/۷	۶	۷۰/۵	۱۰/۷	-	-

قرار دارد. در حالی که حالت‌های MD، VD نیز درصدهایی نزدیک به یکدیگر دارند.

اعتبارسنجی مدل

نتایج اعتبارسنجی کلاس‌های خشکسالی ماهانه پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، به صورت اختلاف داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده آورده شده است (جدول ۵).

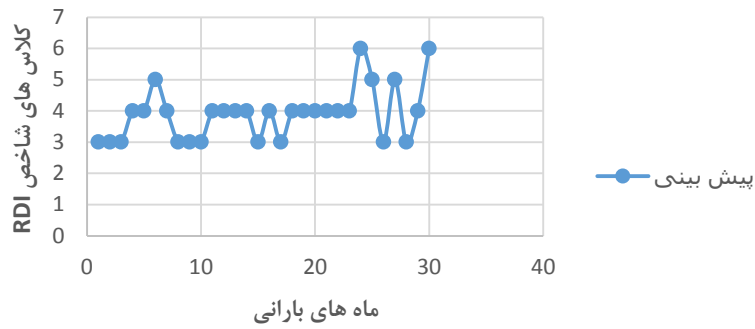
نتایج جدول ۴ بیانگر آن است که هر ایستگاه در درازمدت، به‌طور متوسط چند درصد از زمان را در یک حالت معین باقی مانده است. این جدول نشان می‌دهد که احتمال تعادل دوره‌های ED، VD، MD، N، MW، VW در استان فارس به ترتیب ۳/۳۷، ۸/۸۸، ۸/۳۳، ۶۳/۲، ۱۵/۶۸ و ۰/۶ درصد است که در بیشتر مواقع (درازمدت)، منطقه از نظر اقلیمی در حالت نرمال

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی استفاده از زنجیره مارکف جهت پیش‌بینی کلاس‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی

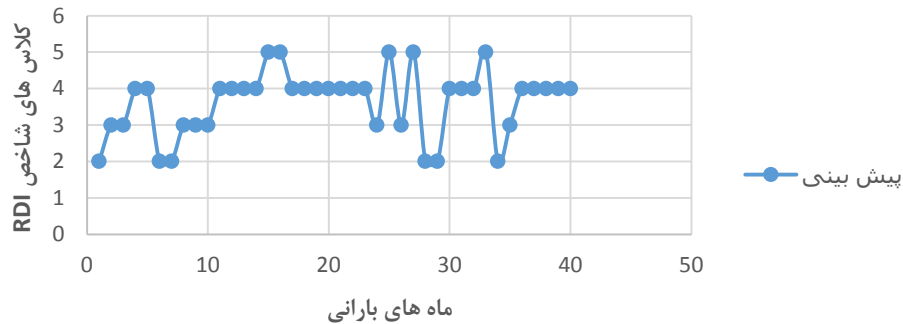
سطح دقت پیش‌بینی انجام شده (اعشار)					
نام ایستگاه‌ها	کلاس مساوی	یک کلاس اختلاف	دو کلاس اختلاف	سه کلاس اختلاف	مجموع کلاس مساوی و یک کلاس اختلاف
آباده	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۱	-	۰/۹
اقلید	۰/۵	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۸۵
ایزدخواست	۰/۶۶	۰/۲	۰/۱۴	-	۰/۸۶
داراب	۰/۴۳	۰/۴	۰/۱۷	-	۰/۸۳
درودزن	۰/۵	۰/۲۷	۰/۰۷	۰/۱۷	۰/۷۷
زرقان	۰/۵۳	۰/۳	۰/۰۷	۰/۱	۰/۸۳
شیراز	۰/۶۷	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۷۳
فسا	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۱	-	۰/۹
لار	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۸
لامرد	۰/۳۷	۰/۵	۰/۱	۰/۰۳	۰/۸۷

ها بیانگر این است که دقت پیش‌بینی در سطحی مناسب و قابل قبول است. نتایج پیش‌بینی کلاس‌های شاخص خشکسالی RDI ماه‌های بارانی به مدت ۵ سال به صورت نمودار رسم شده است (شکل ۴). نتایج مربوط به ایستگاه‌های فسا و لار به عنوان نمونه آورده شده است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مختلف، سطح دقت بدون اختلاف و یک اختلاف‌ها بیشتر است و به علت اینکه تفاوت یک اختلاف، چندان اهمیت ندارد، بنابراین به منظور بررسی اعتبار از مجموع بدون اختلاف‌ها و یک اختلاف‌ها استفاده شد. این بررسی نشان داد که پیش‌بینی در ایستگاه‌های آباده و فسا با دقت ۹۰ درصد و سطح دقت دیگر ایستگاه‌ها از ۷۶/۷ تا ۸۶/۷ متغیر است و بالا بودن سطح دقت همه ایستگاه-



(الف)



(ب)

شکل ۴- روند تغییرات کلاس های پیش بینی شده در ایستگاه های (الف) فسا (ب) لار

بررسی فراوانی وقوع حالت های ED، VD، MD، N، VW، MW مورد انتظار (پیش بینی شده) برای ایستگاه های مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۵).

پیش بینی خشکسالی

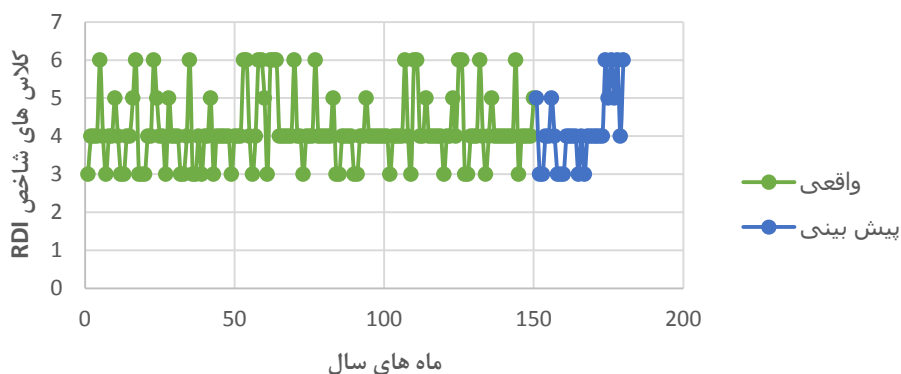
در این مرحله پیش بینی کلاس های وضعیت خشکسالی ماهانه برای ۵ سال (ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۰) با استفاده از نرم افزار R انجام شد. در این

جدول ۵- فراوانی وقوع کلاس های مختلف خشکسالی ماهانه در داده های پیش بینی شده در ایستگاه های مورد بررسی (%).

نام ایستگاه	درصد فراوانی وقوع کلاس های پیش بینی شده خشکسالی								
	ED	VD	MD	N	MW	VW	EW	مجموع درصد کلاس های خشک	مجموع درصد کلاس های مرطوب
آباده	-	۱۷/۵	۵	۶۰	۱۷/۵	-	-	۲۲/۵	۱۷/۵
داراب	-	۱۳/۳	۱۳/۳	۵۰	۲۳/۳	-	-	۲۶/۶	۲۳/۳
درودزن	۱۳/۳	۱۰	-	۵۳/۳	۲۳/۳	-	-	۲۳/۳	۲۳/۳
اقلید	-	۱۷/۵	۷/۵	۶۰	۱۵	-	-	۲۵	۱۵
ایزدخواست	۲/۹	۵/۷	۲۲/۹	۵۷/۱	۱۱/۴	-	-	۳۱/۵	۱۱/۴
فسا	-	۱۱/۴	۱۱/۴	۵۱/۴	۲۵/۷	-	-	۲۲/۸	۲۵/۷
لامرد	-	۲۰	۱۰	۵۰	۲۰	-	-	۳۰	۲۰
لار	-	-	-	۴۵	۲۲/۵	۱۰	-	۲۲/۵	۳۲/۵
شیراز	۱۰	۲/۵	۷/۵	۶۵	۱۵	-	-	۲۰	۱۵
زرقان	۱۳/۳	۶/۷	۶/۷	۶۳/۳	۱۰	-	-	۲۶/۷	۱۰

بیشتر است که بیانگر این است که خشکسالی کماکان در سطح استان فارس ادامه دارد. بیشترین فراوانی وقوع کلاسهای خشک در ایستگاه ایزدخواست (۳۱/۵ درصد) و کمترین آن در ایستگاه شیراز (۲۰ درصد) بوده است. همچنین بیشترین فراوانی وقوع کلاسهای مرطوب در ایستگاه لار (۳۲/۵ درصد) و کمترین آن در ایستگاه زرقان (۱۰ درصد) بوده است. نتایج حاصل از پیش-بینی‌ها در شکل ۳ آورده شده است. نتایج مربوط به ایستگاه‌های داراب و درودزن به عنوان نمونه آورده شده است.

داده های جدول ۵ نشان می‌دهد بیشترین فراوانی وقوع در تمامی ایستگاهها مربوط به حالت نرمال و کمترین فراوانی وقوع مربوط به حالت بسیار مرطوب (درصد فراوانی وقوع صفر برای همه ایستگاهها) می باشد. احتمال تعادل دوره های ED، VD، MD، N، MW، VW و EW در استان فارس به ترتیب ۳/۹۵، ۱۰/۴۶، ۱۰/۶۸، ۵۵/۵۱، ۱۸/۳۷، ۱/۰۰ و ۰/۰۰ درصد است که در بیشتر مواقع (درازمدت)، منطقه از نظر اقلیمی در حالت نرمال قرار دارد. به طور کلی در همه ایستگاهها به جز ایستگاههای لار و فسا، درصد فراوانی وقوع کلاس های خشک نسبت به کلاس های مرطوب



(الف)



(ب)

شکل ۳- تغییرات کلاس های مختلف خشکسالی ماهانه (بر اساس داده های واقعی و پیش بینی شده) در ایستگاه های داراب(الف) و درودزن(ب)

شدید، ترسالی متوسط، نرمال، خشکسالی متوسط، خشکسالی شدید و خشکسالی بسیار شدید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که احتمال انتقال به حالت نرمال بیشتر از دیگر حالتها می باشد که مؤید نتایج تحقیق رضیئی و همکاران

نتیجه گیری

در این تحقیق بر مبنای استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف با یک گام زمانی، احتمال گذر و ماندگاری از یک کلاس خشکسالی به کلاس دیگر در هفت حالت ترسالی بسیار شدید، ترسالی

بهترین زمان برنامه‌ریزی برای خشکسالی در طول سال‌های غیر خشکسالی می‌باشد، نتایج این بررسی می‌تواند در ایجاد استراتژی مدیریت پیشگیری از خسارت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود به عنوان بخشی از عوامل ایجاد و تشدید بحران آب کاربرد داشته باشد. بنابراین پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند در مدیریت درست بحران و کنترل خسارات ناشی از آن موثر باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مسئولان و کارشناسان سازمان هواشناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های اقلیمی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

(۱۳۸۶) و حنفی و همکاران (۱۳۹۱) که به ترتیب در استان‌های سیستان و بلوچستان و تهران انجام شده می‌باشد. لازم به ذکر است که در برخی از ایستگاه‌های شیراز، لار، فسا، داراب، اقلید و آباده احتمال انتقال به وضعیت خشکسالی بسیار شدید، بعد از حالت نرمال احتمال وقوع بالایی دارد. بررسی ماتریس ایستای ایستگاه‌ها نشان داد که هر ایستگاه در درازمدت، به‌طور متوسط چند درصد از زمان را در یک حالت معین باقی می‌ماند. این جدول نشان می‌دهد که احتمال تعادل دوره های ED، VD، MD، N، MW، VW و EW به ترتیب ۸/۴۳، ۹/۸۷، ۸/۳۳، ۶۳/۲ و ۱۵/۶۸ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع (درازمدت)، منطقه از نظر اقلیمی در حالت نرمال قرار دارد. در حالی که حالت‌های ED، VD، MD نیز درصدهایی نزدیک به یکدیگر دارند. با توجه به اینکه

منابع

- رضیعی، ط، پ. دانشکار آراسته، ر. الف. اختری و ب. ثقفیان. ۱۳۸۶. بررسی خشکسالی هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکوف. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۱): ۲۵-۳۵.
- شکری کوچک، س. و بهنیا، ع. ۱۳۹۲. پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و زنجیره مارکوف. مجله علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۳۶(۳): ۱-۱۲.
- حنفی، ع. ف. خوش اخلاق و م. سلطانی. ۱۳۹۱. تحلیل خشکسالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش‌بینی آن بر اساس مدل زنجیره مارکوف. جغرافیا و پایداری محیط، ۳: ۸۷-۱۰۰.
- شریفی، م. م. شهیدی پور. ۱۳۸۰. تحلیل سیستم‌های منابع آب. ترجمه. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۷۱۶ص.
- Banimahd, S. A. and D. Khalili. 2013. Factors influencing Markov Chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management*, 27(11): 3911- 3928.
- Khalili, D., T. Farnoud, H. Jamshidi, A. A. Kamgar-Haghighi and Sh. Zand-Parsa. 2011. Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, 25: 1737- 1757.
- Paulo, A. A. and L. S. Pereira. 2006. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resources Management*, 21:1813-1827.
- Paulo, A. A. and L. S. Pereira. 2007. Stochastic prediction of SPI drought class transition. *Water Resources Management*, 22:1277-1527.
- Raziei T. B., A. A. Saghafian Paulo, L. S. Pereira and I. Bordi. 2009. Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran. *Water Resources Management*, 23:439-455.
- Tsakiris G. and H. Vangelis. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, (9/10): 3-11.
- Tsakiris G., D. Pangalou and H. Vangelis. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5):821-833.
- Lohani V. K. and G. V. Loganathan. 1997. An early warning system for drought management using the Palmer drought index. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(6):1376-1386.

- Lohani V. K., G. V. Loganathan and S. Mostaghimi. 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by the Palmer drought index. *Nordic Hydrology*, 29(1):21–40.
- Ochola W. O. and P. Kerkides. 2003. A Markov chain simulation model for predicting critical wet and dry spells in Kenya. Analysing rainfall events in the Kano plains. *Irrigation and Drainage*, 52(4):327–342.
- Steinman A. 2003. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5):1217–1233.
- Nalbantis I. and G. Tsakiris. 2009. Assessment of hydrological droughts revisited. *Water Resources Management*, 23: 881-897.
- Tabrizi A. A., D. Khalili, A. A. Kamgar-Haghighi and Sh. Zand-Parsa. 2010. Utilization of time-based meteorological droughts to investigate occurrence of streamflow droughts. *Water Resources Management*, 24:4287–4306.
- Abolverdi J. and D. Khalili. 2010. Probability analysis of extreme regional meteorological droughts by L-moments in a semi-arid environment. *Theoretical and Applied Climatology*, 102: 351–366.
- Tukey J. W. 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley, Reading.
- Zamani, A. M. R., M. Monadi and H. Zarei. 2013. Using a first order Markov chain model and SPI index to forecasting, monitoring and zoning of meteorological drought, case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. *Journal of Environmental Research and Development*, 8 (2): 316-324.
- Zarei, A. R., Moghimi, M. M. and M. R. Mahmoudi. 2016. Analysis of changes in spatial pattern of drought using RDI index in south of Iran. *Water Resources Management*, 30 (11): 3723–3743.

Drought monitoring and forecasting, using RDI index and Markov Chain mathematical model

Mohammad Mehdi Moghimi^{1*}, Elham Koochi², Abdol Rassoul Zarei³

Abstract

Knowledge about drought, is the most important prerequisite to reduce risk of drought damage. This study was done in Fars Province, using monthly data of 10 synoptic stations at period of 1990 to 2014. RDI index and Markov chain model used for drought monitoring and forecasting, respectively. Drought severity and expected status were analyzed. Results indicated that, the possibility of transmission to normal class was higher than possibility of transmission to other classes. The probability of drought balances, in monitoring stage, obtained 3.37, 8.88, 8.33, 63.2, 15.68, 0.6 and 0.00% for extremely drought, very drought, moderately drought, normal, moderately wet, very wet and extremely wet periods, respectively. The probability of drought balances, in forecasting stage, obtained 3.95, 10.46, 10.68, 55.51, 18.37, 1.00 and 0.00% for extremely drought, very drought, moderately drought, normal, moderately wet, very wet and extremely wet periods, respectively. Generally in Fars province, in forecasting stage, the frequency of occurrence of drought classes were higher than frequency of occurrence of wet classes that indicate the continuous persistence of drought in this province. Maximum and minimum frequency of drought occurrence classes obtained 31.5% and 20% at Izadkhast and Shiraz synoptic stations, respectively.

Keywords: Fars Province, Drought monitoring, Drought forecasting, RDI index, Markov Chain model.

¹ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural College, Fasa University, Iran.

* (Corresponding Author) moghimi@fasau.ac.ir

² MSc Student, Department of Water Engineering, Agricultural College, Fasa University, Iran

³ Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Agricultural College, Fasa University, Iran