

تحلیل فراوانی وقوع خشکسالی براساس توسعه‌ی یک شاخص استاندارد دو متغیره (بارش - رواناب)

سید علی چاوشیان* (استادیار)

غلامرضا نیک‌روش (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

ناصر دهقانیان (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

علیرضا نیک‌روش (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (دردی ۲ - ۳۴، شماره ۲/۱، ص. ۱۲۳-۱۳۲، یادداشت شفی)

خشکسالی یک پدیده‌ی تصادفی با عدم قطعیت است و برای توصیف آن نمی‌توان به یک مشخصه از خشکسالی اکتفا کرد. با توجه به اهمیت شاخص‌ها در تحلیل فراوانی خشکسالی و چندبعدی و تصادفی بودن آن، در پژوهش حاضر یک شاخص استاندارد دو متغیره (بارش - رواناب) براساس مفهوم کاپولا برای دو حوضه‌ی آبریز رشت (با اقلیم مرطوب) و ارومیه (با اقلیم نیمه‌مرطوب) توسعه داده شده است. سپس به تحلیل فراوانی سه متغیره (مدت، شدت و بیشینه‌ی شدت) براساس شاخص خشکسالی و دو شاخص استاندارد بارش و رواناب پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که فراوانی وقوع خشکسالی براساس شاخص استاندارد دو متغیره (بارش - رواناب)، از دو شاخص دیگر بیشتر است و شاخص مذکور برای یک رخداد مشخص خشکسالی، کمترین دوره‌ی بازگشت را تخمین می‌زند. همچنین برای شرایط یکسان (مدت، بیشینه‌ی شدت و دوره‌ی بازگشت مشخص)، شدت خشکسالی ارومیه از رشت بیشتر است.

chavoshian@iust.ac.ir
nikravesh.gholamreza@yahoo.com
dehghanian.n@gmail.com
nikravesh.alireza@gmail.com

واژگان کلیدی: تحلیل فراوانی خشکسالی، کاپولا، شاخص استاندارد دو متغیره، دوره‌ی بازگشت چندمتغیره.

۱. مقدمه

پدیده‌های تصادفی مانند خشکسالی و سیلاب، عدم قطعیت دارند و به صورت تابعی از چند متغیر هستند، بنابراین نیاز است که پدیده‌های مذکور به صورت چندمتغیره توصیف و ارزیابی شوند و ارزیابی تک‌متغیره از آن‌ها کافی و مناسب نیست. روش‌های مختلفی تاکنون برای ارزیابی‌های چندمتغیره توسعه داده شده‌اند، که می‌توان به روش‌های کاپولا^۴ و انتروپی^۵ اشاره کرد. کاپولا برای اولین بار در سال ۱۹۵۹ مطرح شد و به صورت گسترده‌ی در مباحث مالی و اقتصادی به کارگرفته شد.^[۴]

کاپولاها در واقع توابع ریاضی هستند که می‌توان براساس توزیع‌های احتمالاتی تک‌متغیره اختصاص داده‌شده به متغیرهای مورد بررسی، یک توزیع احتمالاتی مشترک از متغیرهای مذکور استخراج کرد.^[۵] در سال‌های اخیر، پژوهشگران زیادی با استفاده از روش کاپولا به توسعه‌ی شاخص و تحلیل فراوانی پدیده‌های هیدرولوژیکی، مانند خشکسالی و سیلاب پرداخته‌اند. اولین بار در سال ۲۰۰۶، به استفاده از کاپولاها در ارزیابی و توصیف خشکسالی‌ها توجه شد.^[۶]

در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ با در نظر گرفتن دو مشخصه‌ی شدت و مدت خشکسالی‌های استخراج‌شده براساس شاخص استاندارد بارش، به تحلیل فراوانی

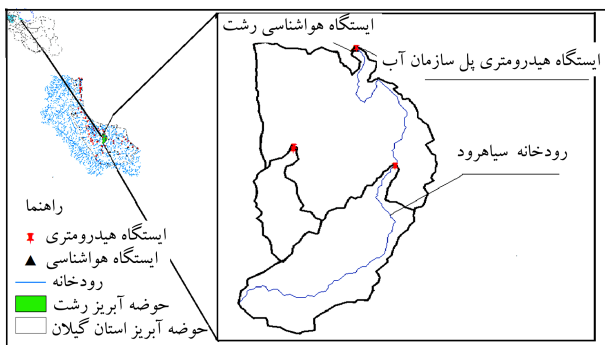
براساس گزارش جهانی سوانح و بلایا^۱، مجموع خسارت‌های ناشی از خشکسالی از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۴، بالغ بر ۵۴۰۰۰ میلیون دلار بوده است و در بین حوادث و بلاای طبیعی، خشکسالی از لحاظ تحت تأثیر قرار دادن جمعیت انسانی و گستره‌ی تأثیرگذاری، در رتبه‌ی دوم قرار دارد.^[۱]

بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که خشکسالی به معنی کمبود بارش است و به صورت تک‌متغیره، شرایط خشکسالی را بررسی می‌کنند و شاخص‌های تک‌متغیره‌ی مانند شاخص استاندارد بارش (SPI)^۲، شاخص‌های استاندارد رواناب (SSFI)^۳ توسعه داده شده‌اند. درحالی‌که بسیاری از پژوهشگران دیگر بر این باورند که تعریف خشکسالی براساس یک شاخص تک‌متغیره از قبیل: بارش، رواناب، رطوبت خاک و... توانایی لازم را برای تعیین شرایط خشکسالی برای همه‌ی خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی نداشته و ممکن است برای ارزیابی مطمئن ریسک و تصمیم‌گیری مناسب نباشد.^[۲،۳]

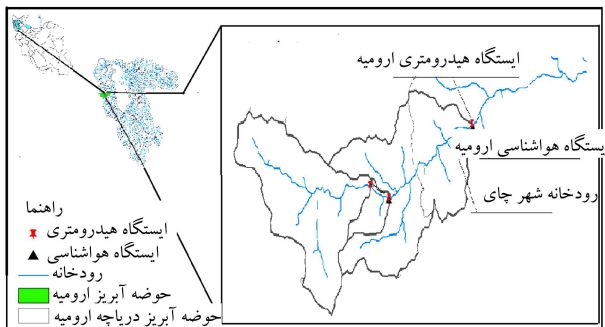
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۰۶/۱۴، پذیرش ۱۳۹۵/۰۷/۳۰

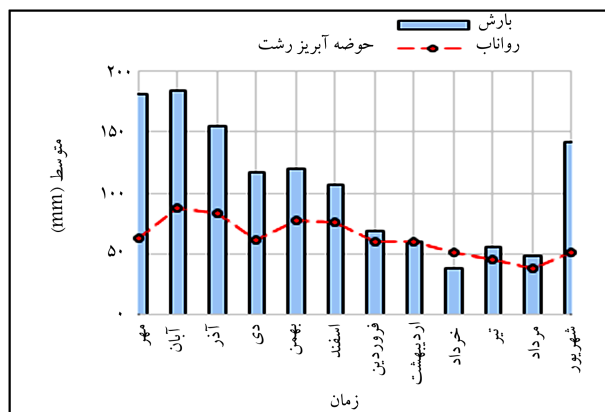
DOI: 10.24200/J30.2018.1355



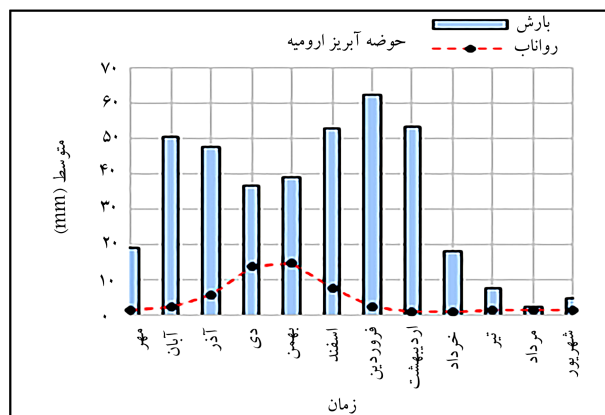
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری رشت.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری ارومیه.



شکل ۳. متوسط ماهانه‌ی بارش و رواناب رشت.



شکل ۴. متوسط ماهانه‌ی بارش و رواناب ارومیه.

خشکسالی برای دو منطقه‌ی بندرانزلی (اقلیم مرطوب) و آبادان (اقلیم نیمه‌خشک) پرداخته شد و منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (SDF)^۶ برای مناطق مورد مطالعه ارائه شد.^[۷]

در سال ۲۰۱۳، یک شاخص استاندارد چندمتغیره‌ی خشکسالی (MSDI)^۷ براساس مفهوم کاپولا برای کالیفرنیا و کارولینای شمالی با استفاده از متغیرهای بارش و رطوبت خاک استخراج و به بررسی شرایط خشکسالی براساس شاخص مذکور و شاخص‌های استاندارد بارش و رطوبت خاک (SSI)^۸ پرداخته شد.^[۸]

در پژوهشی دیگری (۲۰۱۴) بر روی آمار ۵۰ ساله‌ی بارش ایستگاه هواشناسی قزوین با استفاده از کاپولا به تحلیل خشکسالی هواشناسی از مشخصات شدت، مدت و بیشینه‌ی شدت پرداخته و دوره‌ی بازگشت‌های سه‌متغیره برای ایستگاه قزوین استخراج شد.^[۹] با توجه به اینکه نوشتار حاضر در واقع کاربرد مدلی است که قبلاً در مرجع^[۸] ارائه شده است، بنابراین در پژوهش حاضر با استفاده از مدل مذکور، یک شاخص استاندارد دومتغیره (بارش - رواناب) گسترش یافته و سپس به تحلیل فراوانی وقوع خشکسالی پرداخته شده است.

۲. روش پژوهش و نتایج

۲.۱. معرفی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه

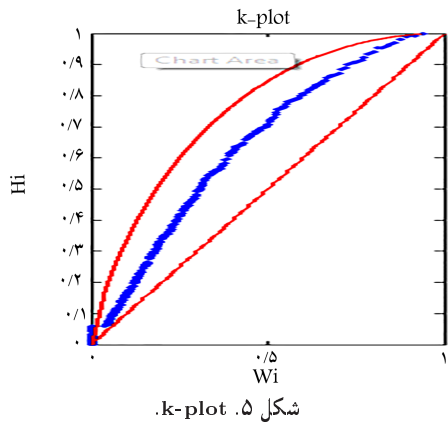
در پژوهش حاضر، دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه با میانگین‌های بارش سالانه ۱۲۷۶ و ۳۹۴ میلی‌متر به‌عنوان حوضه‌های آبریز مورد مطالعه مطرح هستند. در پژوهش حاضر از داده‌های بارش ماهانه‌ی ۳۸ ساله (۱۳۵۳-۱۳۹۰) ایستگاه‌های هواشناسی رشت و ارومیه که در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه قرار دارند، استفاده شده است. همچنین جهت روشن‌تر شدن بررسی اثر مستقیم بارش در رواناب، لازم است که موقعیت ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه مقداری پایین‌تر از موقعیت ایستگاه هواشناسی باشد. به همین منظور از آمار ماهانه‌ی ۳۸ ساله‌ی (۱۳۵۳-۱۳۹۰) رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری پل سازمان آب (واقع بر رودخانه‌ی سیاه‌رود در حوضه‌ی آبریز رشت) و ارومیه (واقع بر رودخانه‌ی شهرچای در حوضه‌ی آبریز ارومیه) استفاده شده است.

شکل‌های ۱ و ۲، به ترتیب حوضه‌های آبریز استان گیلان و دریاچه‌ی ارومیه را به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه‌های آبریز رشت و ارومیه نشان می‌دهند. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب متوسط ماهانه‌ی بارش و رواناب بر حسب میلی‌متر برای هر دو حوضه‌ی آبریز رشت (اقلیم مرطوب) و ارومیه (اقلیم نیمه‌مرطوب) مشاهده می‌شود.

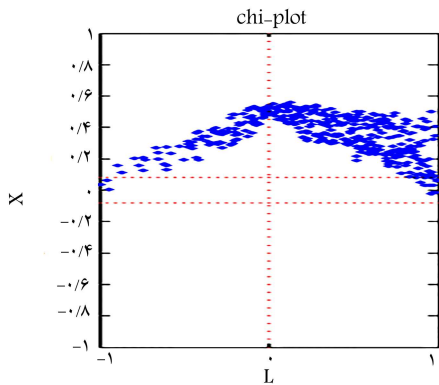
۲.۲. توسعه‌ی شاخص استاندارد دومتغیره

متغیر بارش نسبت به بقیه‌ی متغیرهای هیدرولوژیکی، نظیر رطوبت خاک، رواناب و جریان آب زیرزمینی نوسانات بیشتری دارد و همواره یک زمان تأخیری درخصوص اثرگذاری کمیت بارش در متغیرهای هیدرولوژیکی مذکور وجود دارد. این مدت زمان تأثیر برای همه‌ی متغیرهای هیدرولوژیکی یکسان نیست و به دلیل اثرگذاری مذکور، متغیر بارش با متغیرهای هیدرولوژیکی همبستگی دارد.

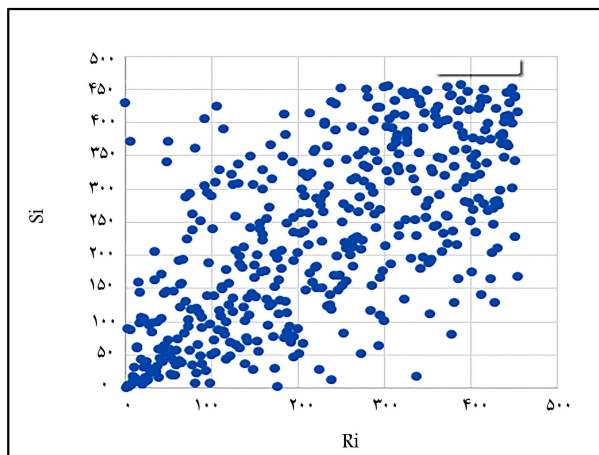
ارزیابی خشکسالی فقط براساس متغیر بارش به دلیل نوسانات زیاد آن کافی نیست، زیرا ممکن است از لحاظ بارش در وضعیت خشکسالی قرار نداشته باشیم، ولی از لحاظ متغیر هیدرولوژیکی مانند رواناب در وضعیت خشکسالی باشیم. همچنین ارزیابی خشکسالی فقط براساس یک متغیر هیدرولوژیکی نیز کافی



شکل ۵. k-plot.



شکل ۶. chi-plot.



شکل ۷. نمودار پراکنش رتبه‌ها.

۳.۲.۲. ارزیابی نکویی برازش توزیع های اختصاص داده شده

هدف از ارزیابی نکویی برازش توزیع های اختصاص داده شده، اندازه گیری میزان تطابق این توزیع ها با توزیع احتمالاتی تجربی است و از روش های مختلفی مانند: کلموگروف - اسمیرنوف^{۱۳}، کریمر - ون میس^{۱۴}، اندرسون - دارلینگ^{۱۵}، واتسون وزنی اصلاح شده^{۱۶} و لیو - شیموکاوا^{۱۷} برای ارزیابی نکویی برازش استفاده می شود.^[۵] زمانی نکویی برازش یک توزیع تأیید می شود که ضرایب حاصل از روش های ذکر شده برای توزیع مورد نظر، از آماره ی مربوطه در سطوح اعتماد مختلف کمتر باشد.

در بخش حاضر، نکویی برازش توزیع های گاما و لوگ نرمال بررسی و ضرایب مرتبط براساس روش های مذکور محاسبه و با آماره ی متناظر با سطوح اعتماد مختلف

نیست، به دلیل اینکه معمولاً بارش نسبت به بقیه متغیرهای هیدرولوژیکی زودتر در وضعیت خشکسالی قرار خواهد گرفت و زودتر از بقیه ی متغیرها، خشکسالی را تشخیص می دهد (به دلیل وجود زمان تأخیری اثرگذاری کمبود بارش در متغیرهای هیدرولوژیکی)، به طوری که ممکن است از لحاظ کمیتهی مانند رواناب در وضعیت خشکسالی نباشیم، ولی دچار کمبود بارش باشیم. به همین منظور ارزیابی خشکسالی باید بر اساس دو متغیر بارش و رواناب صورت پذیرد و یک شاخص دومتغیره برای ارزیابی جامع خشکسالی توسعه داده شود.

در بخش حاضر، مراحل توسعه ی شاخص برای داده های بارش و رواناب حوضه آبریز رشت تشریح شده است. لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از طولانی شدن نوشتار، از ارائه ی جزئیات خودداری شده است و برای دسترسی به آن ها باید به منابع اشاره شده رجوع کرد.

۱.۲.۲. ارزیابی همبستگی داده های بارش و رواناب

اولین گام قبل از به کارگیری توابع کاپولا، بررسی و تعیین میزان همبستگی بین متغیرهاست. روش های مختلفی از قبیل ضرایب همبستگی پیرسون^۹، اسپیرمن^{۱۰}، ضریب کندال^{۱۱} و نمودارهای گرافیکی مانند chi-plot، k-plot و rank scatter plot برای ارزیابی همبستگی بین دو متغیر تصادفی وجود دارد.^[۵]

در پژوهش حاضر نیز از روش های مذکور برای ارزیابی همبستگی بارش و رواناب استفاده شده است. ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین متغیرهای بارش و رواناب با توجه به جدول ۱ برابر با ۰/۶۵ است که به معنی همبستگی مناسب بین متغیرهای بارش و رواناب است. ضریب کندال (τ) برابر با ۰/۴۶۵ بود که از مقدار $\tau_{\alpha/2}$ مربوط در سطح معنی داری ۵٪، بیشتر است و فرضیه ی عدم وابستگی بین متغیرهای مورد نظر رد می شود. شکل ۵، (k-plot) داده ها در محدوده ی عدم استقلال (بین خط ۴۵ درجه و منحنی) قرار دارند که به معنی وجود همبستگی بین این دو متغیر است. در شکل ۶، (chi-plot) داده ها در خارج از محدوده ی استقلال (محدوده ی نقطه چین قرمز رنگ) هستند که بیانگر عدم استقلال بین دو متغیر بارش و رواناب است. همچنین در شکل ۷، تقریباً داده های بارش و رواناب روی خط قطری ($R_i = S_i$) قرار دارند که تأییدکننده ی همبستگی نسبتاً مناسب است. با توجه به نتایج ۶ روش مذکور می توان نتیجه گرفت که متغیرهای بارش و رواناب همبستگی نسبتاً مناسبی دارند.

۲.۲.۲. اختصاص توزیع احتمالاتی حاشیه یی

در پژوهش حاضر، برای هر ماه به صورت جداگانه، به داده های بارش و رواناب، به ترتیب توزیع های گاما و لوگ نرمال اختصاص داده شده است (در پژوهش حاضر توزیع های احتمالاتی مختلفی به داده های بارش و رواناب اختصاص داده شده است که توزیع های گاما و لوگ نرمال به عنوان مناسب ترین توزیع انتخاب شدند، اما از ارائه جزئیات خودداری شده است). در شکل ۸، برازش توزیع های احتمالاتی تجمعی داده های بارش و رواناب نشان داده شده است. در محور افق نمودارها، توزیع احتمالاتی تجربی گرینگورتن^{۱۲} و محور قائم توزیع احتمالاتی مورد نظر مشاهده می شود که تقریباً توزیع های احتمالاتی اختصاص داده شده به بارش و رواناب، روی خط ۴۵ درجه قرار دارند و همخوانی مناسبی با توزیع احتمالاتی تجربی دارند.

جدول ۱. ضرایب همبستگی متغیرهای بارش - رواناب رشت.

	r_n	ρ_n	τ
بارش - رواناب	۰/۶۵۱	۰/۶۵۳	۰/۴۶۵

جدول ۲. نکویی برازش توزیع گاما.

	آماره	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	H_0
Dn	0,384	0,507	0,525	0,573	0,598	0,71	قبول
Wn ²	0,1346	0,2508	0,2907	0,3503	0,463	0,6558	قبول
An ²	0,9059	1,5007	1,6558	2,1124	2,7143	3,8197	قبول
Un ²	0,7303	0,7713	0,8627	0,9951	1,2723	1,9169	قبول
Ln	0,9105	1,1326	1,2263	1,4215	1,5131	1,7831	قبول

جدول ۳. نکویی برازش توزیع لوگ نرمال.

	آماره	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	H_0
Dn	0,347	0,485	0,532	0,561	0,681	0,716	قبول
Wn ²	0,753	0,2271	0,3	0,379	0,5067	0,615	قبول
An ²	0,5972	1,4681	1,6642	1,903	2,59	3,56	قبول
Un ²	0,5135	0,762	0,9086	1,0141	1,2878	1,7037	قبول
Ln	0,6913	1,071	1,171	1,307	1,956	1,754	قبول

جدول ۴. معیارهای انتخاب کاپولای مناسب.

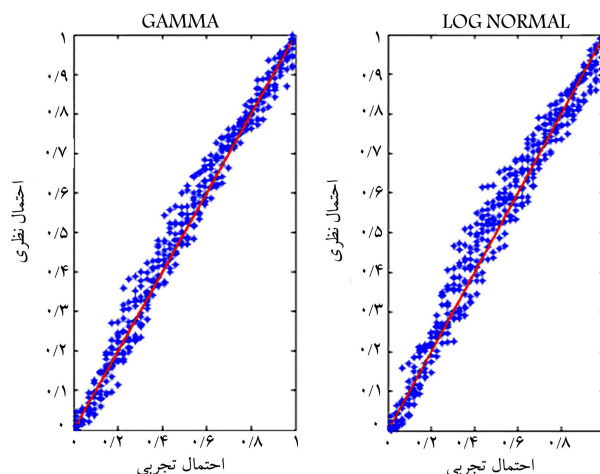
	AIC	RMSE	NSE
Frank	1408,1	0,438	0,9742
Clayton	1420,2	0,454	0,9723
Gumbel	1407,2	0,426	0,9756
Gaussian	1379,6	0,406	0,9779
t	1369,3	0,404	0,9781

کرد: [۸]

$$TSI(p) = \Phi^{-1}(p) \quad (2)$$

که در آن، Φ^{-1} معکوس توزیع نرمال استاندارد است. با توجه با استاندارد بودن شاخص، طبقه‌بندی شاخص همانند شاخص استاندارد بارش است. در پژوهش حاضر، برای انتخاب مناسب‌ترین کاپولای جهت استخراج توزیع احتمالاتی مشترک بین متغیرهای بارش و رواناب از معیارهایی از قبیل: آکایک^{۱۹}، ریشه‌ی میانگین مجذور خطاها^{۲۰} و نش - ساوتکلایف^{۲۱} استفاده شده است. جزئیات محاسبات روش‌های مذکور در منابع [۱۱]، [۱۰] ارائه شده است. مطابق جدول ۴ و معیارهای ذکرشده، مناسب‌ترین کاپولای که کمترین مقدار AIC و RMSE و بیشترین مقدار NSE را دارد، کاپولای t است. شاخص استاندارد دومتغیره با استفاده از کاپولای t و برازش توزیع گاما به متغیر بارش و توزیع لوگ نرمال به متغیر رواناب، در مقیاس‌های زمانی مختلف استخراج می‌شود (در شکل ۹، برای درک بهتر رفتار سه شاخص، سری زمانی سه شاخص از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۳۹۰ ترسیم شده است).

با مقایسه بین شاخص TSI با دو شاخص SPI و SSFI می‌توان نتیجه گرفت که رفتار شاخص TSI ترکیبی از دو شاخص SPI و SSFI است، به طوری که رفتار این شاخص در تشخیص خشکسالی‌ها همانند شاخص SPI و در وضعیت خشکسالی باقی ماندن^{۲۲}، همانند شاخص SSFI عمل می‌کند. همچنین شاخص TSI شدت خشکسالی را بیشتر از شاخص‌های SPI و SSFI بیان می‌کند (خشکسالی ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ با مقیاس زمانی ۳ ماه). با مقایسه‌ی رفتار شاخص توسعه داده شده‌ی



شکل ۸. توزیع احتمالاتی گاما (چپ) و لوگ نرمال (راست).

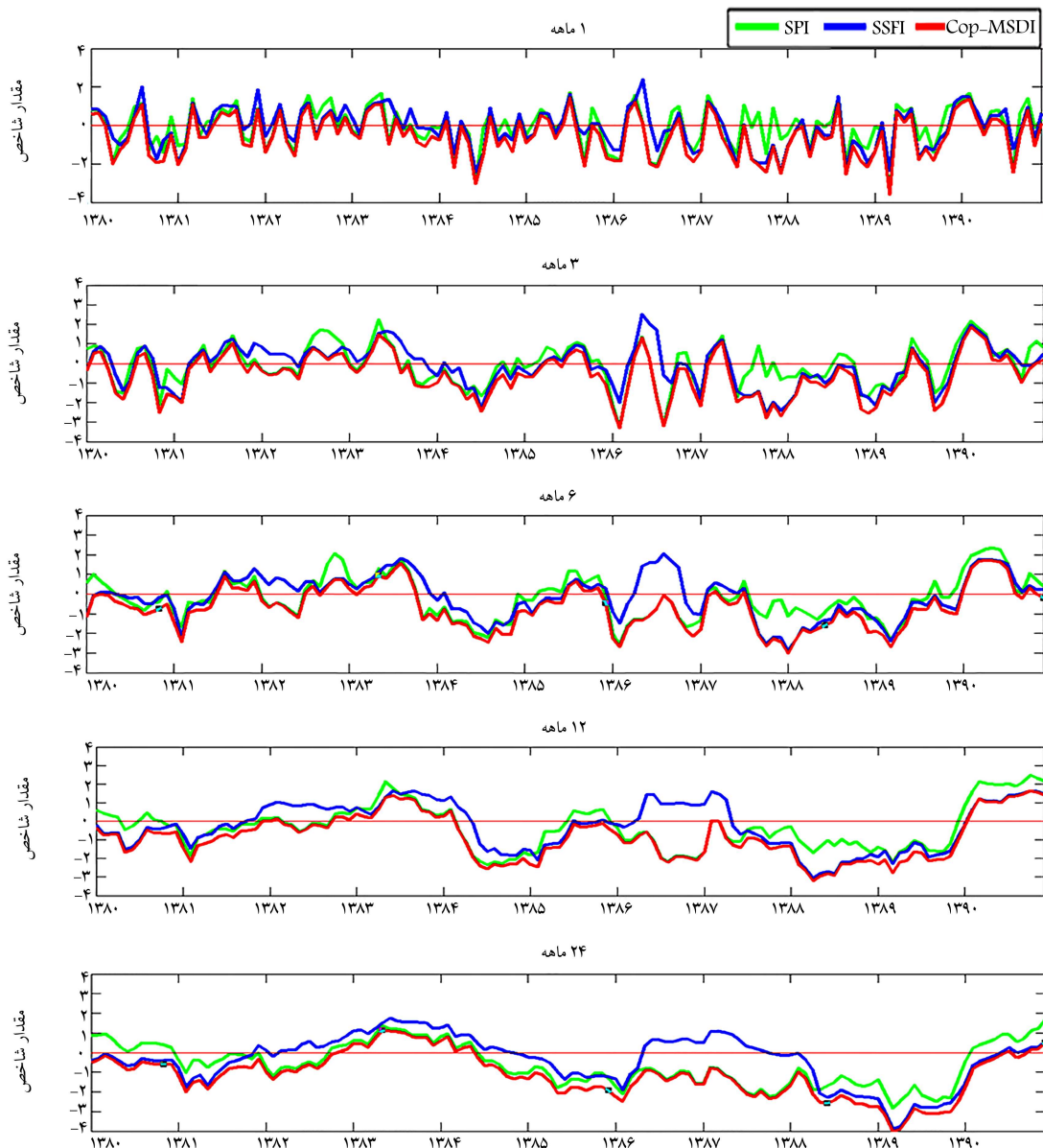
مقایسه و به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. در هر دو توزیع، ضرایب محاسبه‌شده کمتر از آماره‌ی متناظر با سطوح اعتماد مختلف است.

۴.۲.۲. استخراج شاخص استاندارد دو متغیره (بارش - رواناب)^{۱۸}

کاپولایها در واقع توابع و مدل‌های ریاضی هستند که قادر به مدل سازی ساختارهای هم‌بسته از متغیرهای تصادفی غیرمستقل هستند. بدین معنی که این توابع، توزیع احتمالاتی مشترکی با توجه به توزیع اختصاص داده‌شده به هر متغیر تعیین می‌کنند.^[۵] با فرض اینکه X و Y به ترتیب متغیرهای تصادفی بارش و رواناب باشند، توزیع احتمالاتی مشترک (p) آن‌ها به صورت رابطه‌ی ۱ است:^[۸]

$$P(X \leq x, Y \leq y) = C[F(X), F(Y)] = p \quad (1)$$

که در آن، C کاپولای و $F_X(x)$ و $G_Y(y)$ به ترتیب توزیع‌های احتمالاتی تجمعی (کاهشی) متغیرهای بارش و رواناب هستند. برای استخراج شاخص استاندارد دومتغیره (بارش - رواناب) باید احتمال تجمعی (p) حاصل از رابطه‌ی ۱ را به صورت رابطه‌ی ۲ به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار واحد تبدیل



شکل ۹. مقایسه‌ی شاخص‌های SPI، SSFI و MSDI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه.

۱.۳.۲. استخراج مشخصات خشکسالی

تعریف خشکسالی براساس متغیر تصادفی x_t (مقدار شاخص خشکسالی یا مقدار متغیر خشکسالی مثل بارش، رواناب و...)، نیازمند تعیین یک سطح آستانه‌ی w است. بر این اساس، زمانی خشکسالی رخ می‌دهد که مقدار متغیر تصادفی موردنظر از میزان سطح آستانه‌ی تعیین شده کمتر باشد. سطح آستانه می‌تواند ثابت یا متغیر باشد و معمولاً این حد بحرانی را متناسب با شرایط نرمال در نظر می‌گیرند.

در شکل ۱۰، مشخصات خشکسالی در یک سری زمانی ترسیم شده است. در پژوهش حاضر، تحلیل فراوانی خشکسالی براساس سه مشخصه‌ی مدت^{۲۳} (فاصله‌ی زمانی که در خلال آن مقدار متغیر تصادفی از میزان سطح آستانه کمتر باشد)، شدت^{۲۴} (مجموع کمبودهای متغیر اصلی از میزان سطح آستانه در طول دوره‌ی خشکسالی)، و بیشینه‌ی شدت خشکسالی^{۲۵} (بیشینه‌ی اختلاف متغیر اصلی از حد بحرانی در هر رخداد خشکسالی) صورت می‌گیرد.

مذکور با رفتار شاخص توسعه داده شده در مرجع^[۸] مشخص می‌شود که هر دو شاخص رفتار مشابه دارند. در هر دو شاخص، تشخیص خشکسالی براساس متغیر بارش و تخمین مدت دوره‌ی تر و خشک براساس متغیر هیدرولوژیکی است.

۳.۲. تحلیل فراوانی وقوع خشکسالی

معمولاً تحلیل‌های فراوانی چندمتغیره براساس مشخصات یک پدیده مانند خشکسالی صورت می‌گیرد. در بخش حاضر، روند تحلیل فراوانی چندمتغیره برای حوضه‌ی آبریز رشت تشریح و در پایان، نتایج تحلیل مذکور برای دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به مشابه بودن برخی از مراحل توسعه‌ی شاخص چندمتغیره‌ی شرح داده شده با تحلیل فراوانی، در بخش حاضر از ارائه‌ی جزئیات خودداری شده است.

جدول ۵. مشخصات خشکسالی رشت.

شاخص	تعداد رخدادها	بیشینه مدت	بیشینه شدت	حداکثر بیشینه شدت
MSDI	۹۶	۱۶	۱۸٫۷۶	۳٫۶۱
SSFI	۸۵	۱۰	۱۲٫۹۹	۳٫۱۱
SPI	۱۰۹	۷	۸٫۳۵	۳٫۶

جدول ۶. مشخصات خشکسالی ارومیه.

شاخص	تعداد رخدادها	بیشینه مدت	بیشینه شدت	حداکثر بیشینه شدت
MSDI	۵۷	۴۰	۵۶٫۲۹	۴٫۵
SSFI	۶۰	۲۰	۳۱٫۲	۴٫۴۵
SPI	۱۰۴	۱۱	۱۰٫۳۳	۲٫۱۸

جدول ۷. نکویی برازش کاپولای نرمال.

H_0	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.15$	$\alpha = 0.2$	آماره (Dn)
قبول	۳٫۵۲	۲٫۱۹	۱٫۶۶	۱٫۴۹	۱٫۳۲	۰٫۹۱

در جدول‌های ۵ و ۶، مشخصات خشکسالی استخراج شده براساس ۳ شاخص SPI، SSFI و TSI برای دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه ارائه شده‌است. با بررسی جدول‌های مذکور مشخص می‌شود با توجه به اینکه نوسانات شاخص SPI بیشتر از دو شاخص TSI و SSFI است، تعداد رخدادهای خشکسالی ثبت شده برای شاخص SPI بیشتر از دو شاخص SSFI و TSI است و بیشینه‌ی مشخصات خشکسالی ثبت شده برای شاخص SPI کمتر از دو شاخص دیگر است. همچنین شاخص TSI نسبت به دو شاخص SPI و SSFI، بیشترین مدت و بیشترین شدت خشکسالی را دارد.

۲.۳.۲. توزیع‌های احتمالاتی مشخصات خشکسالی

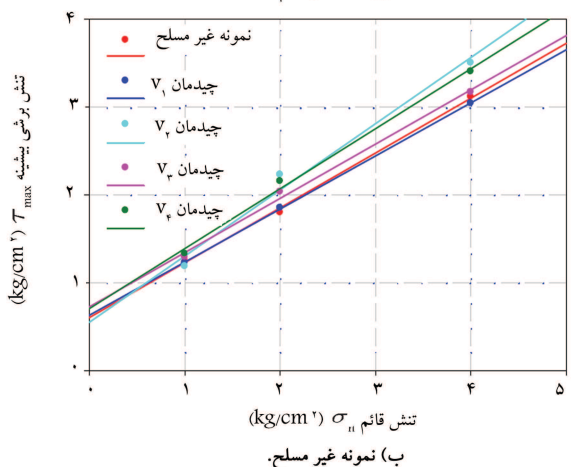
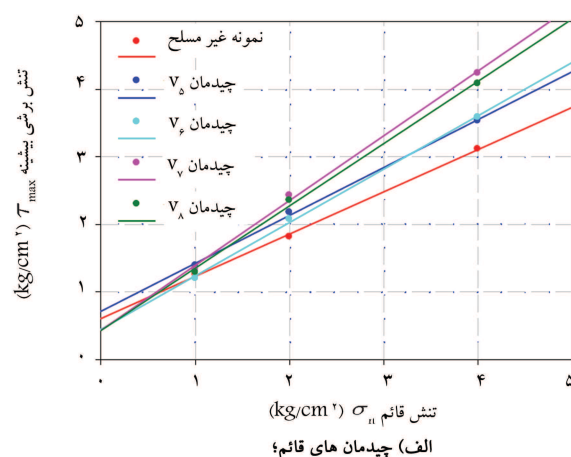
در پژوهش حاضر، مناسب‌ترین توزیع برای مشخصه‌های مدت، شدت و بیشینه‌ی شدت خشکسالی به ترتیب توزیع‌های نمایی، ویبول و نرمال هستند. همچنین مناسب‌ترین کاپولا برای استخراج توزیع احتمالاتی چندمتغیره، تابع کاپولا نرمال است. نتایج ارزیابی‌های نکویی برازش، حاکی از نکویی برازش کاپولای نرمال و توزیع‌های ویبول و نرمال در تمامی سطوح اعتماد است و نکویی برازش توزیع نمایی در بعضی از سطوح اعتماد تأیید می‌شود. ارزیابی نکویی برازش کاپولای نرمال با استفاده از تبدیل روزنبلات^{۲۶} در جدول ۷ ارائه شده است.

۳.۳.۲. تحلیل فراوانی

پس از اختصاص مناسب‌ترین توزیع‌های احتمالاتی حاشیه‌ی تک‌متغیره و مشترک چندمتغیره به مشخصه‌های خشکسالی، می‌توان مطابق رابطه‌های ۳ الی ۵، تحلیل‌های فراوانی چندمتغیره انجام داد.^[۱۳]

$$P_{DSP}^Y = P(D \leq d \cup S \leq s \cup P \leq p) = C(u_1, u_2, u_3) \quad (3)$$

که در آن، پارامترهای مورد استفاده‌ی D ، S و P به ترتیب مشخصه‌های مدت، شدت و بیشینه‌ی شدت خشکسالی هستند. همچنین مطابق رابطه‌ی ۳، احتمال



شکل ۱۰. مشخصات مورد استفاده در تحلیل خشکسالی.^[۱۳]

$$T_{D|SP}^V = \frac{v}{1 - P_{D|SP}^V} \quad (9)$$

$$T_{D|SP}^{\wedge} = \frac{v}{1 - P_{D|SP}^{\wedge}} \quad (10)$$

$$T_{D|SP} = \frac{v}{1 - P_{D|SP}} \quad (11)$$

$$T_{DS|P} = \frac{v}{1 - P_{DS|P}} \quad (12)$$

که در آن‌ها، $T_{D|SP}^V$ دوره بازگشت رخدادی است که $D \geq d$ یا $S \geq s$ باشد. همچنین $T_{D|SP}^{\wedge}$ مربوط به رخدادی است که در آن $D \geq d$ و $S \geq s$ است.

در شکل ۱۱، نمودار دوره بازگشت‌های چندمتغیره $T_{D|SP}^V$ برای ۳ مقدار متفاوت بیشینه شدت ترسیم شده است. مطابق شکل مذکور، هر چه مقدار مشخصه بیشینه شدت افزایش می‌یابد و نمودارهای دوره بازگشت کشیده‌تر می‌شوند و مقدار دوره بازگشت‌ها افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب منحنی‌های دوره بازگشت $T_{D|SP}^V$ و $T_{D|SP}^{\wedge}$ هستند که از روابط ۱۰ و ۱۱ استخراج می‌شوند. در منحنی‌های مذکور، با افزایش مقدار بیشینه شدت، دوره بازگشت افزایش می‌یابد. همچنین شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب منحنی‌های احتمالاتی شرطی و مجموعه‌ی نقاط دارای احتمال مشترک را نشان می‌دهند.

در مطالعات پیشین معمولاً تحلیل فراوانی‌های چندمتغیره بر روی مشخصات خشکسالی استخراج شده از شاخص‌های تک‌متغیره، نظیر بارش، رواناب و ... انجام و

$D \leq d$ یا $S \leq s$ یا $P \leq p$ برابر با احتمال محاسبه شده از طریق کاپولاست.

$$P(D \geq d \cup S \geq s \cup P \geq p) = 1 - u_1 - u_2 - u_3 + C(u_1, u_2) + C(u_1, u_3) + C(u_2, u_3) - C(u_1, u_2, u_3) \quad (4)$$

$$P_{D|SP}^{\wedge} = P(D \leq d \cap S \leq s \cap P \leq p) = 1 - P(D \geq d \cup S \geq s \cup P \geq p) \quad (5)$$

احتمال $D \leq d$ و $S \leq s$ و $P \leq p$ براساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود. احتمال رخداد $D \leq d$ به شرط آنکه $S \geq s$ و $P \geq p$ باشد، مطابق رابطه ۶ تعیین می‌شود. رابطه ۷، برای محاسبه‌ی احتمال رخداد $D \leq d$ و $S \leq s$ به شرط $P \geq p$ است.

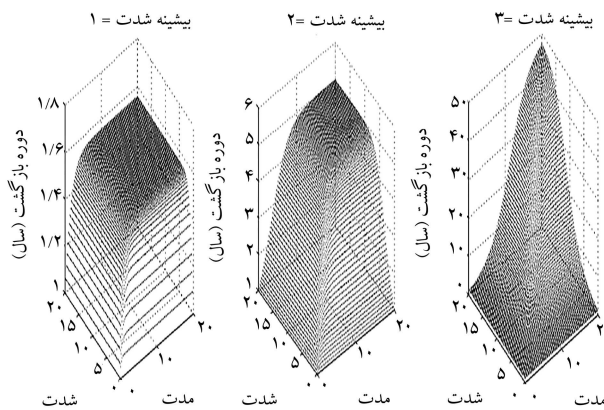
$$P_{D|SP} = P(D \leq d | S \geq s, P \geq p) = \frac{u_1 - C(u_1, u_2) - C(u_1, u_3) + C(u_1, u_2, u_3)}{1 - u_2 - u_3 + C(u_2, u_3)} \quad (6)$$

$$P_{DS|P} = P(D \leq d | S \leq s, P \geq p) = \frac{C(u_1, u_2) + C(u_1, u_2, u_3)}{1 - u_3} \quad (7)$$

در حالت تک‌متغیره برای متغیر X با توزیع احتمال کاهش $F_X(x)$ ، دوره بازگشت به صورت رابطه ۸ تعیین می‌شود:

$$T_P = \frac{v}{1 - F_X(x_P)} \quad (8)$$

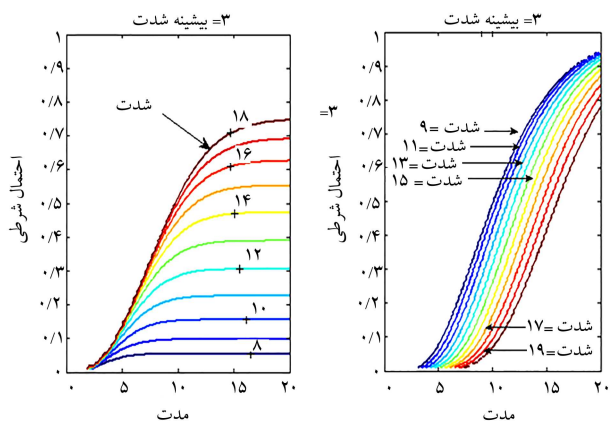
که در آن، T_P دوره بازگشت متغیر X در زمانی است که از مقدار x_P بزرگ‌تر باشد و v متوسط فاصله‌ی زمانی بین شروع رخداد‌های خشکسالی است. در حالت چندمتغیره، براساس رابطه ۸، دوره بازگشت‌های شرطی و چندمتغیره تعریف می‌شوند. [۱۳۶] در جدول ۸، دوره بازگشت‌های تک و چند متغیره استخراج شده‌اند و در آن ستون‌های دوم الی چهارم به ترتیب مدت، شدت و بیشینه شدت متناظر با دوره بازگشت‌های ستون اول هستند. ستون‌های پنجم الی هشتم، دوره بازگشت‌های متناظر با مقادیر ستون‌های دوم الی چهارم هستند که این دوره بازگشت‌ها به ترتیب براساس روابط ۹ الی ۱۲ محاسبه شده‌اند.



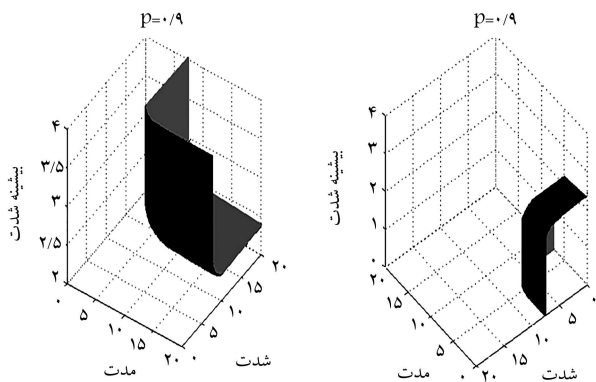
شکل ۱۱. $T_{D|SP}^V$ برای مقادیر مختلف بیشینه شدت: ۳: peak (سمت راست)، ۲: peak (وسط) و ۱: peak (سمت چپ).

جدول ۸. دوره بازگشت‌های تک‌متغیره و چندمتغیره خشکسالی رشت.

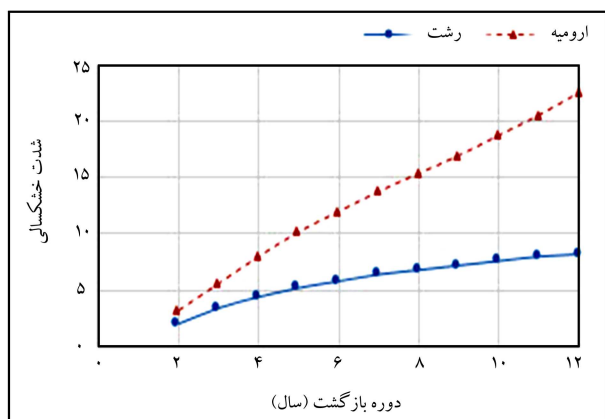
$Tds p$	$Td sp$	$T_{D SP}^{\wedge}$	$T_{D SP}^V$	بیشینه شدت	شدت	مدت	دوره بازگشت
۱,۱۴	۱,۱۹	۲,۷۸	۱,۵۶	۱,۳۰	۲,۰۰	۲,۱۷	۲
۱,۳۰	۱,۴۰	۹,۳۹	۳,۳۲	۲,۰۰	۵,۰۶	۵,۰۵	۵
۱,۴۱	۱,۵۷	۲۲,۹۰	۶,۱۰	۲,۳۶	۷,۵۰	۷,۲۲	۱۰
۱,۵۷	۱,۸۱	۷۲,۹۸	۱۴,۰۴	۲,۷۵	۱۰,۸۵	۱۰,۰۹	۲۵
۱,۶۹	۲,۰۰	۱۷۳,۷۴	۲۶,۷۱	۳,۰۰	۱۳,۴۴	۱۲,۲۷	۵۰
۱,۸۱	۲,۲۲	۴۱۱,۲۸	۵۱,۲۱	۳,۲۳	۱۶,۰۸	۱۴,۴۴	۱۰۰
۱,۹۸	۲,۵۲	۱۲۷۶,۳۶	۱۲۲,۱۶	۳,۵۰	۱۹,۶۴	۱۷,۳۱	۲۵۰
۲,۱۲	۲,۷۸	۲۹۹۴,۶۷	۲۳۷,۰۴	۳,۶۹	۲۲,۳۶	۱۹,۴۹	۵۰۰
۲,۲۵	۳,۰۶	۷۰۰۷,۳۹	۴۶۱,۵۷	۳,۸۶	۲۵,۱۲	۲۱,۶۶	۱۰۰۰



شکل ۱۴. منحنی‌های احتمالاتی شرطی $P_{D|SP}$ (راست) و $P_{DS|P}$ (چپ) به ازاء $peak=3$.



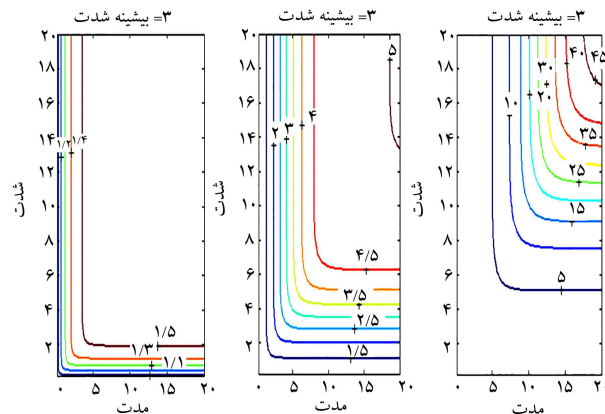
شکل ۱۵. مجموعه‌ی نقاط دارای احتمال مشترک $P_{D|SP} = 0.9$ (سمت راست) و $P_{DS|P} = 0.9$ (سمت چپ).



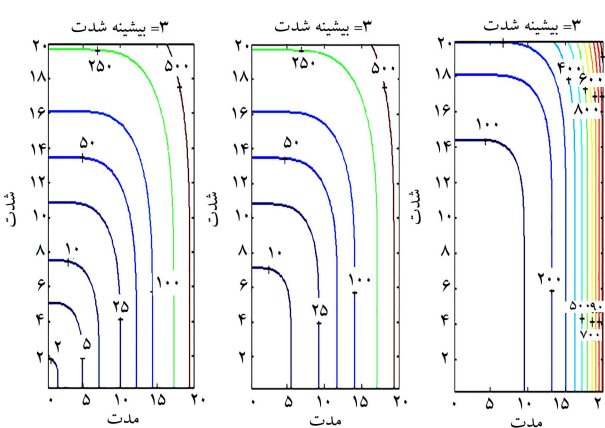
شکل ۱۶. شدت خشکسالی متناظر با دوره‌ی بازگشت $T_{D|SP}^V$ برای بیشینه شدت $3 =$ و بیشینه‌ی مدت خشکسالی ممکن.

کتر به مشخصات خشکسالی شاخص‌های ترکیبی و چندمتغیره پرداخته شده است. به همین منظور در پژوهش حاضر علاوه بر مشخصات خشکسالی، شاخص‌های تک‌متغیره‌ی بارش و رواناب از مشخصات خشکسالی شاخص دومتغیره‌ی استاندارد توسعه داده شده استفاده شده است.

برای مقایسه‌ی عملکرد ۳ شاخص SPI, SSFI, TSI در تحلیل فراوانی، دوره‌ی بازگشت یک رخداد مشخص خشکسالی (مدت: ۸ ماه، شدت: ۴٫۶ و بیشینه‌ی شدت: ۱٫۶۵) برای دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه تخمین زده شده است. در جدول‌های ۹ و ۱۰، این دوره‌ی بازگشت‌ها مقایسه شده‌اند. مطابق جدول‌های مذکور، دوره‌ی بازگشت‌های تخمین زده شده برای هر یک از دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه، براساس شاخص TSI، به دلیل در نظر گرفتن توأمان خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی کمتر از دو شاخص دیگر است. به منظور مقایسه‌ی خشکسالی‌های دو حوضه‌ی آبریز رشت و ارومیه، شکل ۱۶ براساس عملکرد شاخص



شکل ۱۷. منحنی‌های دوره‌ی بازگشت $T_{D|SP}^V$ برای مقادیر مختلف بیشینه‌ی شدت: ۳: peak (سمت راست)، ۲: peak (وسط) و ۱: peak (سمت چپ).



شکل ۱۸. منحنی‌های دوره‌ی بازگشت $T_{D|SP}^V$ برای مقادیر مختلف بیشینه‌ی شدت: ۳: peak (سمت راست)، ۲: peak (وسط) و ۱: peak (سمت چپ).

جدول ۹. دوره‌ی بازگشت خشکسالی $T_{D|SP}^V$ رشت: (بیشینه شدت = ۱٫۶۵، شدت = ۴٫۶، مدت = ۸).

$T_{DS P}$	$T_{D SP}$	$T_{D SP}^A$	$T_{D SP}^V$	T_{peak}	$T_{severity}$	$T_{duration}$	
۳٫۹۱	۴٫۷۹	۹۵٫۹۴	۴٫۸۱	۴٫۹۵	۱۹٫۸۵	۵۶٫۶۶	SPI
۱٫۵۴	۵٫۱۴	۴۲٫۸۰	۴٫۸۸	۵٫۴۰	۷٫۳۸	۳۰٫۸۴	SSFI
۱٫۶۲	۳٫۰۹	۱۴٫۹۲	۲٫۷۶	۲٫۹۶	۴٫۳۷	۱۲٫۸۳	TSI

جدول ۱۰. دوره‌ی بازگشت خشکسالی T_{DSP}^V ارومیه: (بیشینه شدت = ۱٫۶۵، شدت = ۴٫۶، مدت = ۸).

$T_{DS P}$	$T_{D SP}$	T_{DSP}^{\wedge}	T_{DSP}^V	T_{peak}	$T_{severity}$	$T_{duration}$	
۲٫۵۷	۴٫۹۲	۱۲۳٫۳۸	۸٫۶۱	۹٫۶۳	۲۴٫۰۰	۴۸٫۸۱	SPI
۱٫۲۵	۲٫۳۳	۱۶٫۰۳	۳٫۹۶	۵٫۴۸	۵٫۰۴	۹٫۲۳	SSFI
۱٫۲۶	۱٫۳۹	۴٫۳۷	۲٫۰۷	۲٫۴۷	۲٫۶۲	۳٫۴۹	TSI

توسعه‌ی شاخص چندمتغیره و تحلیل فراوانی چندمتغیره دارد). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند:

- رفتار شاخص TSI ترکیبی از دو شاخص SPI و SSFI است، به گونه‌یی که رفتار آن در تشخیص خشکسالی‌ها، همانند شاخص SPI و در تخمین مدت دوره‌ی تر و خشک همانند شاخص SSFI عمل می‌کند. همچنین شاخص TSI نسبت به دو شاخص SPI و SSFI در یک رخداد مشخص، خشکسالی را با شدت بیشتری ثبت می‌کند.
- مشخصات خشکسالی‌های استخراج شده از ۳ شاخص مطرح شده نشان می‌دهد که تعداد رخدادهای خشکسالی ثبت شده توسط شاخص SPI به دلیل نوسانات زیاد، از دو شاخص دیگر بیشتر است و در بقیه‌ی مشخصه‌ها، مانند: شدت، مدت، و بیشینه‌ی شدت، شاخص SPI کمترین مقادیر را دارد و بیشترین مقادیر مربوط به شاخص TSI است.
- برای یک رخداد مشخص، دوره‌ی بازگشت‌های تخمین زده شده حاصل از شاخص TSI، از دو شاخص دیگر کمتر و مقادیر دوره‌ی بازگشت‌های تخمین زده شده‌ی مذکور از لحاظ بزرگی به صورت $SPI > SSFI > TSI$ هستند.
- شدت خشکسالی‌های حوضه‌ی آبریز ارومیه نسبت به رشت، برای یک دوره‌ی بازگشت مشخص و مشخصه‌های خشکسالی یکسان بیشتر است. به عبارت دیگر، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که ارومیه، خشکسالی‌های شدیدتری نسبت به رشت تجربه می‌کند.
- عملکرد توابع کاپولا در مدل‌سازی‌های چندمتغیره رضایت‌بخش بوده است و احتمالات حاصل از توابع مذکور، هم‌خوانی مناسبی با احتمالات تجربی چندمتغیره‌ی گرینگورتن داشته‌اند.

TSI ترسیم شده است. در شکل مذکور، در هر یک از حوضه‌ها، برای هر دوره‌ی بازگشت معین (این دوره‌ی بازگشت‌ها از ۲ سال تا ۱۲ سال هستند)، با توجه به بیشینه‌ی شدت مشخص ($Severity\ peak = 3$) و بیشینه‌ی مدت خشکسالی ممکن، شدت خشکسالی متناظر تعیین شده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که برای بیشینه‌ی شدت مشخص و دوره‌ی بازگشت معین براساس بیشینه‌ی مدت خشکسالی ممکن، شدت خشکسالی برای حوضه‌ی آبریز ارومیه بیشتر از حوضه‌ی آبریز رشت است. بنابراین خشکسالی‌های ارومیه شدیدتر از خشکسالی‌های رشت است.

۳. نتیجه‌گیری

بدون شک امروزه یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مدیریت منابع آب بحث خشکسالی است که همواره خسارت‌های جبران ناپذیری بر جوامع انسانی وارد کرده است و در هر رژیم آب و هوایی و منطقه‌یی ممکن است رخ دهد؛ از این رو بررسی خشکسالی و آثار آن حائز اهمیت فراوانی است. در پژوهش حاضر، با توجه به لزوم ارزیابی و تحلیل پدیده‌ی خشکسالی و جایگاه شاخص‌ها در ارزیابی‌ها و همچنین چندبعدی بودن و عدم قطعیت ذاتی خشکسالی‌ها، یک شاخص استاندارد خشکسالی براساس دو متغیر بارش و رواناب با توجه به مفهوم کاپولا برای حوضه‌های آبریز رشت و ارومیه توسعه داده شده و سپس با استفاده از شاخص مذکور توسعه داده شده و دو شاخص تک‌متغیره‌ی استاندارد بارش و رواناب به تحلیل فراوانی چندمتغیره (شدت، مدت و بیشینه‌ی شدت خشکسالی) در حوضه‌های رشت و ارومیه پرداخته شده است (پژوهش حاضر، دو بخش اصلی

پانویس‌ها

- world disaster report
- standardized precipitation index (SPI)
- standardized streamflow index (SSFI)
- Copula
- Entropy
- severity-duration-frequency curve (SDF)
- multivariate standardized drought index (MSDI)
- standardized soil moisture index (SSI)
- Pearson's classical correlation coefficient
- Spearman's correlation coefficient
- Kendall's tau
- gringorten plotting position formula
- Kolmogorov-Smirnov (K-S)
- Cramer-von Mises (C-M)
- Anderson- Darling (A-D)
- modified weighted watson
- Liao and Shimokawa
- twovariate standardized index (TSI)
- akaike information criterion
- root mean square error
- nash & sutcliffe
- driught persistence
- duration
- severity
- severity peak

(References) منابع

1. *World Disasters Report*, publications and reports-data (2014); Available from: <http://www.ifrc.org/en/publications-and-reports/world-disasters-report/world-disasters-report-2014/world-disasters-report-2014-data>.
2. Smakhtin, V.U. and Hughes, D.A. "Review automated estimation and analyses of drought indices in South Asia?", International Water Management Institute (IWMI), Working Paper 83 (2004).
3. Keyantash, J.A. and Dracup, J.A. "An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage", *Water Resources Research*, **40**(9) (Sep 2004).
4. Wong, G., Leonard, M., Metcalfe, A.V. and Lambert, M.F. "Drought analysis using trivariate copulas condition on climatic states", *Journal of Hydrological Engineering*, **15**(2) (Feb 2010).
5. Song, S. and P.Singh, V. "Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrological data", *Stoch. Environ. Res. Risk Assess*, **24**(3), pp. 425-444 (2010).
6. Ma, M., Song, S., Ren, L., Jiang, Sh. and Song, J. "Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and student t copula", *Hydrological Processes*, **27**(8), pp. 1175-1190 (2011).
7. Shiau, J.T. and Modarres, R. "Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran", *Meteorological Application*, **16**(4), pp. 481-489 (2009).
8. Hao, Z. and AghaKouchak, A. "Multivariate standardized drought index : A parametric multi-index", *Advances in Water Resources*, **57**, pp. 12-18 (2013).
9. Saghafian, B. and Mehdikhani, H. "Drought characterization using a new copula-based trivariate approach", *Nat. Hazards*, **72**(3), pp. 1391-1407 (2014).
10. Mirabasi, R., Fakhri-fard, A. and Dinpashoh, Y. "Bivariate drought frequency analysis using copula method", *Theoretical and Applied Climatology*, **108**(1-2), pp. 191-206 (2012).
11. Yoo, J., kwon, H.-H., Kim, T.-W. and Ahn, J.-H. "Drought frequency analysis using cluster analysis and bivariate probability distribution", *Journal of Hydrology*, **420-421**, pp. 102-111 (2012).
12. Favre, A.-C., El Adlouni, S., Perreault, L., Thiémonge, N. and Bobee, B. "Multivariate hydrological frequency analysis using copulas", *Water Resources Research*, **40**(1) (2004).
13. Chen, L., Singh, V.P., Guo, Sh.; Mishra, A.K. and Guo, J.K. "Drought analysis using copula", *Journal of Hydrological Engineering*, **18**, pp. 797-808 (2013).