

## اصلاح شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس تعیین مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی

مریم جمال<sup>۱</sup>، حسین ابراهیمی<sup>۲\*</sup> و حبیب موسوی جهرمی<sup>۳</sup>

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران-منابع آب، دانشگاه آزاد واحد شهر قدس، تهران، ایران.

(۲\*) دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول مکاتبات: ebrahimi165@yahoo.com

(۳) استاد دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۸/۱۴

### چکیده

عمده‌ترین روش جهت تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده از شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای (SDI) می‌باشد. این شاخص مبتنی بر فرض پیروی سری داده‌های حجم جریان رودخانه از توزیع گاما و اصل انتقال هم احتمال می‌باشد. در این تحقیق، بواسطه کاربرد سری داده‌های متوسط آبدی ماهانه و سالانه ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای وزارت نیرو، کارایی ۶۵ توزیع احتمال مورد بررسی قرار گرفت. در هر مورد توابع توزیع احتمالی مختلف بر سری داده‌های ماهانه و سالانه برازش یافته و بر اساس آزمون کلموگروف-اسمرینوف، مناسبترین توزیع احتمالی و مقدار احتمال تجمعی از آن توزیع محاسبه گردید. سپس متناظر با هر مقدار آبدی، بر اساس اصل انتقال هم احتمال، مقدار شاخص SDI از توزیع برتر و توزیع گاما محاسبه گردید. نتایج نشان داد در مقیاس سالانه توزیع گاما فاقد فراوانی به عنوان توزیع برتر می‌باشد. در مقیاس ماهانه نیز این توزیع تنها در ۱ درصد از کلیه حالات مورد بررسی به عنوان توزیع برتر شناخته شد. این در حالیست که توزیع Wakeby در مقیاس سالانه در حدود ۲۵ درصد حالات و در مقیاس ماهانه تا حدود ۴۳ درصد حالات در برخی از ماه‌ها به عنوان توزیع احتمال برتر معرفی گردید. نتایج نشان داد جابه‌جایی طبقات خشکسالی علاوه بر رتبه تابع توزیع، به میزان اختلاف شاخص P-Value از توزیع برتر و توزیع گاما، بستگی دارد. در شرایطی که مقدار شاخص P-Value از توزیع گاما کمتر از ۰/۳ باشد، امکان جابه‌جایی طبقات خشکسالی در صورت استفاده از توزیع برتر، افزایش می‌یابد. این شرایط در ۳۰ درصد از حالات مورد بررسی یافت گردید. همچنین بیشترین و کمترین میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع برتر، به ترتیب مربوط به ماه‌های آذر و اردیبهشت می‌باشد. مشخص گردید بیشترین فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی حاصل از کاربرد توزیع برتر در طبقه نرمال رخ داده است. بر این اساس توصیه می‌گردد توزیع Wakeby جایگزین توزیع گاما در محاسبات شاخص SDI گردد.

**کلید واژه‌ها:** پایش خشکسالی؛ شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI)؛ انتقال هم احتمال؛ جابه‌جایی طبقات خشکسالی

### مقدمه

مدیریت سیاسی یک کشور می‌باشد. Glantz و Wilhite (۱۹۸۵)، خشکسالی را به چهار دسته هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی طبقه‌بندی نمودند. در تمامی این تعاریف خشکسالی به یک دوره پیوسته و پایدار اطلاق می‌گردد که در آن مقدار آب موجود

پدیده خشکسالی از نظر احتمال وقوع، شدت، مدت، وسعت، خسارات اقتصادی، آسیب‌های اجتماعی و آثار شدید دراز مدت نسبت به سایر بلاای طبیعی اولویت داشته و بنابراین نیازمند توجه بیشتر در پیش‌بینی‌ها در

نمود و نشان داد این شاخص فاکتور مناسبی برای برآورد خشک سالی هیدرولوژیکی است.

اصول محاسباتی شاخص SDI کاملاً مشابه با شاخص SPI بوده، بدین ترتیب که نخست مقادیر حجم آبدهی ماهانه یک ایستگاه هیدرومتری در یک دوره زمانی مشخص به توزیع گاما برازش داده می‌شود. بر این اساس ابتدا مقادیر آبدهی ماهانه بر اساس معادله (۱) بر توزیع گاما برازش داده شده، احتمال توزیع تجمعی گاما محاسبه و سپس تغییر شکل هم احتمال توزیع تجمعی گاما به توزیع تجمعی نرمال صورت می‌گیرد. در نهایت متغیر Z نرمال استاندارد شده یا SDI رابطه (۲) مربوط به مقدار دبی در هر ایستگاه در سطوح هم احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال استخراج می‌گردد (Mishra et al., 2005) و اقتدارنژاد و همکاران، ۱۳۹۵).

$$g(x) = \frac{1}{B^\alpha \times \Gamma(\alpha)} \times x^{\alpha-1} \times e^{-x/B}, \Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (1)$$

$\alpha$  پارامتر شکل و  $\beta$  پارامتر مقیاس است.  $x$  مقدار دبی و  $\Gamma(\alpha)$  تابع گاما بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$SDI_{i,k} = \frac{Q_{i,k} - \bar{Q}_k}{SD_k} \quad (2)$$

$Q_{i,k}$  مقدار دبی در ماه  $i$  ام و مقیاس  $k$  ام (۳، ۶، ۹ تا ۴۸ ماهه)،  $\bar{Q}_k$  مقدار متوسط دبی در مقیاس  $k$  ام و  $SD_k$  انحراف معیار در مقیاس  $k$  ام می‌باشد. مقدار شاخص SDI در محدوده ۰/۴۹- تا ۰/۴۹ بیانگر شرایط نرمال، در محدوده ۰/۵ تا ۰/۹۹ بیانگر ترسالی ضعیف، در محدوده ۱ تا ۱/۴۹ بیانگر ترسالی متوسط، در محدوده ۱/۵ تا ۱/۹۹ بیانگر ترسالی شدید، در محدوده ۰/۹۹- تا ۰/۵- بیانگر شرایط خشکسالی ضعیف، در محدوده ۱/۴۹- تا ۱- بیانگر خشکسالی متوسط، در محدوده ۱/۹۹- تا ۱/۵- بیانگر خشکسالی شدید و در محدوده کمتر از ۲- بیانگر

در منطقه کاهش می‌یابد. در حال حاضر، پایش خشکسالی به صورت عمده بر مبنای داده‌های ثبت شده بارندگی صورت می‌گیرد؛ به طوری که بر اساس یک گزارش، بارندگی به تنهایی بیش از ۸۰ درصد از تغییرات شاخص خشکسالی را توصیف می‌کند (Keyantash & and Dracup, 2002). خشکسالی هیدرولوژیکی که محور اصلی مطالعه حاضر می‌باشد، به کاهش محسوس در میزان آب قابل دسترس اعم از جریان رودخانه‌ها، سطح آب مخازن و دریاچه‌ها و سطح آب سفره‌های زیرزمینی اطلاق می‌گردد. در این میان جریان رودخانه‌ای بیشترین تاثیر را بر خشکسالی هیدرولوژیکی داراست. از این رو خشکسالی هیدرولوژیکی با کاهش جریان رودخانه نسبت به شرایط نرمال ارتباط دارد (Nalbantis & Tsakiris, 2009).

آسان‌ترین روش جهت پایش انواع خشکسالی، استفاده از شاخص‌ها می‌باشد. زیرا شاخص‌ها معیاری کمی برای بیان شدت خشکسالی و شروع و پایان پدیده خشکسالی، فراهم می‌سازند (Tabari et al., 2013). شاخص‌های متعددی جهت توصیف خشکسالی هیدرولوژیکی توسعه یافته که از جمله آنها می‌توان به شاخص شدت خشکسالی پالکر (PDSI)، شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI) و شاخص کمبود منطقه‌ای (RDI) اشاره کرد. با این حال این شاخص‌ها به حجم داده‌های زیاد و حجم محاسباتی بالا نیازمندند (اقتداری و همکاران، ۱۳۹۵). بر این اساس و به دلیل نیاز به تعریف شاخصی ساده برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی، می‌توان از شاخصی ساده مشابه شاخص بارندگی استاندارد (Standardized Precipitation Index: SPI) استفاده نمود که از آن به شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI: Streamflow Drought Index) تعبیر می‌گردد. این شاخص معیاری بسیار ساده و کارا مبتنی بر متوسط جریان سطحی ماهانه محسوب می‌گردد. Nalbantis (۲۰۰۸) با استفاده از شاخص SDI، خشکسالی هیدرولوژی را در چهار مقیاس ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه محاسبه

مطالعه حاضر بر اساس سری داده‌های تاریخی متوسط آبدهی ماهانه در محل ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای وزارت نیرو، نخست کارایی توزیع تجمعی گاما را در مقیاس جریان سطحی ماهانه و سالانه مورد بررسی قرار می‌دهد. علاوه بر محاسبه رتبه و شاخص P-Value برای توزیع گاما، مناسب‌ترین توزیع به تفکیک هر ایستگاه و ماه‌های مختلف تعیین گردید. سپس بر اساس اصل انتقال هم احتمال، شاخص SDI بر مبنای کاربرد توزیع گاما و مناسب‌ترین توزیع پیش‌شناخته شده، محاسبه گردید. در نهایت تاثیر کاربرد توزیع برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما بر تغییرات مقدار P-Value و جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی، مورد بررسی قرار گرفته است.

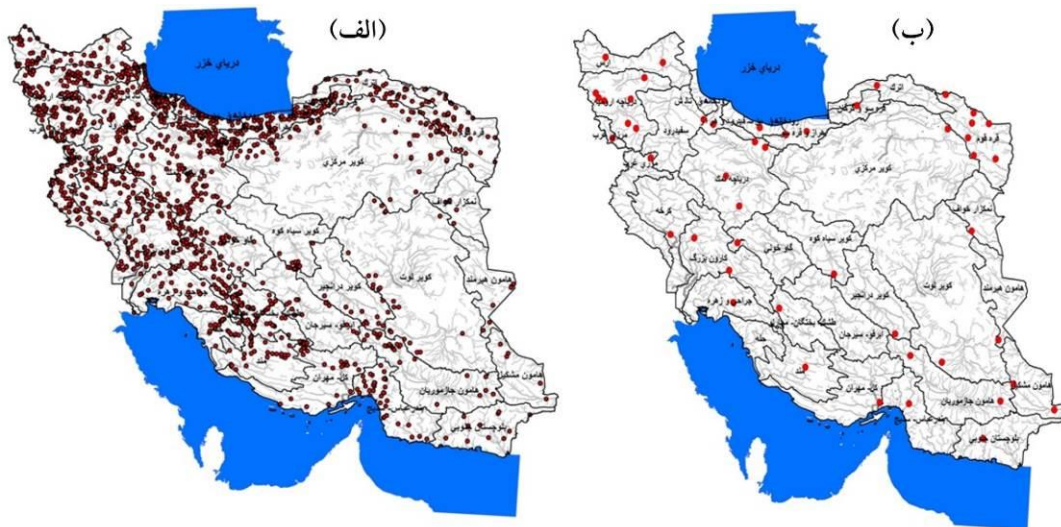
#### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی قابلیت و رتبه توزیع گاما به عنوان توزیعی احتمال مورد استفاده در شاخص SDI، شناخت توزیع برتر و نیز تاثیر کاربرد توزیع برتر در جابه‌جایی طبقات خشکسالی، از سری داده‌های تاریخی متوسط آبدهی ماهانه و سالانه متناظر با ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای وزارت نیرو طی سال‌های آبی ۲۹-۱۳۲۸ لغایت ۹۵-۱۳۹۴ استفاده شد. شکل ۱، جانمایی ۱۱۶۷ ایستگاه هیدرومتری فعال کشور و نیز موقعیت ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای محاسبات وضعیت جریان سطحی کشور را در نقشه نشان می‌دهد. ایستگاه‌های فوق با برخورداری از ویژگی‌های زیر، به صورت مستمر جهت ارزیابی ماهانه گزارش وضعیت جریان سطحی کشور مورد استفاده واقع می‌گردند: (الف) در هر حوضه آبریز اصلی، مجموع مساحت ایستگاه‌های مبنای، حتی‌الامکان ۵۰ درصد مساحت حوضه را شامل گردد. (ب) مجموع آبدهی ایستگاه‌های منتخب در مجموع حدود ۶۰ درصد پتانسیل جریان سطحی کشور را شامل گردد. (ج) مجموع مساحت کل ایستگاه‌های هیدرومتری مبنای، در حدود ۲۰ درصد مساحت کشور را تشکیل می‌دهد.

خشکسالی بسیار شدید می‌باشد (Edwards & McKee, 1997).

در حال حاضر کاربرد شاخص SDI مبتنی بر فرض پیروی داده‌های جریان سطحی ماهانه از توزیع گاما می‌باشد. در نتیجه هرگونه عدم پیروی مناسب سری داده‌های متوسط آبدهی ماهانه از توزیع گاما، می‌تواند پایش خشکسالی هیدرولوژیکی را با نقص مواجه ساخته و احتمالاً سبب جابه‌جایی طبقات خشکسالی گردد. تحقیقات نشان داده است که در حوضه‌های آبریز کوچک توزیع گاما و در حوضه‌های آبریز بزرگ‌تر، توزیع لوگ نرمال یا لوگ نرمال دو متغیره، بهترین برازش را برای سری متوسط آبدهی ماهانه داراست (Shukla & Wood, 2008) و (Nalbantis & Tsakiris, 2009).

اخیراً مطالعاتی پیرامون بررسی امکان انحراف سری داده‌های بارندگی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی از توزیع تجمعی گاما و تاثیر آن بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی در محاسبه شاخص SPI انجام شده است. مساعدی و قبائی سوق (۱۳۹۰)، بر اساس مقادیر بارش سالانه ثبت شده در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک کشور، عدم کارایی تابع توزیع گاما در برازش مناسب مقادیر بارش جز در یک ایستگاه و در مقیاس سالانه را گزارش نمودند. ایشان بیان داشتند امکان جابه‌جایی طبقات خشکسالی بر اساس کاربرد توزیع برتر جهت محاسبه شاخص اصلاح شده SPI نسبت به کاربرد سنتی توزیع گاما در برخی از ایستگاه‌ها خواهد شد. الیاسی و همکاران (۱۳۹۵)، کارایی توزیع‌های مختلف احتمال را در برازش مناسب سری داده‌های متوسط بارندگی و سالانه حوضه‌های آبریز اصلی و فرعی کشور به منظور پایش خشکسالی هواشناسی و محاسبه SPI صحیح شاخص مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان دهنده برتری قابل توجه تابع توزیع احتمال Wakeby در پیش بینی بارش ماهانه در حوضه‌ها می‌باشد. در مقیاس سالانه نیز توزیع Wakeby برای ۳۰ درصد از حوضه‌ها، بهترین توزیع بوده است.



شکل ۱. الف- جانمایی ۱۱۶۷ ایستگاه هیدرومتری کشور، ب- جانمایی ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای محاسبات وضعیت جریان سطحی کشور.

داده‌های مشاهداتی و توزیع احتمالاتی مورد نظر، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

در گام بعد بر اساس تابع توزیع گاما، مقدار شاخص SDI محاسبه و سپس مقدار اصلاح شده شاخص مذکور بر اساس توزیع برتر شناسایی شده، تعیین گردید. این فرآیند به تفکیک هر ایستگاه و بر اساس سری داده‌های آبدهی ماهانه و متوسط آبدهی سالانه، تکرار شد. به منظور شناسایی توزیع برتر، محاسبه پارامترهای توزیع گاما و توزیع برتر و تعیین مقدار P-Value در هر حالت، از نرم‌افزار EasyFit 5.5 Professional استفاده شد. شایان ذکر است که تعیین شاخص SDI از توزیع گاما و توزیع احتمال برتر، به صورت نقطه‌ای و متناظر با هر داده آبدهی از نرم‌افزار فوق ممکن می‌باشد. با اینحال محاسبه سریع شاخص SDI برای سری داده‌ها از نرم افزار فوق مستقیماً ممکن نبوده و برای این منظور از افزونه EasyFitXL در محیط صفحه گسترده اکسل استفاده شد.

## نتایج و بحث

### نتایج انتخاب مناسبترین توزیع احتمال

جدول ۱ نتایج انتخاب مناسبترین توزیع برآزش یافته بر سری داده‌های آبدهی سالانه به تفکیک هر ایستگاه را به

در گام نخست مطالعه حاضر، بر اساس متوسط سالانه و ماهانه ثبت شده آبدهی در ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای رتبه توزیع گاما تعیین و علاوه بر آن مناسبترین توزیع احتمال برآزش دهنده به تفکیک هر ماه و ایستگاه، تعیین شد. برای این منظور در این تحقیق ۶۵ تابع توزیع احتمال مختلف در برآزش مقادیر آبدهی ماهانه و سالانه ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای مورد بررسی قرار گرفت. جهت رتبه‌بندی توزیع‌های احتمال مختلف و بررسی نکوتی برآزش با داده‌های بارش اندازه‌گیری شده، از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده گردید. خاطر نشان می‌گردد که امکان مقایسه بر اساس سایر معیارها از جمله معیارهای اندرسون دارلینگ و کای اسکور نیز وجود دارد. در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، فرض صفر آن است که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر حاصل از توزیع محاسباتی و داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. با انتخاب فرض صفر و یک سطح اعتماد، مقادیر تخمین‌زده شده از توزیع‌های مختلف با مقادیر مشاهداتی مقایسه و قدرمطلق حداکثر اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی ( $D_{max}$ ) محاسبه می‌گردد. سپس با توجه به سطح اعتماد و تعداد نمونه‌ها، مقدار بحرانی ( $D_c$ ) استخراج می‌گردد. چنانچه  $D_{max} < D_c$  فرض صفر در سطح اعتماد انتخابی صحیح بوده و بین

به عنوان یک نتیجه دیگر از جدول ۱ می‌توان مشاهده نمود، در مقایسه با سایر توزیع‌های احتمالی، توزیع Wakeby از قابلیت بیشتری جهت برازش آمار متوسط آبدهی سالانه برخوردار می‌باشد. در این بین، توزیع Wakeby در ۱۷ ایستگاه از ۴۸ ایستگاه (۳۵/۴ درصد از کلیه حالات) به عنوان توزیع برتر شناخته شد.

در یک بررسی دیگر و به صورت مشابه و بواسطه کاربرد سری داده‌های آبدهی ماهانه در ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای توزیع احتمالی برازش‌دهنده برتر، رتبه توزیع گاما و نیز مقادیر P-Value از توزیع گاما و توزیع برتر، تعیین گردید. شکل ۲، فراوانی ۶۵ توزیع احتمالی مختلف را در برازش سری داده‌های آبدهی ماهانه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد از مجموع ۵۷۶ حالت مورد بررسی (۱۲ سری آمار ماهانه مربوط به ۴۸ ایستگاه)، تنها در ۶ حالت (در حدود یک درصد حالات)، توزیع گاما به عنوان توزیع برتر شناخته شده است. همچنین توزیع احتمال Wakeby در ۱۷۷ حالت (معادل ۳۱ درصد کلیه حالات) به عنوان توزیع برتر برازش‌دهنده سری داده‌های آبدهی ماهانه شناخته شده است.

جدول ۲، مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال برازش‌دهنده سری داده‌های آبدهی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری را در ۵۷۶ حالت مختلف، ارائه نموده است. مشاهده می‌گردد در تمامی ماه‌ها، توزیع از بیشترین میزان فراوانی جهت برازش سری آمار متوسط آبدهی ماهانه، برخوردار است. درصد فراوانی توزیع Wakeby به عنوان توزیع برتر آماری بر اساس داده‌های آبدهی متوسط ماهانه در ماه‌های مهر (۴۲/۶ درصد)، آبان (۳۱/۹ درصد)، آذر (۲۷/۷ درصد)، دی (۳۸/۳ درصد)، بهمن (۳۱/۳ درصد)، اسفند (۲۶ درصد)، فروردین (۴۰ درصد)، اردیبهشت (۳۶/۷ درصد)، خرداد (۲۵ درصد)، تیر (۲۳/۹ درصد)، مرداد (۲۵/۵ درصد) و شهریور (۲۵/۵ درصد) بدست آمد. در نتیجه کمترین و بیشترین درصد فراوانی توزیع Wakeby به عنوان توزیع برتر به ترتیب مربوط به ماه‌های تیر و مهر، می‌باشد.

همراه مقادیر P-Value متناظر با توزیع گاما و توزیع برتر بر اساس آزمون کلموگراف-اسمرینوف و مناسب‌ترین توزیع احتمال را نشان می‌دهد. در این جدول همچنین رتبه توزیع گاما و نیز ثابت‌های تجربی متناظر با بهترین توزیع نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها مورد بررسی، توزیع گاما جهت برازش داده‌های متوسط آبدهی سالانه به عنوان بهترین توزیع شناخته نشده است. رتبه توزیع گاما در بهترین حالت برابر ۳ (ایستگاه تله زنگ) می‌باشد. با این حال از ۶۵ توزیع احتمال مورد بررسی، رتبه توزیع گاما در ایستگاه قلات پایین برابر ۵۴ نیز شناخته شده است.

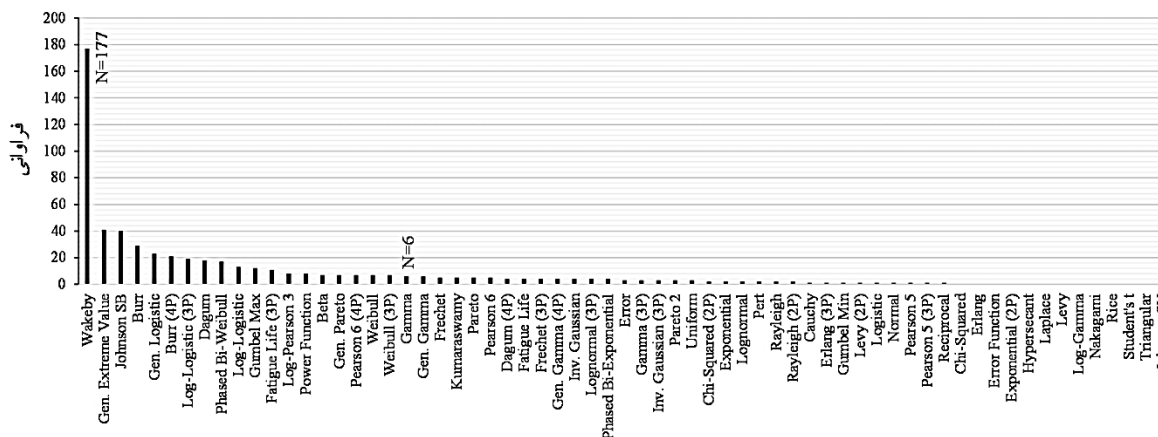
از جدول ۱ مشاهده می‌گردد مقدار شاخص P-Value متناظر با توزیع گاما بر اساس سری آبدهی سالانه از حدود صفر در ایستگاه چمریز تا ۰/۹۹۳ در ایستگاه کره‌سنگ تغییر می‌نماید. با در نظر گرفتن مقادیر P-Value کمتر از ۰/۳ به عنوان حد عدم کارایی توزیع احتمال جهت پایش وضعیت خشکسالی، ملاحظه می‌گردد توزیع گاما، جهت برازش سری داده‌های آبدهی سالانه در ایستگاه‌های قلات پایین، باقرآباد، چمریز، دامن، فخرآباد، اریه، اسفندک و منصورآباد، قابل اعتماد نمی‌باشد. در این میان جز در ایستگاه فخرآباد، در سایر ایستگاه‌های فوق‌الذکر، انتخاب توزیع احتمال برتر، افزایش قابل توجهی در میزان شاخص P-Value به همراه داشته که می‌تواند سبب بهبود صحت پایش وضعیت خشکسالی با کاربرد توزیع برتر گردد.

از جدول ۱ ملاحظه می‌گردد شاخص P-Value از توزیع برتر در دو ایستگاه چمریز و فخرآباد ناچیز و به ترتیب در حدود ۰/۰۲۰ و ۰/۰۵۹ می‌باشد. همچنین توزیع احتمال مناسبی جهت برازش داده‌های متوسط آبدهی سالانه در ایستگاه گوربند شناسایی نگردید. دلیل این امر تعدد وجود داده‌های صفر آبدهی سالیانه در ایستگاه گوربند می‌باشد. لذا پایش وضعیت خشکسالی سالانه در ایستگاه‌های فوق از روش معمول، با مشکل مواجه است.

جدول ۱. توزیع برتر شناخته شده و ثابت‌های تجربی متناظر آن، رتبه توزیع گاما بر اساس برازش سری داده‌های آبدهی سالانه

ردیف	رودخانه	ایستگاه	نام توزیع برتر	P-Value توزیع برتر	رتبه توزیع گاما	P-Value توزیع گاما	پارامترهای توزیع برتر داده‌های آبدهی سالانه
1	اترک	مراوتپه	Wakeby	0.993	33	0.352	$\alpha=155.38 \quad \beta=47.714 \quad \gamma=4.7912 \quad \delta=0.0766 \quad \zeta=0$
2	گرگانرود	گنبد	Gumbel Max	0.990	8	0.990	$\sigma=2.7555 \quad \mu=5.146$
3	تجن	ریگ چشمه	Wakeby	0.990	5	0.950	$\alpha=319.34 \quad \beta=50.432 \quad \gamma=5.548 \quad \delta=-0.54239 \quad \zeta=0$
4	هراز	کره سنگ	Beta	0.996	4	0.993	$\alpha_1=3.9448 \quad \alpha_2=21.189 \quad a=11.352 \quad b=130.14$
5	چالوس	پل ذغال	Wakeby	0.937	25	0.714	$\alpha=40.143 \quad \beta=12.468 \quad \gamma=5.0823 \quad \delta=-0.20712 \quad \zeta=5.7756$
6	قزل اوزن	گیلوان	Wakeby	0.991	13	0.830	$\alpha=143.25 \quad \beta=2.2206 \quad \gamma=30.844 \quad \delta=0.18489 \quad \zeta=10.197$
7	شاهرود	لوشان	Wakeby	0.990	29	0.376	$\alpha=52.199 \quad \beta=1.7057 \quad \gamma=1.2617 \quad \delta=0.69842 \quad \zeta=5.8544$
8	قطورچای	مراکند	Wakeby	0.999	19	0.682	$\alpha=16.048 \quad \beta=1.0041 \quad \gamma=0.04971 \quad \delta=0.90283 \quad \zeta=0.09238$
9	دره رود	مشیران	Gen. Pareto	0.947	15	0.530	$k=-0.52538 \quad \sigma=16.858 \quad \mu=2.1244$
10	ذاب	بریسو	Wakeby	0.941	18	0.475	$\alpha=141.69 \quad \beta=6.8149 \quad \gamma=12.094 \quad \delta=0.15735 \quad \zeta=13.17$
11	قشلاق	خلیفه ترخان	Wakeby	0.976	19	0.883	$\alpha=86.258 \quad \beta=66.114 \quad \gamma=2.5455 \quad \delta=-0.35892 \quad \zeta=-0.65649$
12	کرخه	جلوگیر	Dagum	0.999	19	0.923	$k=0.3012 \quad \alpha=5.2389 \quad \beta=192.53$
13	کارون	کارون ۳	Pearson 5	0.894	31	0.503	$\alpha=7.4611 \quad \beta=1933.4$
14	دز	تله زنگ	Pert	0.928	3	0.895	$m=183.02 \quad a=85.416 \quad b=582.29$
15	مارون	بهبهان	Wakeby	0.992	5	0.953	$\alpha=44.344 \quad \beta=13.601 \quad \gamma=39.013 \quad \delta=-0.26956 \quad \zeta=12.228$
16	مند	تنگ کارزین	Erlang (3P)	0.999	24	0.888	$m=1 \quad \beta=11.967 \quad \gamma=1.779$
17	کل	قلات پائین	Burr	0.980	54	0.000	$k=0.77059 \quad \alpha=2.0903 \quad \beta=4.1839$
18	میناب	برنطین	Wakeby	0.999	11	0.969	$\alpha=6.8352 \quad \beta=3.4344 \quad \gamma=5.4265 \quad \delta=0.16214 \quad \zeta=-0.01999$
19	سرباز	پیشین	Wakeby	0.955	18	0.589	$\alpha=-6.3178 \quad \beta=2.0212 \quad \gamma=6.6374 \quad \delta=0.26755 \quad \zeta=0$
20	آجی چای	مرکید	Beta	0.944	37	0.399	$\alpha_1=0.65592 \quad \alpha_2=0.94447 \quad a=0.61 \quad b=12.566$
21	صوفی چای	تازه کند	Frechet (3P)	0.980	28	0.833	$\alpha=1.0704E+8 \quad \beta=1.0543E+8 \quad \gamma=-1.0543E+8$
22	زربینه رود	ساری قمیش	Wakeby	0.990	24	0.660	$\alpha=157.22 \quad \beta=6.0192 \quad \gamma=18.584 \quad \delta=0.11341 \quad \zeta=5.3023$
23	سیمینه رود	دائشبند	Gen. Gamma (4P)	0.988	22	0.899	$k=0.63017 \quad \alpha=4.4256 \quad \beta=1.0966 \quad \gamma=1.4703$
24	بارندوزچای	بابارود	Gamma (3P)	0.993	14	0.977	$\alpha=5.2531 \quad \beta=1.6371 \quad \gamma=1.0678$
25	شهرچای	بند ارومیه	Wakeby	0.994	18	0.940	$\alpha=6.6852 \quad \beta=3.29 \quad \gamma=2.1751 \quad \delta=-0.10771 \quad \zeta=1.187$
26	نازلو چای	تپیک	Burr	0.994	16	0.916	$k=1.3375 \quad \alpha=3.1583 \quad \beta=11.498$
27	قمرود	باقرآباد	Fatigue Life (3P)	0.735	43	0.047	$\alpha=2.5349 \quad \beta=0.43032 \quad \gamma=0.06316$
28	وفرقان	جلایر	Johnson SB	0.973	31	0.442	$\gamma=0.56424 \quad \delta=0.52049 \quad \lambda=18.327 \quad \zeta=0.41176$
29	کرج	سیرا	Wakeby	0.997	14	0.827	$\alpha=19.625 \quad \beta=3.2719 \quad \gamma=1.4386 \quad \delta=0.24005 \quad \zeta=5.84$
30	جاجرود	رودک	Wakeby	1.000	18	0.944	$\alpha=16.934 \quad \beta=5.1661 \quad \gamma=1.4573 \quad \delta=0.13086 \quad \zeta=2.985$
31	زاینده رود	قلعه شاهرخ	Phased Bi-Weibull	0.882	14	0.598	$\alpha_1=0.92941 \quad \beta_1=41.677 \quad \gamma_1=21$ $\alpha_2=1.3911 \quad \beta_2=21.322 \quad \gamma_2=5.532$
32	کر	چمریز	Pearson 6	0.020	28	0.000	$\alpha_1=0.86914 \quad \alpha_2=0.96662 \quad \beta=0.70829$
33	کارواندر	دامن	Wakeby	0.925	41	0.003	$\alpha=0 \quad \beta=0 \quad \gamma=1.0833 \quad \delta=0.38219 \quad \zeta=0.20189$
34	هللی رود	کناروئیه	Weibull	0.908	32	0.351	$\alpha=0.76737 \quad \beta=8.8634$
35	نساء	یالخری	Johnson SB	0.958	31	0.540	$\gamma=1.5542 \quad \delta=0.76835 \quad \lambda=23.56 \quad \zeta=1.2209$
36	لاله زار	جعفرآباد	Exponential (2P)	0.929	22	0.533	$\lambda=0.8968 \quad \gamma=0.065$
37	فخرآباد	فخرآباد	Uniform	0.059	29	0.001	*
38	بار	اریه	Dagum	0.988	34	0.223	$k=1.1157 \quad \alpha=3.0634 \quad \beta=0.48464$
39	مشکیل	اسفندک	Gen. Extreme Value	0.996	38	0.133	$k=0.61659 \quad \sigma=1.1979 \quad \mu=0.91606$

ردیف	رودخانه	ایستگاه	نام توزیع برتر	P-Value توزیع برتر	رتبه توزیع گاما	P-Value توزیع گاما	پارامترهای توزیع برتر داده‌های آبدی سالانه
40	سیانجاه	لادیز	Gen. Pareto	0.964	5	0.914	$k=-0.18256 \quad \sigma=0.20906 \quad \mu=0.02071$
41	گوربند	گوربند					خشک در ۱۸ سال از ۲۲ سال طول دوره آماری ماهانه
42	فخررود	منصورآباد	Log-Logistic (3P)	0.988	33	0.235	$\alpha=0.80805 \quad \beta=0.00912 \quad \gamma=0.002$
43	فریمان	باغ عباسی	Gen. Pareto	0.967	27	0.606	$k=-5.5495E-4 \quad \sigma=0.53328 \quad \mu=0.11475$
44	تیمنک	تیمنک	Gen. Extreme Value	0.972	26	0.513	$k=0.4228 \quad \sigma=0.03683 \quad \mu=0.02919$
45	طرق	کرتیان	Frechet (3P)	0.998	14	0.883	$\alpha=3.4345 \quad \beta=0.79609 \quad \gamma=-0.4975$
46	کارده	کارده بالا	Log-Logistic (3P)	0.999	25	0.899	$\alpha=2.3069 \quad \beta=0.37129 \quad \gamma=0.09405$
47	چهچه	چهچه	Frechet (3P)	0.999	11	0.989	$\alpha=5.4024 \quad \beta=1.2285 \quad \gamma=-0.85836$
48	دربند	کلات نادری	Johnson SB	0.991	4	0.986	$\gamma=1.5626 \quad \delta=0.9681 \quad \lambda=1.3415 \quad \zeta=0.0486$
49	درونگر	محمد تقی بیگ	Wakeby	0.997	29	0.837	$\alpha=0.38764 \quad \beta=4.4678 \quad \gamma=0.48265 \quad \delta=-0.04681 \quad \zeta=1.0064$



شکل ۲. فراوانی توزیع‌های مختلف احتمالی در برازش سری داده‌های آبدی ماهانه ایستگاه هیدرومتری مینا

جدول ۲. مناسبترین توزیع احتمال و درصد فراوانی توزیع منتخب احتمالی بر اساس سری داده‌های آبدی ماهانه ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مینا

ماه/ نام توزیع	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
توزیع منتخب	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby
درصد												
فراوانی توزیع منتخب	42.6	31.9	27.7	38.3	31.3	26.0	40.0	36.7	25.0	23.9	25.5	25.5

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} \left( 1 - (1-F)^\beta \right) - \frac{\gamma}{\delta} \left( 1 - (1-F)^{-\delta} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $F$  مقدار احتمال تجمعی و  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  و  $\xi$ ، ثابت‌های تابع توزیع احتمال می‌باشند.

یک دلیل عمده انتخاب توزیع Wakeby به عنوان مناسبترین توزیع، وجود پنج ثابت در تابع می‌باشد که آن را به تابعی انعطاف‌پذیر برای سری‌های مختلف آماری، تبدیل می‌نماید. تابع توزیع احتمال Wakeby بر اساس معادله زیر، بیان می‌گردد:

می‌شود. بر این اساس وضعیت رطوبتی بر اساس توزیع گاما در شرایط ترسالی ضعیف و بر اساس توزیع Wakeby در شرایط ترسالی متوسط قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تاثیر تابع توزیع احتمال بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی است.

- به ازای مقادیر آبدهی کمتر و دبی معادل ۰/۱۵ مترمکعب در ثانیه، شاخص SDI از توزیع گاما و توزیع برتر به ترتیب معادل ۰/۱۹۹- و ۱/۱۳۷- حاصل می‌شود. بر این اساس وضعیت خشکسالی بر اساس توزیع گاما در شرایط نرمال و بر اساس توزیع Wakeby در شرایط خشکسالی متوسط قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تاثیر تابع توزیع احتمال بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی است.

ملاحظه می‌گردد در محدوده مقادیر دبی‌های کمتر، کاربرد توزیع احتمال برتر، سبب تشدید میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی می‌گردد.

جدول ۳ فراوانی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در طبقات مختلف بر اساس کاربرد توزیع گاما و توزیع احتمال برتر و بر مبنای سری داده‌ها آماری آبدهی دی‌ماه ایستگاه چهچهه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد کاربرد توزیع احتمال برتر، از ۳۳ سال طول دوره آماری، در ۲۶ حالت سبب جابه‌جایی طبقات خشکسالی نسبت به کاربرد توزیع گاما گردیده است.

تحلیل فوق، ضرورت تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع را پیش از محاسبه شاخص SDI برای یک سری دلخواه از داده‌های آبدهی، تبیین می‌کند. تشخیص نیاز به جایگزینی توزیع گاما با توزیع احتمال برتر، ممکن است بر اساس رتبه توابع توزیع احتمال مختلف، انجام شود. شکل ۴ نمونه تاثیر کاربرد توزیع گاما و توزیع احتمال برتر را بر تغییرات شاخص SDI بر اساس سری داده‌های آبدهی سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری محمد تقی بیگ، اسفندک، قلات پایین و دامن را نشان می‌دهد.

در بررسی توزیع‌های احتمال متناظر با سری داده‌های آبدهی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری، حالاتی یافت گردید که توزیع برتر شناخته شده نیز مقدار P-Value قابل توجهی بدست نمی‌دهد. بررسی سری آمار آبدهی ماهانه در این حالات نشان دهنده سهم قابل توجه وجود داده‌های صفر در سری تاریخی داده‌های ثبت شده می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت استفاده از شاخص SDI برای پایش وضعیت خشکسالی از روش معمول و حتی در صورت استفاده از توزیع برتر آماری برای رودخانه‌های فصلی یا تحت تاثیر جریان‌های تنظیمی (تکرار وجود داده‌های صفر یا کم آبده)، ممکن است نتایج قابل اعتمادی ارائه ننماید. در این حالت نیاز به بازنگری شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی در رودخانه‌های فصلی، احساس می‌شود.

#### نتایج تصحیح شاخص SDI بر اساس توزیع برتر آماری و شناسایی میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی

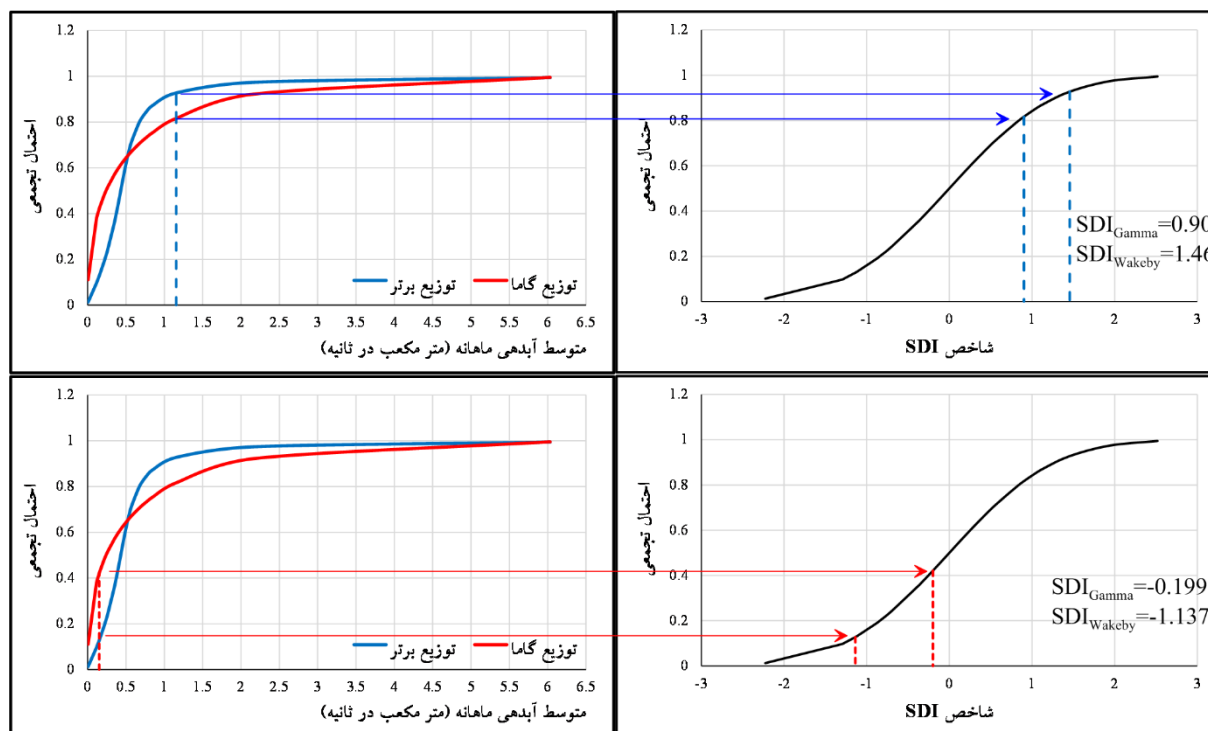
تعیین شاخص SDI بر پایه کاربرد مناسب‌ترین توزیع احتمال می‌تواند منجر به جابه‌جایی طبقات خشکسالی نسبت به شرایط کاربرد توزیع گاما گردد. در یک حالت نمونه، سری داده‌های آماری آبدهی ایستگاه هیدرومتری چهچهه در ماه دی مورد استفاده قرار گرفت. برازش توزیع گاما برای سری داده‌های مذکور، شاخص P-Value در حدود ۰/۰۰۰۴ و رتبه توزیع گاما معادل ۴۴ ارائه می‌نماید. مناسب‌ترین توزیع احتمال برازش‌دهنده سری داده‌های آبدهی ماه دی در ایستگاه هیدرومتری چهچهه نیز توزیع Wakeby و شاخص P-Value آن در حدود ۰/۹۵ بدست آمد. شکل ۳، نمونه تاثیر کاربرد توزیع برتر بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی برای سری داده‌های آبدهی ماهانه ایستگاه چهچهه را نشان می‌دهد. بر این اساس:

- به ازای مقادیر آبدهی بیشتر و دبی معادل ۱/۱۵۵ مترمکعب در ثانیه، شاخص SDI از توزیع گاما و توزیع برتر به ترتیب معادل ۰/۹۰ و ۱/۴۶ حاصل



قابل توجه توزیع گاما نسبت به توزیع برتر، کاربرد توزیع گاما، جابه‌جایی قابل توجهی در طبقات خشکسالی نسبت توزیع برتر، به دنبال داشته است. با اینحال مقدار شاخص P-Value از توزیع گاما و توزیع برتر به ترتیب

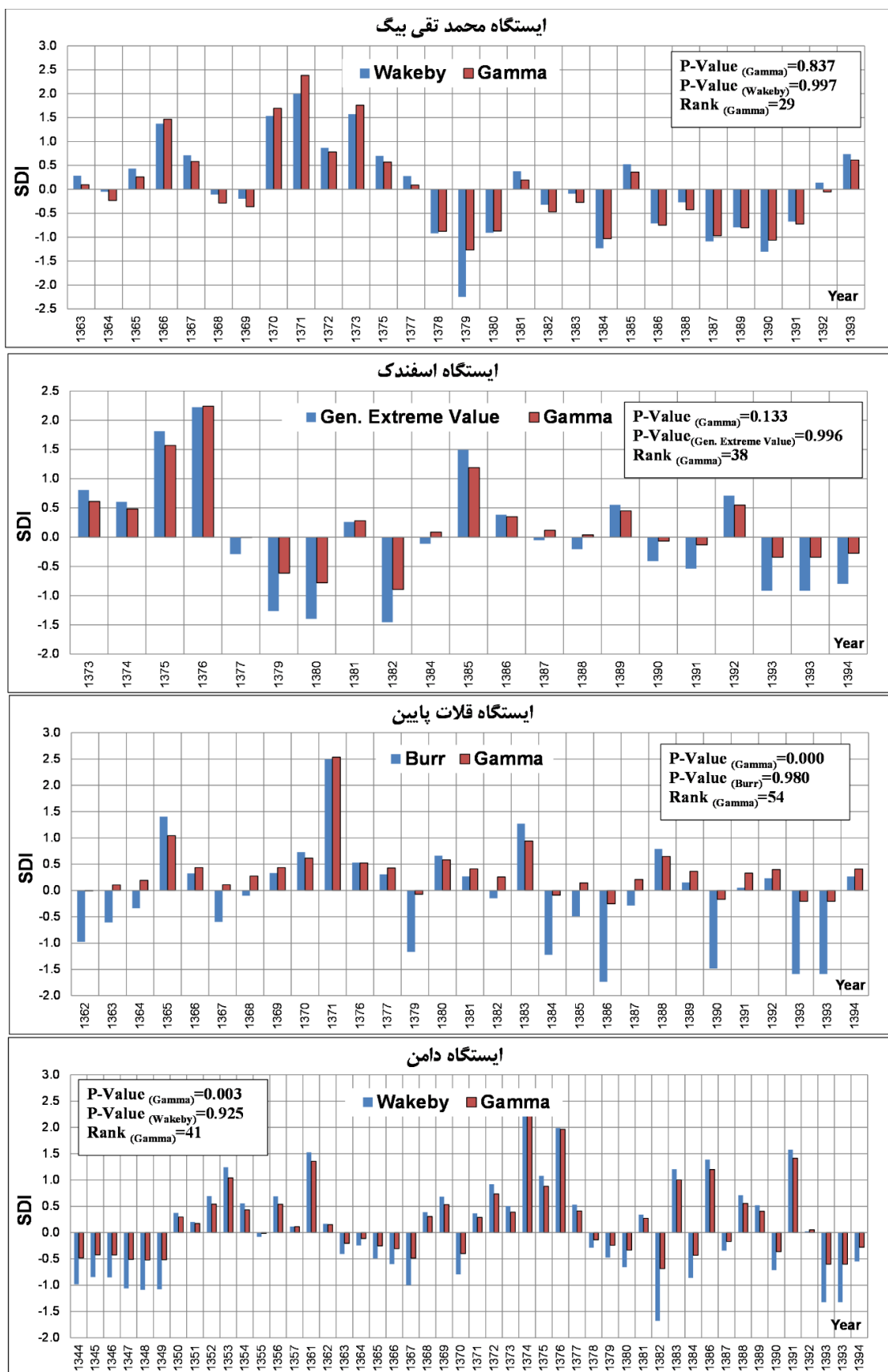
از شکل ۴ و جدول ۱ بر اساس سری داده‌های آبدهی سالانه ایستگاه محمد تقی‌بیگ، توزیع احتمال Wakeby به عنوان توزیع برتر و توزیع گاما با رتبه ۲۹ شناخته شده است. از شکل ۴ ملاحظه می‌گردد علی‌رغم اختلاف رتبه



شکل ۳. تاثیر کاربرد توزیع احتمال برتر بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی بر مبنای سری آمار آبدهی دی‌ماه ایستگاه چهچهه.

جدول ۳. فراوانی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس کاربرد توزیع گاما و توزیع احتمال برتر بر مبنای سری آمار آبدهی دی‌ماه ایستگاه چهچهه

توصیف وضعیت	بازه شاخص SDI	فراوانی حالات از توزیع برتر	فراوانی حالات از توزیع گاما	فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲	۱	۱	۰
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱	۰	۱
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹	۵	۱	۴
ترسالی ضعیف	۰/۵ تا ۰/۹۹	۳	۷	۴
نرمال	۰/۴۹ تا ۰/۴۹	۱۴	۲۳	۹
خشکسالی ضعیف	۰/۵ تا ۰/۹۹	۳	۰	۳
خشکسالی متوسط	۱/۴۹ تا ۱	۵	۱	۴
خشکسالی شدید	۱ تا ۱/۵	۰	۰	۰
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از ۲	۱	۰	۱
مجموع		۳۳	۳۳	۲۶



شکل ۴. نمونه مقایسه تغییرات شاخص SDI از توزیع گاما و توزیع احتمال برتر بر اساس سری داده‌های آبدهی سالانه.

مقدار P-Value از توزیع گاما کمتر از ۰/۳ بوده و توزیع برتر متناظر مقدار P-Value مناسب و حدوداً بیشتر از ۰/۶ را ارائه می‌نماید، امکان جابه‌جایی طبقات خشکسالی تشدید می‌گردد. جدول ۴ جمع‌بندی حالاتی است که مقدار P-Value از توزیع احتمال برتر بیشتر از ۰/۶ و مقدار این شاخص از توزیع گاما کمتر از ۰/۳ می‌باشد. از جدول ۴ ملاحظه می‌گردد از ۵۶۴ حالت مورد بررسی، در ۱۷۳ حالت مختلف در ترکیب‌های ماه-ایستگاه (در حدود ۳۱ درصد حالات)، جابه‌جایی در طبقات ۹ گانه خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع فراوانی برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما، قابل بررسی است.

بیشترین و کمترین میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس ماهانه به ترتیب در ماه‌های آذر (۲۵ ایستگاه) و اردیبهشت (۸ ایستگاه) مورد انتظار است. در مقیاس ایستگاه‌های هیدرومتری مبنا نیز بیشترین میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی در ایستگاه باقرآباد قابل انتظار است؛ به طوری که در تمامی ماه‌ها، تفاوت مقادیر P-Value از توزیع گاما و توزیع برتر قابل توجه است. کمترین میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی حاصل از کاربرد توزیع برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما نیز در ایستگاه‌های تپیک و تازه‌کند، قابل انتظار است؛ به طوری که اختلاف چندانی بین مقادیر P-Value از توزیع گاما و توزیع برتر در تمامی ماه‌ها در دو ایستگاه فوق‌الذکر وجود ندارد.

با در نظر گرفتن تفاوت طول دوره آماری ۴۷ ایستگاه هیدرومتری مبنا، در مجموع ۷۰۰۵ داده آبدهی ماهانه، متناظر با جدول ۴، قابل بررسی است. در هر مورد بر اساس برآزش توزیع گاما و مناسب‌ترین توزیع احتمال پیش‌شناخته شده، شاخص SDI بر مبنای دو توزیع محاسبه و مشابه با جدول ۳، فراوانی طبقات خشکسالی از دو روش محاسبه گردید.

معادل ۰/۸۳۷ و ۰/۹۹۷ بدست آمده است. در نتیجه اختلاف در شاخص P-Value از توزیع برتر نسبت به توزیع گاما تنها در حدود ۰/۱۶۰ می‌باشد. بر این اساس رتبه برتر توزیع احتمال نسبت به توزیع گاما، لزوماً نمی‌تواند منجر به جابه‌جایی طبقات خشکسالی گردد. با اینحال، میزان جابه‌جایی طبقات خشکسالی ارتباط مستقیم با اختلاف مقادیر شاخص P-Value از توزیع برتر و توزیع گاما دارد.

از شکل ۴ ملاحظه می‌گردد تفاوت در شاخص SDI و جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی (در نظام طبقه‌بندی ۹ گانه)، بویژه هنگامی که مقدار P-Value از توزیع گاما کمتر از ۰/۱ می‌باشد، تشدید می‌گردد. یک نتیجه مهم دیگر از شکل ۴ آن است که کاربرد توزیع برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما، سبب کاهش شاخص SDI شده که بیانگر جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی به شرایط خشکسالی شدیدتر از توزیع آماری برتر، می‌گردد. از سویی کاربرد توزیع گاما عمدتاً سبب افزایش مقدار محاسبه شده شاخص SDI و پایش وضعیت خشکسالی-ترسالی نزدیک به طبقه نرمال می‌گردد.

به منظور بررسی تاثیر کاربرد توزیع احتمال برتر بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی، لازم است مقدار شاخص SDI بر اساس کاربرد توزیع گاما و توزیع احتمال برتر به تفکیک هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری مبنا و در مقیاس ماهانه انجام شود. همچنان‌که پیش از این مطرح شد در ایستگاه‌های فخرآباد و گوربند به دلیل وجود سری داده‌های خشک قابل توجه، عملاً امکان شناسایی توزیع آماری برتر و محاسبه SDI جهت شناسایی صحیح طبقه خشکسالی، فراهم نمی‌باشد. در نتیجه فرآیند محاسبه شاخص SDI بر اساس تصحیح گاما و نیز تصحیح آن بر اساس توزیع برتر، در ۵۶۴ حالت (۱۲ ماه در ۴۷ ایستگاه) انجام شد.

از مجموعه بررسی‌ها ملاحظه گردید در مواردی که

جدول ۴. فراوانی حالات با امکان جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی (طبقات ۹ گانه) حاصل از کاربرد توزیع فراوانی برتر به جای توزیع گاما در محاسبه SDI

فراوانی	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	ایستگاه	رودخانه	ردیف
۱۲	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	باقرآباد	قمرود	۱
۱۱	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	دامن	کارواندر	۲
۹				*	*	*	*	*	*	*	*	*	قلات پائین	کل	۳
۸	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	جلایر	وفرقان	۴
۷	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	اریه	بار	۵
۶	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	تنگ کارزین	مند	۶
۶			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کناروئیه	هلایل رود	۷
۶	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	لادیز	سیانجا	۸
۵		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	لوشان	شاهرود	۹
۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	مراکند	قطورچای	۱۰
۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بهبهان	مارون	۱۱
۵			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	برنطین	میناب	۱۲
۵	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بند ارومیه	شهرچای	۱۳
۵			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	باغ عباسی	فریمان	۱۴
۴	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	گنبد	گرگانرود	۱۵
۴			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	پل ذغال	چالوس	۱۶
۴	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	سیرا	کرج	۱۷
۴			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	یالخری	نساء	۱۸
۴			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	جعفرآباد	لاله زار	۱۹
۳	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کره سنگ	هراز	۲۰
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بریسو	ذاب	۲۱
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	خلیفه ترخان	قتشلاق	۲۲
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	جلوگیر	کرخه	۲۳
۳	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کارون ۳	کارون	۲۴
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	تله زنگ	دز	۲۵
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ساری قمیش	زرینه رود	۲۶
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	قلعه شاهرخ	زاینده رود	۲۷
۳	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	منصورآباد	فخررود	۲۸
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	تیمنک	تیمنک	۲۹
۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کرتیان	طرق	۳۰
۳	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	چهچه	چهچه	۳۱
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	گیلوان	قزل اوزن	۳۲
۲	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	پیشین	سرباز	۳۳
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	داشبند	سیمینه رود	۳۴
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	رودک	جاجرود	۳۵
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	چمریز	کر	۳۶
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	اسفندک	مشکیل	۳۷
۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کارده بالا	کارده	۳۸
۲	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	کلات نادری	دریند	۳۹

ردیف	ایستگاه	ماه	ژرسالی بسیار شدید	ژرسالی شدید	ژرسالی متوسط	ژرسالی ضعیف	ژرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید	مجموع فراوانی	تعداد سال دوره آماری ایستگاه	نسبت مجموع فراوانی جابه جایی طبقات به تعداد کل دوره آماری (%)	
۱	محمد تقی بیگ	فروردین	۰	۲	۱	۳	۱۶	۷	۱	۱	۰	۳۱	۳۱	۱۰۰	
۲	دامن	مهر	۱	۱	۷	۰	۲۲	۱۲	۳	۰	۱	۴۷	۴۷	۱۰۰	
۳	رودک	آبان	۰	۰	۲	۴	۱۱	۲۰	۱۴	۰	۹	۶۰	۶۰	۱۰۰	
۴	مراکند	بهمن	۰	۲	۶	۱۲	۱۲	۳	۲	۵	۶	۴۸	۵۰	۹۶	
۵	اسفندک	اسفند	۰	۰	۴	۳	۴	۳	۵	۰	۰	۱۹	۲۰	۹۵	
۶	باقرآباد	بهمن	۱	۱	۴	۰	۹	۵	۰	۲	۱	۲۳	۲۶	۸۸	
۷	دامن	خرداد	۱	۱	۲	۴	۱۶	۸	۵	۲	۱	۴۰	۴۶	۸۷	
۸	دامن	مرداد	۱	۲	۲	۲	۱۹	۶	۴	۳	۱	۴۰	۴۶	۸۷	
۹	باقرآباد	مرداد	۰	۱	۱	۱	۱۰	۷	۰	۱	۱	۲۲	۲۶	۸۵	
۱۰	اریه	آبان	۱	۱	۳	۷	۲۶	۱۱	۱	۲	۱	۵۳	۶۳	۸۴	
۱۱	کناروئیه	مهر	۱	۱	۲	۰	۹	۳	۲	۱	۱	۲۰	۲۴	۸۳	
۱۲	یالخری	دی	۰	۰	۳	۱	۱۵	۶	۳	۰	۲	۳۰	۳۷	۸۱	
۱۳	باقرآباد	مهر	۰	۰	۳	۲	۹	۷	۰	۰	۰	۲۱	۲۶	۸۱	
۱۴	باقرآباد	اسفند	۰	۱	۱	۳	۱۰	۴	۱	۱	۰	۲۱	۲۶	۸۱	
۱۵	باقرآباد	فروردین	۰	۰	۳	۲	۹	۷	۰	۰	۰	۲۱	۲۶	۸۱	
۱۶	باقرآباد	تیر	۰	۰	۲	۲	۱۰	۵	۱	۰	۱	۲۱	۲۶	۸۱	
۱۷	دامن	تیر	۲	۲	۱	۱	۱۸	۷	۴	۱	۱	۳۷	۴۶	۸۰	
۱۸	چهجه	دی	۰	۱	۴	۴	۹	۳	۴	۰	۱	۲۶	۳۳	۷۹	
۱۹	دامن	بهمن	۱	۱	۲	۱	۱۶	۱۰	۲	۲	۱	۳۶	۴۶	۷۸	
۲۰	قلات	فروردین	۱	۲	۱	۱	۱۰	۵	۱	۱	۱	۲۳	۳۰	۷۷	
۲۱	پائین	اردیبهشت	۰	۲	۱	۱۳	۵	۸	۲	۳	۱	۳۵	۴۶	۷۶	
۲۲	ساری قمیش	تیر	۱	۱	۴	۷	۸	۲	۴	۴	۹	۴۰	۵۳	۷۵	
۱۷۳			۱۸	۹	۱۰	۱۱	۸	۹	۱۹	۱۶	۲۰	۲۵	۱۸	۱۰	مجموع فراوانی ماهانه

جدول ۵. فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع احتمال برتر نسبت به توزیع گاما

ردیف	نام ایستگاه	ماه	ژرسالی بسیار شدید	ژرسالی شدید	ژرسالی متوسط	ژرسالی ضعیف	ژرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید	مجموع فراوانی	تعداد سال دوره آماری ایستگاه	نسبت مجموع فراوانی جابه جایی طبقات به تعداد کل دوره آماری (%)
۱	محمد تقی بیگ	فروردین	۰	۲	۱	۳	۱۶	۷	۱	۱	۰	۳۱	۳۱	۱۰۰
۲	دامن	مهر	۱	۱	۷	۰	۲۲	۱۲	۳	۰	۱	۴۷	۴۷	۱۰۰
۳	رودک	آبان	۰	۰	۲	۴	۱۱	۲۰	۱۴	۰	۹	۶۰	۶۰	۱۰۰
۴	مراکند	بهمن	۰	۲	۶	۱۲	۱۲	۳	۲	۵	۶	۴۸	۵۰	۹۶
۵	اسفندک	اسفند	۰	۰	۴	۳	۴	۳	۵	۰	۰	۱۹	۲۰	۹۵
۶	باقرآباد	بهمن	۱	۱	۴	۰	۹	۵	۰	۲	۱	۲۳	۲۶	۸۸
۷	دامن	خرداد	۱	۱	۲	۴	۱۶	۸	۵	۲	۱	۴۰	۴۶	۸۷
۸	دامن	مرداد	۱	۲	۲	۲	۱۹	۶	۴	۳	۱	۴۰	۴۶	۸۷
۹	باقرآباد	مرداد	۰	۱	۱	۱	۱۰	۷	۰	۱	۱	۲۲	۲۶	۸۵
۱۰	اریه	آبان	۱	۱	۳	۷	۲۶	۱۱	۱	۲	۱	۵۳	۶۳	۸۴
۱۱	کناروئیه	مهر	۱	۱	۲	۰	۹	۳	۲	۱	۱	۲۰	۲۴	۸۳
۱۲	یالخری	دی	۰	۰	۳	۱	۱۵	۶	۳	۰	۲	۳۰	۳۷	۸۱
۱۳	باقرآباد	مهر	۰	۰	۳	۲	۹	۷	۰	۰	۰	۲۱	۲۶	۸۱
۱۴	باقرآباد	اسفند	۰	۱	۱	۳	۱۰	۴	۱	۱	۰	۲۱	۲۶	۸۱
۱۵	باقرآباد	فروردین	۰	۰	۳	۲	۹	۷	۰	۰	۰	۲۱	۲۶	۸۱
۱۶	باقرآباد	تیر	۰	۰	۲	۲	۱۰	۵	۱	۰	۱	۲۱	۲۶	۸۱
۱۷	دامن	تیر	۲	۲	۱	۱	۱۸	۷	۴	۱	۱	۳۷	۴۶	۸۰
۱۸	چهجه	دی	۰	۱	۴	۴	۹	۳	۴	۰	۱	۲۶	۳۳	۷۹
۱۹	دامن	بهمن	۱	۱	۲	۱	۱۶	۱۰	۲	۲	۱	۳۶	۴۶	۷۸
۲۰	قلات	فروردین	۱	۲	۱	۱	۱۰	۵	۱	۱	۱	۲۳	۳۰	۷۷
۲۱	پائین	اردیبهشت	۰	۲	۱	۱۳	۵	۸	۲	۳	۱	۳۵	۴۶	۷۶
۲۲	ساری قمیش	تیر	۱	۱	۴	۷	۸	۲	۴	۴	۹	۴۰	۵۳	۷۵

ردیف	نام ایستگاه	ماه	ترسالی								مجموع فراواتی	تعداد سال دوره آماری ایستگاه	نسبت مجموع فراواتی جابه جایی طبقات به تعداد کل دوره آماری (%)	
			بسیار شدید	شدید	متوسط	ضعیف	نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید				خشکسالی بسیار شدید
۲۳	برنظین	خرداد	۲	۲	۰	۷	۶	۲	۱۰	۱	۱۰	۴۰	۵۳	۷۵
۲۴	کناروئیه	خرداد	۱	۰	۱	۰	۸	۵	۲	۱	۰	۱۸	۲۴	۷۵
۲۵	جلایر	آذر	۰	۱	۳	۲	۱۷	۵	۳	۳	۰	۳۴	۴۶	۷۴
۲۶	باقرآباد	اردیبهشت	۱	۰	۲	۱	۹	۶	۰	۰	۰	۱۹	۲۶	۷۳
۲۷	یالخری	آبان	۰	۱	۳	۳	۱۴	۲	۳	۱	۰	۲۷	۳۷	۷۳
۲۸	قلعه شاهرخ	اسفند	۰	۲	۰	۴	۱۲	۵	۵	۲	۱	۳۱	۴۳	۷۲
۲۹	دامن	دی	۱	۰	۱	۱۵	۱	۹	۴	۰	۲	۳۳	۴۶	۷۲
۳۰	جلایر	تبر	۰	۱	۴	۴	۱۳	۶	۲	۳	۰	۳۳	۴۶	۷۲
۳۱	منصورآباد	آذر	۱	۱	۴	۱	۳	۱	۴	۰	۰	۱۵	۲۱	۷۱
۳۲	اربه	دی	۱	۲	۱	۴	۲۳	۵	۶	۳	۰	۴۵	۶۳	۷۱
۳۳	کرتیان	بهمن	۱	۳	۱	۵	۲۱	۶	۴	۴	۱	۴۶	۶۵	۷۱
۳۴	سیرا	آبان	۱	۱	۳	۶	۲۰	۱	۸	۱	۱	۴۲	۶۰	۷۰
۳۵	قلات پائین	اسفند	۰	۰	۰	۱	۱۰	۶	۳	۱	۰	۲۱	۳۰	۷۰
۳۶	قلات پائین	اردیبهشت	۰	۱	۱	۴	۱۰	۲	۰	۳	۰	۲۱	۳۰	۷۰
۳۷	تله زنگ	آبان	۰	۳	۲	۶	۲۱	۳	۴	۳	۰	۴۲	۶۰	۷۰
۳۸	دامن	آبان	۰	۲	۱	۱	۱۵	۶	۴	۲	۱	۳۲	۴۶	۷۰
۳۹	جلایر	آبان	۰	۱	۰	۳	۱۵	۸	۱	۲	۲	۳۲	۴۶	۷۰
۴۰	باغ عباسی	آبان	۲	۲	۴	۴	۸	۱	۶	۲	۵	۳۴	۴۹	۶۹
۴۱	باقرآباد	آبان	۰	۱	۰	۴	۵	۵	۱	۱	۱	۱۸	۲۶	۶۹
۴۲	باقرآباد	آذر	۰	۱	۰	۹	۰	۴	۱	۲	۱	۱۸	۲۶	۶۹
۴۳	باقرآباد	دی	۰	۰	۲	۱	۱۰	۴	۱	۰	۰	۱۸	۲۶	۶۹
۱۷۲	کره سنگ	شهریور	۳	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۶۶	۱۲
۱۷۳	کره سنگ	فروردین	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۰	۰	۰	۷	۶۶	۱۱
مجموع			۸۶	۱۶۲	۲۹۴	۴۳۶	۱۱۷۲	۵۷۹	۵۲۴	۲۴۶	۹۵۲۰	۳۷۰۸	۷۰۰۵	۵۳

بدست آمد. بر این اساس تاثیر قابل توجه کاربرد توزیع برتر بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در شرایطی که مقادیر شاخص P-Value از توزیع احتمال برتر و توزیع گاما به ترتیب بیشتر از ۰/۶ و کمتر از ۰/۳ باشد، نتیجه می‌گردد.

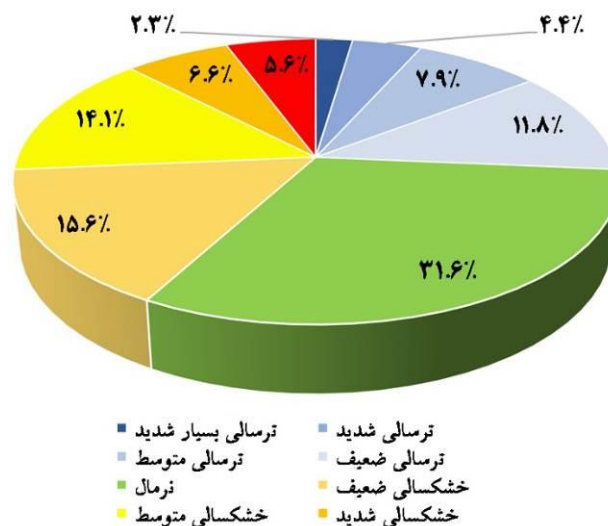
به توزیع گاما به تفکیک سری داده‌های آبدهی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری مبنا در ۱۷۳ سری مشخص شده از جدول ۴ را نشان می‌دهد. از جدول ۵، تعداد کل جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع احتمال برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما، معادل ۳۷۰۸ و در حدود ۵۳ درصد کلیه حالات (۷۰۰۵ داده)،

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت توزیع فراوانی گاما در غالب حالات مورد بررسی، به‌عنوان توزیع آماری برتر شناخته نشده و در نتیجه محاسبه شاخص SDI بر اساس کاربرد این توزیع، ممکن است به نتایج صحیحی در پایش خشکسالی هیدرولوژیکی منجر نگردد. در نتیجه لازم است پیش از محاسبه شاخص SDI، توزیع فراوانی مناسب بر مقادیر آبدهی برازش یافته و بر اساس آن، مقدار تصحیح یافته شاخص SDI محاسبه گردد. به عنوان یک روش دیگر می‌توان توزیع Wakeby را به عنوان توزیع فراوانی عموماً برتر جهت برازش داده‌های آبدهی، مورد استفاده قرار داد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر اساس به‌کارگیری سری داده‌های آبدهی سالانه و ماهانه مربوط به ۴۹ ایستگاه هیدرومتری مبنای کشور، ضمن بررسی کارایی ۶۵ تابع توزیع احتمال مختلف، تاثیر کاربرد توزیع احتمال برتر بر جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

شکل ۵ درصد فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع احتمال برتر به عنوان جایگزین توزیع گاما را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد بیشترین میزان فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در طبقه نرمال و در حدود ۳۱/۶ درصد (۱۱۷۲ حالت) می‌باشد. این موضوع با توجه به رفتار شبه نرمال توزیع گاما بر سری داده‌ها قابل توجیه می‌باشد. در نتیجه کاربرد توزیع گاما می‌تواند به صورت غیرواقعی و عمدتاً به پایش شرایط نرمال منجر گردد. درصد فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در وضعیت خشکسالی بسیار شدید (۵/۶٪)، خشکسالی شدید (۶/۶٪)، خشکسالی متوسط (۱۴/۱٪)، خشکسالی ضعیف (۱۵/۶٪)، ترسالی ضعیف (۱۱/۸٪)، ترسالی متوسط (۷/۹٪)، ترسالی شدید (۴/۴٪) و ترسالی بسیار شدید (۲/۳٪)، حاصل گردید. جالب توجه است که میزان درصد جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در شرایط حدی ترسالی یا خشکسالی، حداقل می‌باشد که با ماهیت شبه نرمال توزیع گاما قابل توجیه است.



شکل ۵. درصد جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی حاصل از کاربرد توزیع احتمال برتر به جای توزیع گاما به تفکیک طبقات ۹ گانه.

مقدار P-Value از توزیع گاما و توزیع احتمال برتر، بستگی دارد.

مشاهده شد در مواردی که مقدار P-Value از توزیع گاما کمتر از ۰/۳ بوده و توزیع برتر متناظر مقدار P-Value مناسب و حدوداً بیشتر از ۰/۶ را ارائه می‌نماید، امکان جابه‌جایی طبقات خشکسالی تشدید می‌گردد. محاسبه شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس توزیع گاما و توزیع احتمال برتر در این موارد نشان داد، در حدود نیمی از موارد فوق، جابه‌جایی طبقات خشکسالی، قابل توجه است. در این میان، بیشترین میزان فراوانی جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی در طبقه نرمال، رخ داده است. بر این اساس لازم است پیش از محاسبه شاخص SDI، توزیع فراوانی مناسب بر مقادیر آبدهی برازش یافته و بر اساس آن، مقدار تصحیح یافته شاخص SDI محاسبه گردد.

در مقیاس سالانه، توزیع گاما در هیچ یک از ۴۹ ایستگاه مورد بررسی، به عنوان توزیع برتر شناخته نشد. در این بین توزیع Wakeby در حدود ۳۵ درصد از کلیه حالات به عنوان توزیع احتمال برتر برازش دهنده سری داده‌های آبدهی سالانه، معرفی گردید. در مقیاس ماهانه نیز سهم توزیع گاما به عنوان توزیع برتر متوسط آبدهی نیز در حدود یک درصد است. این در حالیست که در حدود ۳۳ درصد از کلیه حالات، توزیع Wakeby به عنوان توزیع فراوانی برتر جهت برازش آمار متوسط آبدهی سالانه شناخته شد. در مقیاس ماهانه نیز توزیع Wakeby به عنوان توزیع برتر در تمام ماه‌ها شناخته شد.

ملاحظه گردید لزوماً رتبه برتر توزیع احتمال نمی‌تواند سبب جابه‌جایی طبقات خشکسالی گردیده و جابه‌جایی طبقات خشکسالی هیدرولوژیکی علاوه بر رتبه به اختلاف

### فهرست منابع

- الیاسی، ح.، خلیلی شایان، ح.، جمال، م. و فتوحی، ر. ۱۳۹۵. ارزیابی قابلیت کاربرد توزیع‌های آماری در پایش و پیش‌بینی بارش حوضه‌های آبریز کشور. ششمین کنفرانس منابع آب ایران، دانشگاه کردستان، اول تا سوم اردیبهشت ۱۳۹۵.
- اقتدارنژاد، م.، بذرافشان، ا. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۵. ارزیابی تطبیقی شاخص‌های RDI، SPI و SDI در تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: دشت بم). نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۲): ۶۹-۸۱.
- اقتداری، م.، بذرافشان، ج.، شفیع، م. و حجایی، س. ۱۳۹۵. پیش‌بینی خشکسالی جریان رودخانه با استفاده از شاخص SPI و زنجیره مارکف در حوزه آبریز کرخه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳ (۲): ۱۱۵-۱۳۰.
- مساعدی، ا. و قبائی سوق، م. ۱۳۹۰. تصحیح شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس انتخاب مناسبترین تابع توزیع احتمال. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵ (۵): ۱۲۰۶-۱۲۱۶.

Edwards, D.C. and McKee, T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Keyantash, J. and Dracup, J.A. 2002. The Quantification of Drought Indices. American Metrological Society, 83 (8): 1167-1180.

Mishra, A.K. and Desai, V.R. 2005. Drought forecasting using stochastic models. Stochastic Environment Research Risk Assessment, 19: 326-339.

Nalbantis, I. 2008. Evaluation of hydrological drought index. European Water, 23 (24): 67-77.

Nalbantis, N. and Tsakiris, G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management, 23: 881-897.

Shukla, S. and Wood, A.W. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysics Research Letter, 35: 1-8.

Tabari, H. Nikbakht, J. and Hosseinzadeh Talaei, P. 2013. Hydrological drought assessment in northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI). Water Resources Management, 27: 137-151.

Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. Water International, 10: 111-120.





## Hydrological Drought Index Correction Based on Determining the Most Appropriate Probability Distribution

Maryam Jamal<sup>1</sup>, Hossein Ebrahimi<sup>2\*</sup> and Habib Mousavi Jahromi<sup>3</sup>

1) Ph. D. candidate in civil engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran

2\*) Associate Professor, Faculty of civil engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Ebrahimi165@yahoo.com

3) Professor, Faculty of civil engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran.

Received: 05-11-2019

Accepted: 01-07-2020

### Abstract

Streamflow Drought Index (SDI) is based on the assumption that the flow data series follows from Gamma distribution. In this study, the efficiency of 65 statistical distributions was evaluated through the use of monthly and annual flow data series of 49 hydrometric stations. The results show that on the annual scale, Gamma distribution is not the superior distribution. On a monthly scale, this distribution was found only in 1% of all cases examined as the superior distribution. This is while the Wakeby distribution was introduced on an annual basis in about 35 percent of the cases, and on a monthly scale, up to 43 percent of the scenarios were introduced as a top-ranked distribution. Based on the SDI index calculated based on Gamma distribution and Wakeby distribution, in the case of the P-Value of the Gamma distribution is less than 0.3, it is possible to move the drought classes using Wakeby distribution. These conditions were observed in 30% of the examined cases. The highest and the lowest displacements of the hydrological drought classes due to the use of superior distribution were in December and May, respectively. It was found that the highest frequency of displacement of the drought classes resulted from the use of superior distribution occurs in the normal class. Accordingly, it is recommended that the Wakeby distribution be replaced by the gamma distribution in the SDI calculations.

**Keywords:** Displacement of different classes, Draught monitoring, Equi-probability transformation, Stream Flow Draught Index (SDI)