

## مقایسه عملکرد ذاتی هفت شاخص خشکسالی رایج در پایش خشکسالی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو

بابک امیرعطایی<sup>۱</sup>، مجید منتصری\*<sup>۲</sup> و مهدی یاسی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

شاخص‌های خشکسالی برای ارزیابی سیستم‌های منابع آب به عنوان ابزاری برای پایش خشکسالی در اکثر نقاط جهان به کار می‌رود. اکثر شاخص‌های خشکسالی برای مناطق جغرافیایی خاص و با اهداف مشخص توسعه یافته و در نتیجه به کارگیری آن‌ها جهت یک تحلیل جامع و دقیق در مناطق دیگر به دلیل پیچیدگی ذاتی پدیده خشکسالی و شرایط اقلیمی متفاوت با تردیدهای قابل توجهی همراه می‌باشد. مطالعات محدودی برای ارزیابی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی در منابع گزارش شده و چنین مطالعاتی نیز اغلب بر اساس داده‌های تاریخی با دوره‌های آماری کوتاه مدت ۲۰-۳۰ ساله بوده و اغلب از یک جنبه و دیدگاه خاصی انجام پذیرفته است. در این مطالعه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، برای پایش خشکسالی شمال غرب ایران به ازای هفت شاخص خشکسالی هواشناسی استفاده شده و خصوصیات تئوریک شاخص‌های مذکور و عملکرد ذاتی آن‌ها در تحلیل پایش خشکسالی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از داده‌های بارندگی ۵۰ ساله تاریخی ۱۱ ایستگاه سینوپتیک در محدوده مطالعاتی جهت تولید سری‌های زمانی مصنوعی بارندگی به تعداد ۱۰۰۰ نمونه جهت پایش خشکسالی در محدوده مطالعاتی و کمی کردن خصوصیات ذاتی شاخص‌های خشکسالی استفاده شده است. نتایج حاصل بیانگر مزیت نسبی بالای شاخص‌های SPI و SPIo برای یک تحلیل جامع و دقیق‌تر بوده و شاخص Nitzche نیز برای تحلیل‌های اولیه بسیار مناسب است. ضمناً شاخص‌های DI، Z-Score و RAI انحراف قابل توجهی از رخدادهای مورد انتظار از فرآیندهای طبیعی را داشته و نتایج آن نمی‌توانند برای پیش‌بینی رخدادهای خشکسالی قابل اطمینان باشند. نهایتاً نتایج شاخص PNPI نشان داند که این شاخص مستقل از مکان نبوده و ناکارآمدترین شاخص برای پایش خشکسالی است.

**واژگان کلیدی:** خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی، مدل‌های تولید داده، روش مونت کارلو.

### ۱- مقدمه

خاک و عدم رشد گیاه برای یک پریود زمانی بدون تأثیر منابع آب سطحی)، هیدرولوژی (کمبود منابع آب سطحی برای مصارف آب مشخص از یک سیستم مدیریت منابع آب) و اقتصادی اجتماعی (شکست سیستم منابع آب در تأمین تقاضای آب برای اقتصاد آبی خوب) طبقه‌بندی می‌شوند [۴ و ۵].

برای ارزیابی کمی و کیفی پدیده خشکسالی معمولاً از شاخص‌هایی به عنوان شاخص‌های خشکسالی در سراسر دنیا استفاده می‌شود [۶]. به طور مشخص، تمامی شاخص‌های خشکسالی از بارندگی به صورت تک یا هم‌زمان با ترکیبی از سایر المان‌های اقلیمی از جمله درجه حرارت یا رطوبت خاک استفاده می‌کنند. به عنوان مثال یک ترکیب متغیرهای هواشناسی شامل بارندگی و درجه حرارت برای شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI, 1966) و شاخص رطوبتی گیاه (Crop Moisture Index, 1968)، بارندگی و رطوبت خاک برای شاخص‌های (Moisture Adequacy Index (1957) و

خشکسالی یک پدیده دوره‌ای طبیعی همراه با کمبود منابع آب در دسترس در یک منطقه جغرافیایی با زمان تداوم قابل توجه می‌باشد که تمدن بشر در طول تاریخ بارها گرفتار آن شده است. این پدیده محیطی بخش جدایی‌ناپذیر تغییرات اقلیمی و تکرار شونده در مناطق مختلف آب و هوایی دنیا به شمار می‌آید [۱]. خشکسالی می‌تواند زیستگاه‌های طبیعی و اکوسیستم‌ها و بسیاری از بخش‌های اقتصادی و اجتماعی را تحت تأثیر قرار دهد [۲]. در سال‌های اخیر خشکسالی بارها در مناطق مختلف دنیا رخ داده و تأثیرات آن با افزایش تقاضای آب و تغییرات آب و هوایی زیان‌بارتر شده است. لذا پدیده خشکسالی توجه بسیاری را به خود جلب کرده و مطالعات مشخصات این پدیده از جنبه‌های مختلف اولویت بسیار بالایی برای محققین پیدا کرده است [۳].

عموماً خشکسالی‌ها در چهار گروه هواشناسی (کمبود بارندگی در یک منطقه برای یک پریود زمانی)، کشاورزی (کمبود رطوبت

Keyantash و Dracup [۱۱] ۱۴ شاخص مطرح خشکسالی را با استفاده از داده‌های تاریخی بارندگی سالیانه در آمریکا مقایسه نمودند و در نتیجه شاخص SPI را به عنوان یک شاخص با ارزش‌تر برای برآورد شدت خشکسالی معرفی نمودند. Morid و همکاران [۱۲] با استفاده از آمار ۳۲ ساله بارندگی سالیانه در استان تهران، عملکرد هفت شاخص خشکسالی DI، SPI، PNPI، CZI، MCZI، Z-Score و EDI را مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کرده‌اند که شاخص‌های SPI، CZI و Z-Score دارای عملکرد مشابهی برای شناسایی خشکسالی بوده و واکنش‌کننده به شروع خشکسالی نشان می‌دهند. همچنین شاخص DI رفتار متناقضی برای تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی دارا می‌باشد. ضمناً، Morid و همکاران استدلال کردند که SPI و EDI قادر به تشخیص بهتر شروع خشکسالی بوده و دارای تغییرات زمانی و مکانی پایداری می‌باشند و همچنین مشخص شد که EDI برای تشخیص خشکسالی تواناتر بوده و عملکرد بهتری دارد.

Lokas و همکاران [۱۳] به مقایسه سه شاخص SPI، RAI و Z-Score در ۲۸ ایستگاه کشور یونان با داده‌های ۴۰ ساله بارندگی پرداختند و نتیجه‌گیری نمودند که هر سه شاخص روند مشابهی در مقیاس ۱۲ ماهه برای تعیین ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها داشته و مطابقت خوبی با شدت خشکسالی پالمر دارند.

Barua و همکاران [۶] به ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI، PNPI، SWSI و ADI به ازای داده‌های تاریخی در رودخانه یارا در استرالیا اقدام نموده و بر اساس معیارهای متفاوت مورد نظر، شاخص ADI را در منطقه به عنوان شاخص برتر معرفی نمودند.

سبزی‌پرور و همکاران [۱۴] به مقایسه هفت شاخص خشکسالی با آمار بارندگی ۳۵ ساله در ۲۲ ایستگاه استان همدان با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای پرداختند و نشان دادند که شاخص‌هایی همچون RAI، Z و DI از نظر آماری شبیه هم بوده و در ارزیابی خشکسالی در شرایط اقلیمی سرد و نیمه خشک استان همدان به نتایج مشابهی ختم می‌شوند. ایشان همچنین به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI علی‌رغم توانایی آن در تشخیص شروع خشکسالی، شاخص مناسبی جهت پیش خشکسالی در مقیاس ماهیانه در شرایط اقلیمی سرد و نیمه خشک نمی‌باشد.

خلیقی و همکاران [۱۵] نیز به بررسی شاخص‌های خشکسالی SPI، PNPI و Nitzche با استفاده از آمار ۲۶ ساله

(1968) Keetch-Bryam Drought Index و صرفاً بارندگی برای شاخص بارش استاندارد (SPI, 1993) به کار گرفته می‌شود. اکثر محققین برای مطالعه پدیده خشکسالی ترجیحاً از شاخص‌های خشکسالی تک پارامتری بر اساس بارندگی سالیانه یا ۱۲ ماهه ثابت به دلیل سادگی و قابل دسترس بودن داده‌های بارندگی در مناطق مختلف دنیا استفاده می‌کنند [۷]. گرچه مقیاس زمانی سالیانه طولانی به نظر رسیده، ولی می‌تواند به طور مؤثر برای خلاصه نمودن مشخصات و رفتار منطقه‌ای خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد [۸]. مقیاس زمانی ماهیانه برای شناسایی اثرات خشکسالی در موقعیت‌های مرتبط با کشاورزی و تأمین آب مناسبتر به نظر می‌رسد [۹]. رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی که بر اساس داده‌های بارندگی توسعه یافته‌اند شامل: شاخص ناهنجاری بارش (RAI; van Rooy, 1965)<sup>۱</sup>، شاخص دهک (DI; Gibbs and Maher, 1967)<sup>۲</sup>، شاخص نیچه (Nitzche, 1985)، شاخص درصد بارش نرمال (PNPI; Willeke, 1994)<sup>۳</sup>، شاخص بارش استاندارد (SPI; McKee et al., 1993)<sup>۴</sup>، شاخص نمره Z (Z-Score)، شاخص Z چینی (CZI; Ju et al., 1997)<sup>۵</sup>، شاخص Z چینی اصلاح شده (MCZI; Wu et al., 2001)<sup>۶</sup>، می‌باشند.

این شاخص‌ها در بررسی پدیده خشکسالی دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشند، اما مطالعات محدودی برای ارزیابی و مقایسه این شاخص‌ها انجام پذیرفته و چنین مطالعاتی نیز اکثراً بر اساس داده‌های تاریخی کوتاه مدت ۲۰-۳۰ ساله بوده و از جنبه و دیدگاه‌های خاصی صورت گرفته است. جهت تعیین مناسب‌ترین شاخص خشکسالی چندین مطالعه بر اساس اهداف خاص برای شناسایی مشخصه‌های خشکسالی انجام پذیرفته است. بیشتر این مطالعات به مقایسه دو شاخص SPI و PDSI متمرکز بوده و به مزیت نسبی SPI از جمله:

- (الف) سادگی
- (ب) عدم تغییر رفتاری شاخص از ایستگاهی به ایستگاه دیگر [۱۰]،
- (ج) پیش‌بینی بهتر رخدادها کوتاه مدت [۱۰]، و
- (د) پیش‌بینی بهتر محصولات زراعی از نظر وضعیت رطوبتی خاک، تأکید کرده‌اند [۸].

- 1- Rainfall anomaly index
- 2- Deciles
- 3- Percent of normal precipitation index
- 4- Standard precipitation index
- 5- Chinese Z index
- 6- Modified chinese Z index

متوسط بارندگی سالیانه در محدوده مطالعاتی از حداکثر ۱۷۵۵ میلی‌متر در شهرستان بندرانزلی تا حداقل ۲۳۵ میلی‌متر در شهرستان تهران متغیر بوده که اقلیم نیمه‌خشک تا مرطوب را تحت پوشش قرار می‌دهد. با این وجود اکثر ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی دارای دامنه تغییرات بارندگی سالیانه قابل توجه نبوده و با میانگین بارش سالیانه ۲۸۰ میلی‌متر (ایستگاه تبریز) الی ۵۰۳ میلی‌متر (ایستگاه خرم‌آباد) در اقلیم نیمه‌خشک قرار می‌گیرند.

جهت استفاده از داده‌های بارندگی در تحلیل خشکسالی، ابتدا بایستی همگنی، تصادفی و ایستایی بودن این داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری مناسب مورد ارزیابی قرار گیرند [۱۶].

در این مطالعه، از روش منحنی جرم مضاعف برای آزمون همگنی داده‌ها استفاده گردید، که نتایج نشان دهنده همگنی داده‌ها با ضریب همبستگی خطی ۰/۹۹ می‌باشد [۱۷]. برای آزمون ایستایی<sup>۱</sup> از روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن [۱۸] و برای آزمون تصادفی بودن داده‌ها<sup>۲</sup> نیز از روش ران تست استفاده گردید [۱۶ و ۹]. نتایج دو آزمون فوق درستی و صحت فرضیه تصادفی بودن و ایستایی داده‌های بارندگی در تمامی ایستگاه‌های منطقه را تأیید می‌کنند. نتایج سه آزمون مذکور به دلیل محدودیت صفحات مقاله ارائه نشده‌اند.

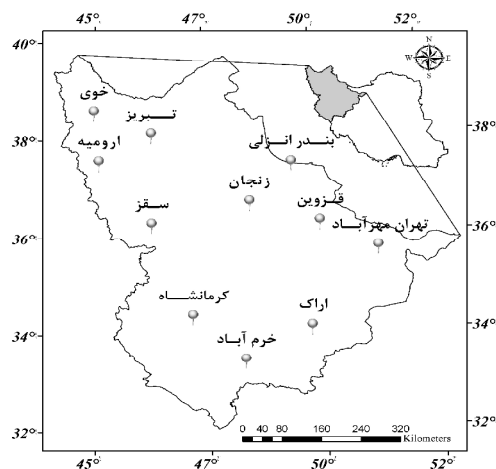
یک گام اساسی در تحلیل خشکسالی به ازای استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، انتخاب توزیع آماری مناسب داده‌های بارندگی می‌باشد. بدین منظور در این مطالعه برای تعیین توزیع آماری مناسب داده‌های بارندگی از روش PPCC<sup>۳</sup> به عنوان مناسب‌ترین روش تعیین توزیع احتمالی برتر از میان پنج توزیع احتمالی نرمال، لاگ نرمال دوپارامتری، لاگ نرمال سه پارامتری، پیرسون تیپ سوم و لاگ پیرسون تیپ سوم استفاده شده است [۲۰]. نتایج آزمون PPCC نشان می‌دهند که توزیع پیرسون تیپ سوم به عنوان توزیع احتمالی غالب و برتر داده‌های بارندگی ماهیانه و سالیانه در تمامی ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی می‌باشد. نتایج آزمون فوق نیز به دلیل کمبود فضا ارائه نشده‌اند.

در استان مازندران پرداخته و نشان دادند که نمایه‌های SPI و PNPI در تفکیک ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها و فراوانی هر یک از پدیده‌های مذکور تشابه بیشتری نسبت به دیگر شاخص‌ها دارند. آن‌ها همچنین شاخص SPI را به دلیل داشتن قابلیت‌های بیشتر از جمله تفکیک دقیق‌تر طبقه‌ها در هر یک از پدیده‌های ترسالی و خشکسالی، دقت بالاتر در جداسازی دوره‌های مرطوب و خشک و حساسیت بیشتر به تغییرات بارش به عنوان مناسب‌ترین شاخص جهت پایش خشکسالی در استان مازندران معرفی کرده‌اند. با توجه به مرور مطالعات انجام یافته، ملاحظه می‌شود که بررسی و ارزیابی کامل و جامع شاخص‌های خشکسالی جهت تعیین عملکرد و خصوصیات ذاتی آن‌ها، دارای اولویت خاص و بالایی تحقیقاتی بوده و لذا در این مطالعه با استفاده از یک روش شبیه‌سازی مونت کارلو، سری‌های زمانی مصنوعی بارندگی در نمونه بسیار زیاد جهت پایش خشکسالی‌ها در شمال غرب کشور ایران برای کمی کردن خصوصیات ذاتی شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در این مطالعه از سری‌های زمانی بارندگی ماهیانه و سالیانه بازده ایستگاه سینوپتیک به عنوان ایستگاه‌های مینا واقع در شمال غرب کشور ایران با موقعیت جغرافیایی مطابق شکل (۱) استفاده شده است. سری داده‌های بارندگی ایستگاه‌ها دارای دوره آماری ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۱) بوده و جدول (۱) مشخصات عمومی ایستگاه‌ها و پارامترهای اصلی آماری داده‌های مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مینا در منطقه مطالعاتی

- 1- Stationary
- 2- Randomness
- 3- Probability plot correlation coefficient

جدول ۱- مشخصات عمومی و پارامترهای آماری داده‌های بارندگی سالیانه ایستگاه‌های مبنا

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع ایستگاه (m)	مختصات جغرافیایی			پارامترهای آماری سری داده‌های بارندگی سالیانه (۱۹۶۱-۲۰۱۰)		
			عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	میانگین (mm)	ضریب تغییرات	چولگی	همبستگی داخلی با تأخیر یک
S1	اراک	۱۷۰۸	۳۴° ۰۶'	۴۹° ۴۶'	۳۳۲/۳	۰/۳۰	۰/۳۲	-۰/۱۰
S2	ارومیه	۱۳۱۶	۳۷° ۳۲'	۴۵° ۰۵'	۳۳۲/۲	۰/۳۰	۰/۸۶	۰/۲۵
S3	بندرانزلی	-۲۶	۳۷° ۲۸'	۴۹° ۲۸'	۱۷۵۵/۵	۰/۱۹	۰/۷۶	-۰/۱۵
S4	تبریز	۱۳۶۱	۳۸° ۰۵'	۴۶° ۱۷'	۲۸۳/۲	۰/۳۰	۰/۹۵	۰/۳۶
S5	تهران	۱۱۹۱	۳۵° ۴۱'	۵۱° ۱۹'	۲۳۵/۴	۰/۳۰	۰/۱۲	-۰/۱۵
S6	خرم‌آباد	۱۱۴۸	۳۳° ۲۶'	۴۸° ۱۷'	۵۰۳/۱	۰/۲۴	۰/۰۷	۰/۰۵
S7	خوی	۱۱۰۳	۳۸° ۳۳'	۴۴° ۵۸'	۲۹۲/۰	۰/۲۸	۰/۴۲	۰/۲۴
S8	زنجان	۱۶۶۳	۳۶° ۴۱'	۴۸° ۲۹'	۳۰۴/۸	۰/۲۶	۰/۰۰	-۰/۰۴
S9	سقز	۱۵۲۳	۳۶° ۱۵'	۴۶° ۱۶'	۴۸۷/۶	۰/۲۷	۰/۵۵	۰/۱۶
S10	قزوین	۱۲۷۹	۳۶° ۱۵'	۵۰° ۰۳'	۳۱۷/۰	۰/۲۷	۰/۳۳	-۰/۲۷
S11	کرمانشاه	۱۳۱۹	۳۴° ۲۱'	۴۷° ۰۹'	۴۵۰/۰	۰/۲۷	۰/۵۹	۰/۱۱

شاخص هواشناسی جهت پایش خشکسالی توسط سیستم مراقبت خشکسالی استرالیا انتخاب شده است؛ زیرا این روش دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای است [۲۲]. به عنوان نمونه، دهک اول، مقدار بارندگی است که احتمال عدم وقوع آن کمتر از ۱۰ درصد باشد. طبقه‌بندی این شاخص به ازای احتمال عدم وقوع برحسب درصد در جدول (۲) قابل ملاحظه است.

### شاخص نیچه (Nitzche)

Nitzche [۲۳] طبق روابط زیر از سه معادله آماری برای کمی کردن بارندگی و تعیین طبقه‌بندی خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها و سال‌های توأم با بارندگی عادی استفاده نموده است.

$$Nitzche_i = \begin{cases} -1 & \text{خشکسالی} & \text{If } p_i < (\bar{p} - \delta) \\ 0 & \text{نرمال} & \text{If } (\bar{p} - \delta) \leq p_i \leq (\bar{p} + \delta) \\ +1 & \text{ترسالی} & \text{If } p_i > (\bar{p} + \delta) \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن  $Nitzche_i$  و  $p_i$  به ترتیب آماره شاخص و بارندگی در پیوند  $i$ ، میانگین بارش،  $\bar{p}$  میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی برای ناهنجاری مثبت و میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی برای ناهنجاری منفی می‌باشد [۲۱].

طبقه‌بندی این شاخص در جدول (۲) نشان داده شده است.

### ۲-۲- شاخص‌های خشکسالی مورد مطالعه

در این مطالعه خصوصیات ذاتی و عملکرد هفت شاخص خشکسالی SPIo و Z-Score, SPI, PNPI, Nitzche, DI, RAI جهت مقایسه و ارزیابی مورد نظر بوده که مشخصات عمومی هر کدام از شاخص‌های فوق به طور اختصار به قرار زیر می‌باشد.

#### شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)

این شاخص توسط Rooy در سال ۱۹۶۵ ارائه شده است. اساس این شاخص، محاسبه انحراف میزان بارندگی از مقدار نرمال بوده و بارندگی ماه یا سال را روی مقیاس خطی که از روی سری داده‌ها حاصل می‌شود، ارزیابی می‌کند، و رابطه آن به صورت زیر است:

$$RAI_i = \pm 3 \left( \frac{p_i - \bar{p}}{E - p} \right) \quad (۱)$$

که در آن  $RAI_i$  و  $p_i$  به ترتیب آماره شاخص و بارندگی در پیوند  $i$ ، میانگین بارش،  $\bar{p}$  میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی برای ناهنجاری مثبت و میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی برای ناهنجاری منفی می‌باشد [۲۱]. طبقه‌بندی این شاخص در جدول (۲) ارائه شده است.

#### شاخص دهک‌ها (DI)

این شاخص توسط Gibbs و Maher در سال ۱۹۶۷ ارائه شده است. در این شاخص توزیع بارندگی به وقوع پیوسته در یک دوره طولانی به ۱۰ بخش تقسیم می‌شود که هر یک از این بخش‌ها را یک دهک می‌نامند. روش دهک‌ها به عنوان یک

جدول ۲- مشخصات طبقه‌بندی شاخص‌ها برای دوره‌های مختلف ترسالی و خشکسالی و کلاس‌بندی کمی مشترک مطالعه

شاخص کمی مشترک طبقه	طبقه خشکسالی	SPIo و SPI	Z-Score	PNPI	RAI	DI	Nitzeche
+۳	ترسالی شدید	بیشتر از ۲+	بیشتر از ۱/۵	بیشتر از ۱۶۰	بیشتر از ۳+	بیشتر از ۹۰	+۱
+۲	ترسالی متوسط	+۱/۵ تا +۱/۹۹	۱/۵ تا ۰/۵	۱۴۵ تا ۱۶۰	+۲/۱ تا +۱/۲	۹۰ - ۸۰	+۱
+۱	ترسالی ضعیف	+۱ تا +۱/۴۹	۰ تا ۰/۵	۱۳۰ تا ۱۴۵	+۱/۲ تا +۰/۳	۸۰ - ۷۰	+۱
۰	نرمال	+۰/۹۹ تا -۰/۹۹	۰	۷۰ تا ۱۳۰	+۰/۳ تا -۰/۳	۷۰ - ۳۰	۰
-۱	خشکسالی ضعیف	-۱ تا -۱/۴۹	۰ تا -۰/۵	۵۵ تا ۷۰	-۱/۲ تا -۰/۳	۳۰ - ۲۰	-۱
-۲	خشکسالی متوسط	-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱/۵ تا -۰/۵	۴۰ تا ۵۵	-۲/۱ تا -۱/۲	۲۰ - ۱۰	-۱
-۳	خشکسالی شدید	کمتر از ۲-	کمتر از ۱/۵-	کمتر از ۴۰	کمتر از ۳-	کمتر از ۱۰	-۱

$$SPI_i = \frac{p_i - \bar{p}}{\delta} \quad (۴)$$

که در آن  $SPI_i$  و  $p_i$  به ترتیب آماره شاخص و بارندگی در پریود  $i$  میانگین بارندگی و  $\delta$  انحراف معیار بارندگی بوده و کلاس خشکسالی و ترسالی پریود  $i$  را به ازای طبقه‌بندی جدول (۲) مشخص می‌کند.

#### شاخص نمره Z (Z-Score)

شاخص نمره Z با اقتباس از شاخص SPI معرفی گردیده است. در این شاخص از رابطه شاخص SPI (رابطه (۴)) برای برآورد کلاس خشکسالی یا ترسالی به ازای طبقه‌بندی روش مطابق جدول (۲) استفاده می‌شود. در این روش انتقال داده‌ها از توزیع احتمالی خود به توزیع نرمال مطرح نبوده و ضمناً دارای طبقه‌بندی متفاوت با شاخص SPI برای پایش خشکسالی است.

#### شاخص بارش استاندارد نرمال نشده (SPIo)

این شاخص که برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده، همانند شاخص بارش استاندارد بوده، با این تفاوت که داده‌ها از توزیع احتمالی خود به توزیع نرمال انتقال داده نمی‌شوند. در این روش نیز برای پایش خشکسالی از رابطه (۴) استفاده شده است. طبقه‌بندی خشکسالی آن مشابه طبقه‌بندی شاخص SPI می‌باشد. جهت ارزیابی و مقایسه ساده و دقیق عملکرد شاخص‌های خشکسالی مذکور، یک طبقه‌بندی کمی مشترک با هفت طبقه شامل ترسالی شدید (+۳)، ترسالی متوسط (+۲)، ترسالی ضعیف (+۱)، نرمال (۰)، خشکسالی ضعیف (-۱)، خشکسالی متوسط (-۲) و خشکسالی شدید (-۳) به ازای معیارهای طبقه‌بندی خشکسالی هر کدام از شاخص‌ها مشخص و در مطالعه مطابق جدول (۲) مورد استفاده قرار گرفته است.

#### شاخص درصد بارش نرمال (PNPI)

این شاخص که توسط Willeke [۲۴] ارائه شده است یکی از ساده‌ترین روش‌های ارزیابی شدت خشکسالی بوده و برای بازه‌های زمانی مختلفی قابل محاسبه است. شاخص PNPI از تقسیم مقدار واقعی بارندگی بر بارندگی نرمال و ضرب آن در عدد ۱۰۰ به دست می‌آید. به عبارت دیگر، این شاخص برای یک پریود خاص با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$PNPI_i = \frac{p_i}{\bar{p}} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن  $PNPI_i$  و  $p_i$  به ترتیب آماره شاخص و بارندگی در پریود  $i$  و  $\bar{p}$  میانگین بارندگی بوده و کلاس خشکسالی یا ترسالی در پریود  $i$  را به ازای طبقه‌بندی روش مطابق جدول (۲) تعیین می‌کند.

#### شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص بارش استاندارد (SPI) با هدف تعیین و پایش خشکسالی توسط توسط Mckee و همکاران در سال ۱۹۹۳ توسعه یافته است. مرکز آب و هوای کلرادو، مرکز آب و هوای ایالات متحده آمریکا و مرکز ملی کاهش خطرات ایالات متحده از شاخص SPI برای ارزیابی وضعیت فعلی خشکسالی در ایالات متحده استفاده می‌کنند. شاخص SPI قادر به تعیین خشکسالی و ترسالی در یک مقیاس زمانی خاص برای هر مکان با دارا بودن داده‌های بارندگی می‌باشد [۲۵]. جهت تعیین این شاخص، ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلند مدت بارندگی‌ها برآزش داده شده، سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد [۲۶، ۲۷ و ۲۸]، که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد.

## ۳-۲- شبیه‌سازی مونت کارلو

اکثر مطالعات صورت گرفته در تحلیل و ارزیابی شاخص‌های مختلف خشکسالی بر اساس داده‌ای ثبت شده یا تاریخی بوده است. در این نوع مطالعات جهت ارزیابی شاخص‌های مختلف خشکسالی در پیش‌بینی وقوع خشکسالی‌ها فرض بر این است که بارندگی‌هایی که ممکن است در آینده اتفاق بیافتد، دارای رفتار مشابهی با داده‌های تاریخی خواهد بود و بارندگی‌های کمتر و بیشتر از داده‌های تاریخی اتفاق نخواهد افتاد. به عبارت دیگر، بارندگی‌های تاریخی به صورت تکراری در آینده نیز روی خواهد داد، در حالی که این امر دارای احتمال بسیار ضعیفی است. بنابراین در چنین مواقعی که امکان تحلیل دقیق بازای داده‌های تاریخی یا ثبت شده وجود ندارد، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو بسیار ضروری و با ارزش خواهد بود [۲۸]. داده‌های بارندگی تابعی از زمان و مکان می‌باشند که می‌توانند رفتار نامشخص و تصادفی داشته باشند [۲۹]. بنابراین به طور یقین نمی‌توان مقدار و زمان بارندگی در آینده را پیش‌بینی نمود. به همین دلیل ترجیحاً از مدل‌های استوکستیک بارندگی برای تولید سری‌های متناوب بارندگی که رخ داد آن‌ها در آینده محتمل است، جهت ارزیابی شاخص‌های مختلف در پیش‌بینی وضعیت خشکسالی استفاده می‌گردد. این سری‌های مصنوعی تولیدی به طور واقعی‌تری ویژگی‌های بارندگی که ممکن است در آینده رخ دهد را توصیف می‌کنند [۳۰].

در این تحلیل، داده‌های بارندگی جهت ارزیابی شاخص‌های مختلف خشکسالی در دو سطح سالیانه و ماهیانه مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید داده‌های بارندگی، به جای تولید مستقیم داده‌های ماهیانه، ابتدا داده‌های سالیانه تولید شده و سپس این داده‌ها با استفاده از روش والنسیا - شاکي<sup>۱</sup> به داده‌های ماهیانه توزیع شده است. مزیت استفاده از مدل‌های توزیع<sup>۲</sup> نسبت به مدل‌های مستقیم مانند ARMA (p,q) این است که این مدل‌ها، پارامترها و خصوصیات آماری داده‌های بارندگی را در دو سطح سالیانه و ماهیانه حفظ می‌کنند، در حالی که مدل ARMA (p,q) فاقد چنین پتانسیلی بوده و فقط پارامترهای آماری داده‌های بارندگی ماهیانه را حفظ می‌کند [۳۱].

پارامترهای مدل‌های تولید داده بارندگی با استفاده از داده‌های ثبت شده به دست می‌آیند. برای تولید داده‌های ماهیانه با استفاده از مدل توزیع والنسیا-شاکي، ابتدا داده‌های بارندگی

سالیانه با استفاده از مدل AR (1) مطابق رابطه زیر به دست می‌آیند [۳۱].

$$p_{i+1} = \bar{p} + \rho(p_i - \bar{p}) + v_i s \sqrt{1 - \rho^2} \quad (5)$$

که در آن  $p_i$  و  $p_{i+1}$  به ترتیب بارندگی سالیانه در  $i$  و  $i+1$  امین سال،  $\bar{p}$  میانگین بارندگی سالیانه،  $v_i$  متغیر تصادفی از توزیع نرمال استاندارد،  $\rho$  ضریب همبستگی داخلی با تأخیر یک ساله و  $s$  انحراف معیار داده‌های بارندگی سالیانه می‌باشد. سپس داده‌های سالیانه با استفاده از مدل والنسیا - شاکي به داده‌های ماهیانه توزیع می‌شوند. رابطه والنسیا - شاکي برای توزیع داده‌های بارندگی سالیانه به ماهیانه به صورت زیر می‌باشد [۳۲].

$$X_i = AZ_i + BV_i \quad (6)$$

که در آن  $X_i$  یک بردار  $(12 \times 1)$  از داده‌های ماهیانه با میانگین صفر برای سال  $i$  ام،  $Z_i$  داده سالیانه تولیدی با میانگین صفر برای سال  $i$  ام، و  $V_i$  یک بردار  $(12 \times 1)$  از متغیرهای تصادفی از توزیع نرمال استاندارد می‌باشند که از  $Z_i$  مستقل است. همچنین  $A$  و  $B$  ضرایب ثابت مدل به ترتیب با ابعاد  $(12 \times 1)$  و  $(12 \times 12)$  بوده که مقادیر آن‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی برآورد می‌شوند.

برای هر یک از ایستگاه‌های بارندگی در منطقه مطالعاتی، ۱۰۰۰ نمونه سری داده‌های بارندگی سالیانه و ماهیانه با طول دوره آماری برابر داده‌های تاریخی یعنی ۵۰ ساله با استفاده از روابط (۵) و (۶) تولید شده و سپس هر کدام از سری داده‌های بارندگی تولیدی ایستگاه‌ها برای پایش خشکسالی به ازای هفت شاخص فوق‌الذکر توسط بسته نرم‌افزاری SDSM، که توسط منتصری در سال ۱۳۹۰ توسعه یافته، مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت نتایج حاصل برای تمام سری داده‌های تولیدی (۱۰۰۰ سری) در هر ایستگاه استخراج و خلاصه شده است.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی

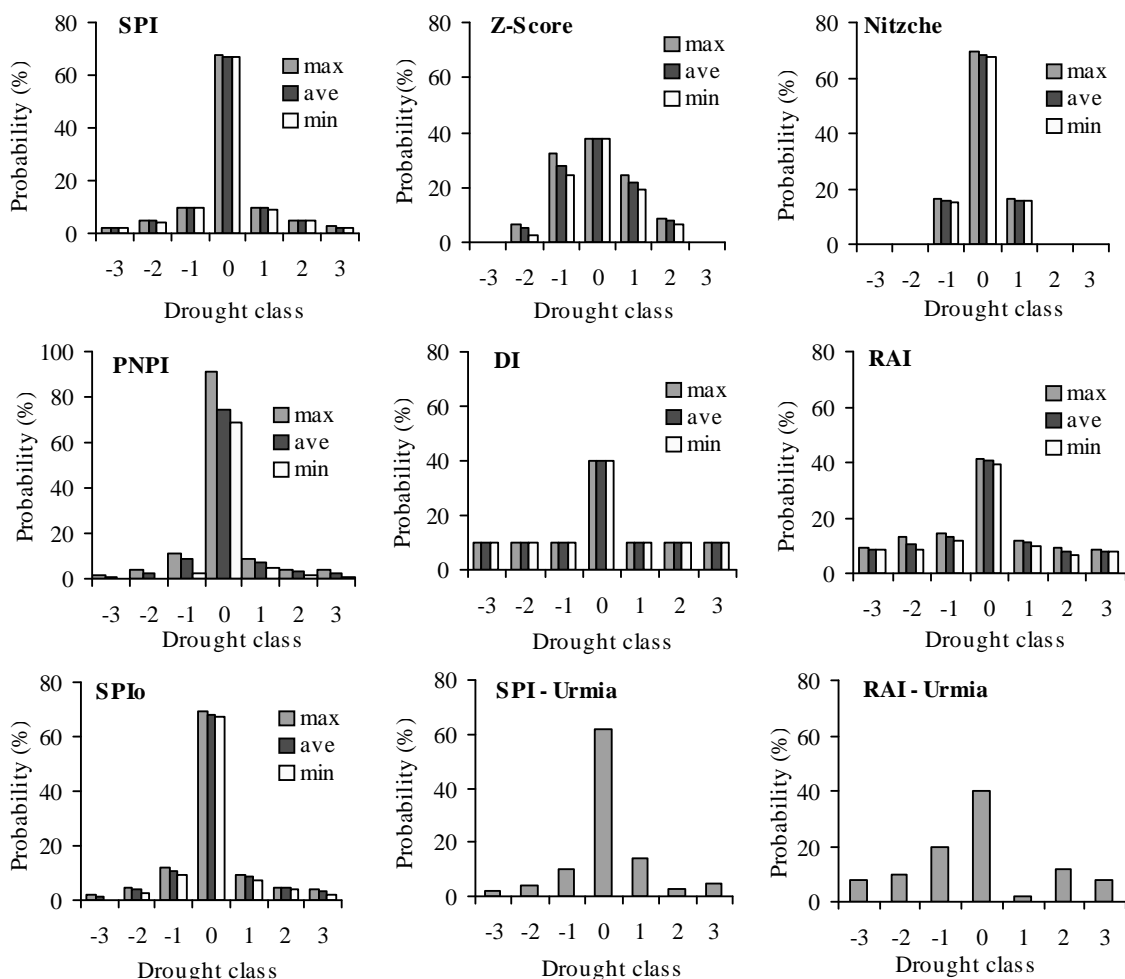
توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی به ازای هفت کلاس خشکسالی شدید (۳-)، خشکسالی متوسط (۲-)، خشکسالی ضعیف (۱-)، نرمال (۰)، ترسالی ضعیف (۱+)، ترسالی

1- Valencia - schaake

2- Disaggregation models

استوکستیک جهت تولید داده‌های مصنوعی برای پایش خشکسالی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. ضمناً نتایج داده‌های تاریخی برای سایر خصوصیات پدیده خشکسالی نیز دارای رفتار و عملکرد مشابه بوده ولی به دلیل کمبود فضا از ارائه آن‌ها در بقیه نتایج خودداری شده است. بر اساس شکل (۲)، توزیع احتمال حداکثر، متوسط و حداقل دوره‌های ترسالی و خشکسالی هفت شاخص مورد نظر برای منطقه مطالعاتی به ازای داده‌های تولیدی، در سه گروه (الف) SPI، Nitzche، SPI و (ب) Z-Score، DI، RAI و (ج) PNPI قابل تفکیک می‌باشد. توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی در گروه اول (SPI، Nitzche و SPI) مشابه توزیع نرمال استاندارد بوده، به طوری که احتمال حالت نرمال (۰) حدوداً ۰/۶۸ است و مجموع حالت‌های مختلف ترسالی و خشکسالی معادل هم بوده و هر کدام حدوداً برابر ۰/۱۶ می‌باشد.

متوسط (+۲) و ترسالی شدید (+۳) برای تمامی هفت شاخص خشکسالی در نظر گرفته شده است. البته در شاخص نیچه به دلیل عدم تفکیک دوره‌های ترسالی و خشکسالی در سه کلاس شدید، متوسط و ضعیف، دوره‌های ترسالی و خشکسالی این شاخص در یک کلاس یعنی ترسالی ضعیف و خشکسالی ضعیف طبقه‌بندی شده است. برای ارزیابی توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی از مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل احتمال هر طبقه در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی با استفاده از سری داده‌های تولیدی استفاده شده و نمودار توزیع آن‌ها برای شاخص‌های مختلف خشکسالی به همراه نمودار توزیع احتمال ایستگاه ارومیه به ازای داده‌های تاریخی در شکل (۲) ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از داده‌های تاریخی و تولیدی بیانگر رفتار و عملکرد کاملاً مشابه آن‌ها نبوده و لذا این امر پایش پیش‌بینی دقیق‌تر خشکسالی را با استفاده از داده‌های تاریخی دچار تردید جدی کرده و ضرورت استفاده از مدل‌های



شکل ۲- احتمال دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص‌های مختلف خشکسالی برای داده‌های تولیدی و تاریخی ایستگاه ارومیه

کلاس‌بندی آن‌ها (ارقام حاصل از طبقه‌بندی مانند ۲- خشکسالی متوسط، و ۳- خشکسالی شدید، به ترتیب برای مقادیر ۲/۸- و ۳/۲- مثال سری پیوسته) استفاده شده است. بررسی همبستگی برای سری داده‌های پیوسته با استفاده از سری داده‌های ۵۵۰۰۰ تایی شاخص‌ها (۱۰۰ سری از هر ایستگاه یازده‌گانه منطقه با طول دوره ۵۰ ساله) انجام پذیرفته و شاخص SPI به عنوان شاخص شاهد جهت بررسی سایر شاخص‌ها با آن در نظر گرفته شده است.

شکل (۳) همبستگی خطی سری داده‌های پیوسته شاخص SPI با سایر شاخص‌ها را برای منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. بررسی همبستگی برای سری داده‌های کلاس‌بندی با استفاده از ارقام سری داده‌های ۵۰۰۰۰ تایی شاخص‌ها در هر ایستگاه منطقه انجام پذیرفته است. در جدول (۳) متوسط احتمال همسانی کلاس‌بندی شاخص‌های مختلف بازای شاخص SPI برای منطقه مطالعاتی ارائه شده است. شکل (۳) و جدول (۳) نشان می‌دهد که همبستگی خطی سری داده‌های شش شاخص مختلف با شاخص SPI دارای انحراف بوده و هر کدام دارای رفتار متفاوت می‌باشد.

شاخص‌های SPI و Nitzche دارای طبقه‌بندی خشکسالی مشابه با SPI بوده ولی رابطه خطی کاملی مابین سری داده‌های پیوسته این دو شاخص و شاخص SPI برقرار نشده که این امر ناشی از ضریب چولگی داده‌های بارندگی ایستگاه‌های منطقه و عدم انتقال داده‌های بارندگی از توزیع احتمالی خود به توزیع نرمال مانند شاخص SPI می‌باشد.

رابطه خطی مذکور برای داده‌های بارندگی ایستگاه زنجان که دارای ضریب چولگی معادل صفر می‌باشد، بدون هیچ‌گونه انحراف و به طور کامل برقرار بوده که به دلیل کمبود فضا ارائه نشده است. ضمناً نتایج حاصل نشان می‌دهند که رابطه خطی سری داده‌های شاخص‌های DI و RAI با SPI دارای یک انحراف متقارن مشابهی برای دوره‌های ترسالی و خشکسالی بوده، به طوری که حالت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی را شدیدتر از شاخص SPI برآورد می‌کنند. انحراف از خط سری داده‌های شاخص Z-Score با SPI به صورت خطوط شکسته بوده و این امر ناشی از طبقه‌بندی متفاوت دو شاخص برای پایش خشکسالی و ضریب چولگی داده‌های بارندگی در منطقه مطالعاتی است.

در گروه اول، توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی شاخص SPI و Nitzche کاملاً متقارن بوده و دامنه تغییرات آن برای ایستگاه‌های مختلف بسیار ناچیز است. در حالی که برای شاخص SPIo، توزیع احتمال دارای تقارن کامل نبوده و عدم تقارن آن تابعی از ضریب چولگی داده‌ها است، به طوری که برای داده‌های با ضریب چولگی برابر صفر یعنی داده‌های ایستگاه زنجان توزیع احتمال کامل متقارن و برای ایستگاه تبریز با بزرگترین مقدار چولگی در منطقه برابر ۰/۹۵، توزیع احتمال بیشترین عدم تقارن را نشان می‌دهد و بالا بودن دامنه تغییرات در این شاخص نسبت به دو شاخص دیگر این گروه، ناشی از وابستگی شاخص به ضریب چولگی داده‌هاست.

توزیع احتمال در گروه دوم (RAI و DI, Z-Score) نیز متقارن بوده و همچنین دارای دامنه تغییرات ناچیزی می‌باشد ولی از توزیع نرمال استاندارد تبعیت نمی‌کند؛ به طوری که احتمال حالت نرمال (۰) در این گروه معادل ۰/۴۰ بوده و مجموع احتمال حالت‌های ترسالی و خشکسالی هر کدام معادل ۰/۳۰ می‌باشد. بنابراین به ازای شاخص‌های گروه دوم، احتمال رخداد‌های دوره‌های ترسالی یا خشکسالی نزدیک به دو برابر شاخص‌های گروه اول می‌باشد.

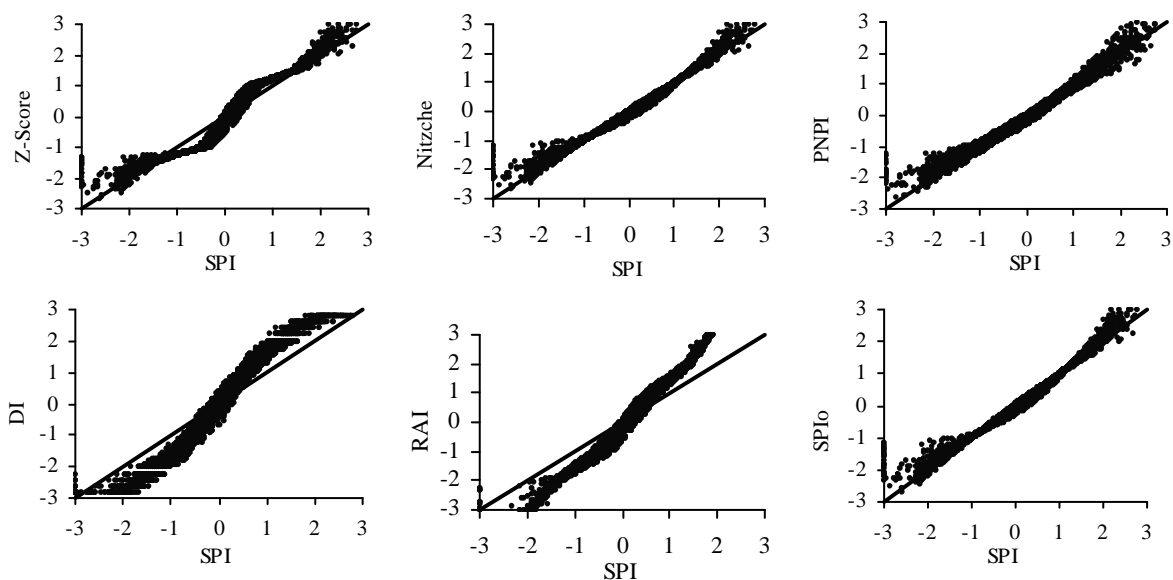
گروه سوم، تنها شاخص PNPI را شامل گردیده و توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی به ازای آن دارای دامنه تغییرات قابل توجهی بوده و توزیع احتمال در دوره‌های ترسالی و خشکسالی تابعی از متوسط بارندگی بوده و با افزایش متوسط بارندگی احتمال حالت نرمال (۰) افزایش یافته و احتمال حالت‌های ترسالی و خشکسالی کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، احتمال حالت نرمال در ایستگاه تهران با کمترین بارندگی متوسط سالیانه برابر ۰/۶۸ بوده، در صورتی که احتمال مذکور برای ایستگاه‌های خرم‌آباد و بندرانزلی با متوسط بارندگی ۵۵۰ و ۱۷۵۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۹۰ می‌رسد.

با توجه به نتایج مذکور، شاخص‌های گروه اول نسبت به شاخص‌های گروه دوم و سوم دارای ارجحیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی بوده، زیرا رخداد‌های خشکسالی و ترسالی به عنوان رخداد‌های مورد انتظار از یک پدیده حاصل از فرآیند طبیعی، دارای تطابق بیشتری با توزیع نرمال خواهد بود.

### ۲-۳- همبستگی بین سری داده شاخص‌ها

برای بررسی همبستگی شاخص‌ها از سری داده‌های شاخص به صورت پیوسته (ارقام حاصل برای آماره شاخص‌ها مثلاً ۲/۸- و ۳/۲- به ترتیب برای شاخص‌های Z-Score و SPI) و





شکل ۳- همبستگی خطی سری داده‌های پیوسته شاخص SPI با سایر شاخص‌ها برای منطقه مطالعاتی

جدول ۳- متوسط احتمال همسانی کلاس‌بندی شاخص‌های مختلف به ازای شاخص SPI برای منطقه مطالعاتی

		Z Score									Nitzche						
		-3	-2	-1	0	1	2	3			-3	-2	-1	0	1	2	3
SPI	-3	0	0.86	0.14	0	0	0	0	SPI	-3	0	0	0.99	0.01	0	0	0
	-2	0	0.65	0.35	0	0	0	0		-2	0	0	1.00	0.00	0	0	0
	-1	0	0.01	0.99	0	0	0	0		-1	0	0	0.94	0.06	0	0	0
	0	0	0	0.25	0.56	0.19	0	0		0	0	0	0	1.00	0	0	0
	1	0	0	0	0	0.92	0.08	0		1	0	0	0	0.05	0.95	0	0
	2	0	0	0	0	0.03	0.97	0		2	0	0	0	0	1.00	0	0
	3	0	0	0	0	0.00	1.00	0		3	0	0	0	0	1.00	0	0

		PNPI									DI						
		-3	-2	-1	0	1	2	3			-3	-2	-1	0	1	2	3
SPI	-3	0.22	0.51	0.23	0.04	0	0	0	SPI	-3	0.99	0.01	0	0	0	0	0
	-2	0.01	0.30	0.60	0.08	0	0	0		-2	0.99	0.01	0	0	0	0	0
	-1	0	0.01	0.57	0.42	0	0	0		-1	0.34	0.64	0.01	0	0	0	0
	0	0	0	0.00	0.99	0.00	0	0		0	0	0.06	0.15	0.60	0.15	0.05	0
	1	0	0	0	0.37	0.58	0.05	0		1	0	0	0	0	0.02	0.67	0.31
	2	0	0	0	0.02	0.38	0.48	0.12		2	0	0	0	0	0	0.01	0.99
	3	0	0	0	0	0.06	0.29	0.65		3	0	0	0	0	0	0	1

		RAI									SPIo						
		-3	-2	-1	0	1	2	3			-3	-2	-1	0	1	2	3
SPI	-3	0.99	0.01	0	0	0	0	0	SPI	-3	0.43	0.43	0.13	0.01	0	0	0
	-2	0.99	0.01	0	0	0	0	0		-2	0.03	0.62	0.35	0.00	0	0	0
	-1	0.19	0.80	0.01	0	0	0	0		-1	0	0.01	0.93	0.06	0	0	0
	0	0	0.04	0.20	0.61	0.15	0.01	0		0	0	0	0	1.00	0	0	0
	1	0	0	0	0	0.11	0.77	0.12		1	0	0	0	0.05	0.87	0.08	0
	2	0	0	0	0	0	0	1.00		2	0	0	0	0	0.03	0.76	0.20
	3	0	0	0	0	0	0	1.00		3	0	0	0	0	0.00	0.06	0.94

میزان انحراف در رابطه خطی سری داده‌های PNPI با SPI تابعی از متوسط بارندگی سالیانه ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی بوده و از یک روند مشخصی برای تمام ایستگاه‌ها تبعیت نمی‌کند.

همچنین سه شاخص RAI, DI, و Z-Score تنها حدود ۶۰ درصد حالت‌های نرمال شاخص SPI را همسان کلاس‌بندی کرده و مابقی (۴۰ درصد) را در حالت‌های خشکسالی و ترسالی طبقه‌بندی می‌کنند.

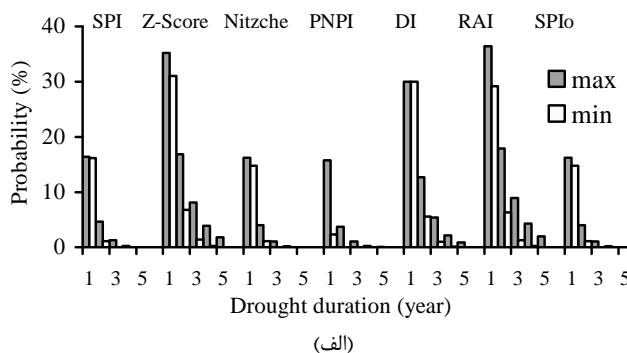
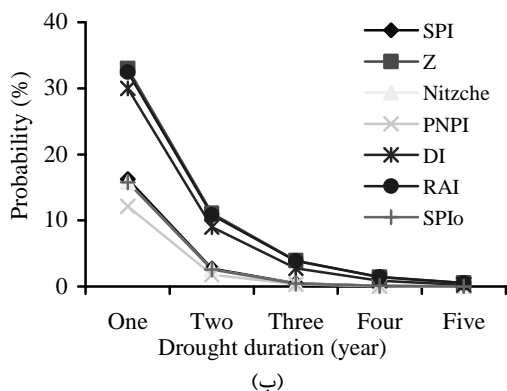
۳-۳- پارامترهای اصلی خشکسالی

در این مطالعه پارامترهای مهم و تعیین کننده مدت، شدت و فاصله زمانی بین دو خشکسالی مورد نظر بوده و مقادیر پارامترهای فوق به ازای متوسط ۱۰۰۰ سری داده تولیدی برای هر ایستگاه در منطقه برآورد گردیده است. متوسط، حداکثر و حداقل احتمال مدت تداوم، فاصله زمانی بین خشکسالی‌ها و شدت‌های خشکسالی یازده ایستگاه در منطقه مطالعاتی به ترتیب در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) ارائه شده است. بر اساس نتایج مذکور، برآورد مدت تداوم، شدت و فاصله زمانی بین خشکسالی‌ها با استفاده از هفت شاخص در سه گروه (الف) SPI، Nitzche و SPIo، (ب) Z-Score، DI و RAI و (ج) PNPI قابل تفکیک بوده و عملکرد شاخص‌ها در هر گروه مشابه هم بوده و با سایر گروه‌ها متفاوت می‌باشد. احتمال مدت تداوم خشکسالی یک تا پنج ساله در گروه (الف) کمتر از گروه (ب) بوده، به طوری که احتمال خشکسالی یک ساله در گروه (ب) (۳۰ درصد) حدود دو برابر گروه (الف) (۱۶ درصد) برآورد شده است (شکل (۴)). همچنین دامنه تغییرات مدت تداوم

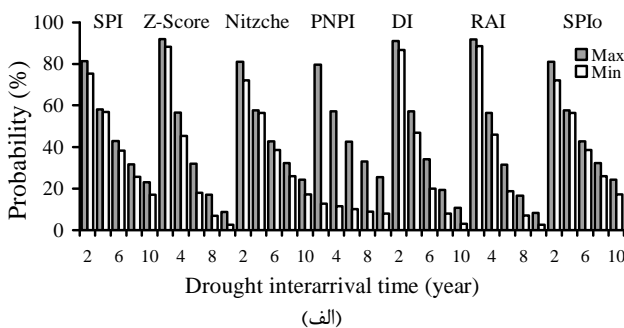
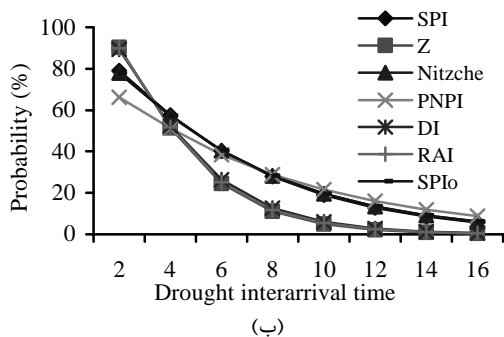
خشکسالی در ایستگاه‌های منطقه به ازای شاخص‌های گروه اول بسیار کم و در گروه‌های (ب) و (ج) به ترتیب به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

احتمال فاصله زمانی دو ساله بین خشکسالی‌ها در شاخص‌های گروه (الف) (۸۰ درصد) کمتر از شاخص‌های گروه (ب) (۹۰ درصد) بوده ولی برای فاصله زمانی چهار ساله و بیشتر، احتمال مذکور برای شاخص‌های گروه (الف) بیشتر از شاخص‌های گروه (ب) برآورد شده است (شکل (۵)). دامنه تغییرات فاصله زمانی بین خشکسالی در ایستگاه‌های منطقه به ازای شاخص‌های گروه (الف) و (ب) تقریباً معادل هم بوده ولی مقدار آن برای شاخص PNPI نسبت به دو گروه مذکور بسیار بالا است.

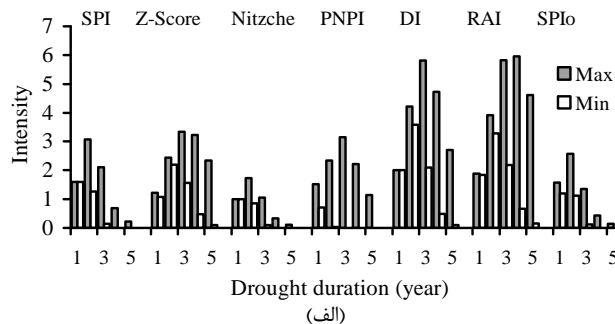
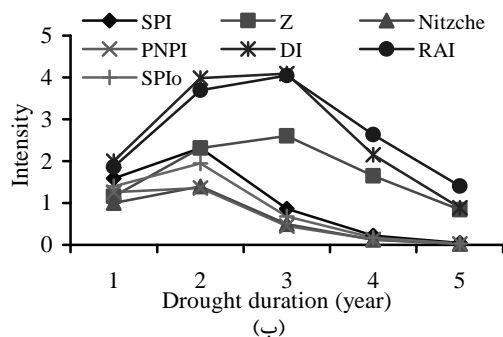
شدت خشکسالی‌ها به ازای شاخص‌های گروه (الف) کمتر از شاخص‌های گروه (ب) بوده، به طوری که شدت خشکسالی در این گروه حداکثر به مقدار ۲ در مدت دوام دو ساله خشکسالی می‌رسد (شکل (۶)).



شکل ۴- احتمال مدت تداوم خشکسالی یازده ایستگاه در منطقه مطالعاتی (الف) مقادیر حداکثر و حداقل، (ب) متوسط مقدار



شکل ۵- احتمال فاصله زمانی بین خشکسالی یازده ایستگاه در منطقه مطالعاتی: (الف) مقادیر حداکثر و حداقل (ب) مقدار متوسط



شکل ۶- احتمال شدت‌های خشکسالی یازده ایستگاه در منطقه مطالعاتی: (الف) مقادیر حداکثر و حداقل (ب) مقدار متوسط

به دنبال خشکسالی (DD) و ترسالی به دنبال ترسالی (WW) به ازای افزایش همبستگی داخلی با تأخیر یک ساله افزایش پیدا می‌کند و همچنین احتمال شرطی DW و WD به ازای افزایش همبستگی داخلی با تأخیر یک ساله روند کاهشی نشان می‌دهد.

### ۳-۵- همگرایی پدیده خشکسالی سالیانه با ماه‌های مختلف سال

برای بررسی تأثیر ماه‌های مختلف در موقعیت خشکسالی سالانه، تحلیل خشکسالی به ازای داده‌های ماهیانه مصنوعی تولیدی در نمونه زیاد (۱۰۰۰ سری) برای هر کدام از ماه‌های مختلف سال به همراه داده‌های سالیانه با استفاده از شاخص‌های منتخب در تمام یازده ایستگاه منطقه انجام پذیرفته است.

برای نمایش تأثیر ماه‌های مختلف در موقعیت خشکسالی سالانه از احتمال هم‌زمانی خشکسالی ماهیانه و سالیانه ایستگاه‌های منطقه استفاده شده و با استفاده از نمودار Box plot برای هر شاخص به ازای حداکثر، حداقل و محدوده ۲۵ و ۷۵ درصد هم‌زمانی در شکل (۸) برای منطقه مطالعاتی ارائه شده است. نمودار مذکور بیانگر رفتار مشابه شاخص‌های SPI، Nitzche و SPIO و همچنین تا حدود قابل قبولی شاخص DI می‌باشد؛ به طوری که ماه‌های پرباران سال یعنی نوامبر تا انتهای می (۱۰ آبان تا ۱۰ خرداد)، نقش اصلی در تعیین موقعیت خشکسالی سال ایفا نموده و بقیه ماه‌های سال که به عنوان ماه‌های کم باران مطرح هستند، تقریباً نقش بسیار ناچیزی دارند.

متوسط شدت خشکسالی یک ساله در منطقه برای تقریباً تمامی شاخص‌های هفت‌گانه کمتر از شدت خشکسالی دو ساله بوده که غیرمحمول به نظر رسیده، ولی این امر ناشی از همبستگی داخلی با تأخیر یک ساله ( $\rho$ ) داده‌های بارندگی در ایستگاه‌های منطقه بوده، به طوری که مقدار شدت خشکسالی یک ساله ایستگاه قزوین با مقدار  $\rho$  برابر  $0.27-$  بیشتر از شدت خشکسالی دو ساله آن بوده ولی با افزایش  $\rho$ ، شدت‌های دو ساله نیز نسبت به شدت‌های یک ساله افزایش بیشتری دارند که به دلیل کمبود فضا نتایج مربوطه ارائه نشده است.

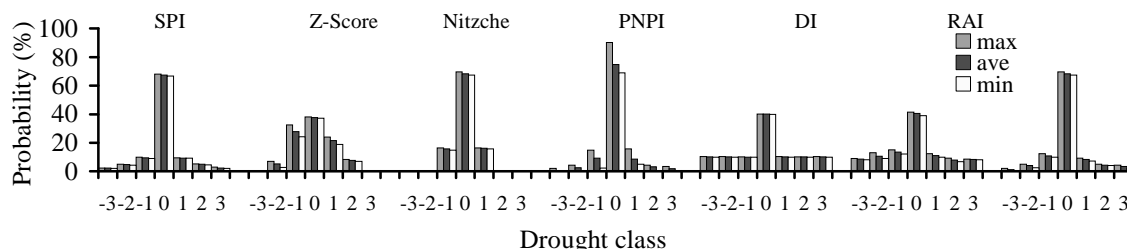
### ۳-۴- ماتریس احتمال انتقال

برای بررسی احتمال‌های شرطی حالت‌های مختلف خشکسالی، ماتریس احتمال انتقال<sup>۱</sup> به ازای هفت حالت خشکسالی شدید (۳-)، خشکسالی متوسط (۲-)، خشکسالی ضعیف (۱-)، نرمال (۰)، ترسالی ضعیف (۱+)، ترسالی متوسط (۲+) و ترسالی شدید (۳+) به کار گرفته شده است. در شکل (۷) حداکثر، متوسط و حداقل بردار پایدار ایستگاه‌های منطقه ارائه شده و نتایج حاصل کاملاً مشابه نتایج توزیع احتمال حالت‌های مختلف ترسالی و خشکسالی (بند ۳-۱) می‌باشد. همچنین برای تحلیل آسان احتمالات شرطی، تعداد حالت‌های مختلف ترسالی و خشکسالی هر کدام در یک کلاس (خشکسالی، D و ترسالی، W) تجمیع شده و در جدول (۴) ماتریس انتقال چهار ایستگاه منطقه برای شاخص‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که احتمال شرطی حالت DD (رخداد خشکسالی به دنبال خشکسالی در سال قبل)، DW، WD و WW تابعی از ضریب همبستگی داخلی با تأخیر یک ساله داده‌های بارندگی بوده، به طوری که احتمال رخداد خشکسالی

1- Transition Probability Matrix

جدول ۴- ماتریس انتقال سه حالت خشکسالی (D)، نرمال (N) و ترسالی (W) چهار ایستگاه منطقه برای شاخص‌های مختلف

Gazvin (-0.27)				Arak (-0.10)				Kermanshah (0.10)				Urmia (0.25)			
SPI	D	N	W	SPI	D	N	W	SPI	D	N	W	SPI	D	N	W
D	0.07	0.15	0.27	D	0.14	0.16	0.19	D	0.17	0.17	0.15	D	0.24	0.16	0.10
N	0.65	0.68	0.66	N	0.68	0.67	0.67	N	0.68	0.67	0.68	N	0.67	0.67	0.66
W	0.28	0.15	0.07	W	0.20	0.16	0.13	W	0.15	0.17	0.18	W	0.10	0.17	0.24
Z-Score	D	N	W	Z	D	N	W	Z	D	N	W	Z	D	N	W
D	0.21	0.32	0.45	D	0.29	0.33	0.35	D	0.35	0.35	0.32	D	0.42	0.34	0.26
N	0.38	0.39	0.36	N	0.39	0.37	0.38	N	0.38	0.37	0.38	N	0.37	0.38	0.38
W	0.41	0.29	0.19	W	0.33	0.30	0.26	W	0.28	0.29	0.30	W	0.21	0.27	0.36
Nitzche	D	N	W	Nitzche	D	N	W	Nitzche	D	N	W	Nitzche	D	N	W
D	0.07	0.16	0.27	D	0.13	0.16	0.19	D	0.16	0.16	0.14	D	0.22	0.15	0.09
N	0.65	0.69	0.66	N	0.68	0.68	0.68	N	0.69	0.68	0.69	N	0.68	0.69	0.68
W	0.28	0.16	0.07	W	0.19	0.16	0.13	W	0.15	0.16	0.17	W	0.09	0.16	0.23
PNPI	D	N	W	PNPI	D	N	W	PNPI	D	N	W	PNPI	D	N	W
D	0.06	0.12	0.24	D	0.12	0.15	0.18	D	0.13	0.12	0.11	D	0.22	0.13	0.08
N	0.69	0.75	0.71	N	0.69	0.70	0.69	N	0.74	0.74	0.75	N	0.69	0.72	0.70
W	0.25	0.13	0.04	W	0.19	0.15	0.12	W	0.12	0.14	0.14	W	0.08	0.14	0.22
DI	D	N	W	DI	D	N	W	DI	D	N	W	DI	D	N	W
D	0.19	0.30	0.41	D	0.26	0.31	0.33	D	0.30	0.31	0.28	D	0.37	0.30	0.22
N	0.40	0.40	0.40	N	0.41	0.39	0.41	N	0.41	0.39	0.41	N	0.41	0.39	0.40
W	0.42	0.29	0.19	W	0.33	0.30	0.26	W	0.29	0.30	0.31	W	0.22	0.30	0.37
RAI	D	N	W	RAI	D	N	W	RAI	D	N	W	RAI	D	N	W
D	0.20	0.31	0.44	D	0.28	0.32	0.34	D	0.34	0.34	0.31	D	0.44	0.34	0.26
N	0.41	0.42	0.39	N	0.42	0.41	0.41	N	0.41	0.40	0.41	N	0.39	0.40	0.41
W	0.38	0.26	0.17	W	0.31	0.27	0.24	W	0.25	0.26	0.28	W	0.18	0.25	0.33
SPIo	D	N	W	SPIo	D	N	W	SPIo	D	N	W	SPIo	D	N	W
D	0.07	0.15	0.27	D	0.13	0.15	0.19	D	0.16	0.16	0.15	D	0.22	0.15	0.09
N	0.66	0.69	0.66	N	0.68	0.68	0.68	N	0.69	0.68	0.69	N	0.68	0.69	0.68
W	0.28	0.16	0.07	W	0.19	0.17	0.13	W	0.15	0.16	0.17	W	0.09	0.15	0.23

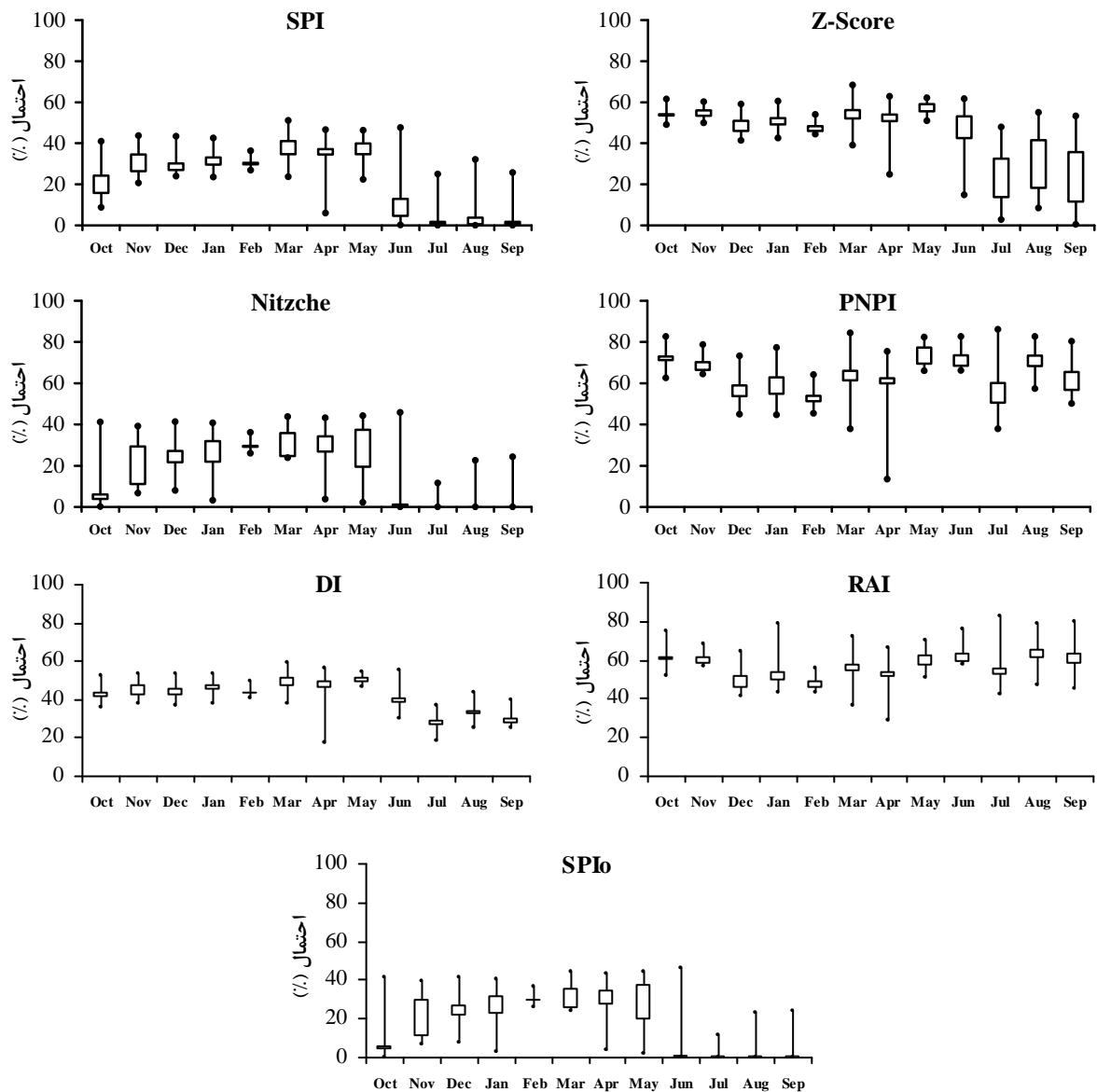


شکل ۷- حداکثر، متوسط و حداقل بردار پایدار به ازای شاخص‌های مختلف در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه، به کارگیری روش شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل‌های جامع و دقیق‌تر پدیده خشکسالی ضروری و لازم به نظر رسیده و استناد به نتایج حاصل از داده‌های تاریخی در چنین تحلیل‌هایی بسیار نامطمئن و با خطای بالایی همراه خواهند بود.

در شاخص‌های مابقی یعنی Z-Score، RAI و PNPI نقش اصلی در تعیین موقعیت خشکسالی سال بر عهده ماه‌های کم باران بوده، به طوری که به عنوان مثال اگر ماه آگوست (مرداد) با کمتر از یک درصد بارندگی سالیانه، در حالت خشکسالی باشد، به ازای شاخص‌های RAI و PNPI بالای ۸۰ درصد احتمال، همان سال در حالت خشکسالی قرار خواهد گرفت. در حالی که این تأثیر در شاخص SPI، Nitzche و SPIo تقریباً نزدیک به صفر می‌باشد. خشکسالی‌های کوتاه مدت و یا برعکس، با خطای بالایی خواهند بود.



شکل ۸- تأثیر ماه‌های مختلف در موقعیت خشکسالی سالانه بازای شاخص‌های مختلف در منطقه مطالعاتی

SPIo به ترتیب ناشی از محدودیت طبقه دوره‌های خشکسالی و ترسالی‌ها و عدم انتقال داده‌های بارندگی از توزیع احتمالی خود به توزیع نرمال می‌باشد. توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی به ازای شاخص‌های گروه دوم علی‌رغم تفاوت‌های اساسی، دارای احتمال حالت نرمال (۴۰ درصد) و مجموع احتمال حالت‌های ترسالی و خشکسالی معادل هم بوده و توزیع احتمالی آن‌ها نسبت به توزیع نرمال بسیار پخ‌تر می‌باشد. بنابراین رفتار و عملکرد شاخص‌های گروه اول نسبت به شاخص‌های گروه دوم در پایش خشکسالی بسیار نزدیک به رخدادهای مورد انتظار از فرآیندهای طبیعی که معمولاً دارای توزیع نرمال هستند. توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و

شاخص‌های خشکسالی مورد مطالعه بر اساس خصوصیات حاصل برای پدیده خشکسالی در منطقه، در سه گروه کلی شامل:

الف) SPI، Nitzche و SPIo (ب) Z-Score، DI و RAI (ج) PNPI قابل تفکیک بوده و شاخص‌های هر گروه علی‌رغم تفاوت‌های قابل توجه، دارای رفتار و عملکرد مشابهی در پایش خشکسالی می‌باشند.

نتایج بندهای ۱-۳ و ۳-۴ برای سه گروه تفکیکی فوق نشان می‌دهند که توزیع احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی به ازای شاخص‌های گروه اول دارای تطابق بسیار نزدیک (شاخص‌های Nitzche و SPIo) یا کامل (شاخص SPI) با توزیع نرمال استاندارد بوده و عدم تطابق کامل در شاخص‌های Nitzche و

نتایج بند ۳-۴ نشان می‌دهند که در شاخص‌های گروه اول، ماه‌های پرباران نقش اصلی را در تعیین موقعیت خشکسالی سال ایفا نموده، ولی در شاخص‌های گروه دوم این همگرایی ملاحظه نمی‌شود. لذا به کارگیری شاخص‌های گروه دوم برای تحلیل هم‌زمانی پدیده خشکسالی در پریودهای کوتاه مدت و بلند مدت و یا استناد به نتایج حاصل پدیده خشکسالی کوتاه مدت برای پیش‌بینی یا استخراج خشکسالی‌های بلند مدت یا برعکس، منجر به خطا خواهد بود.

نهایتاً نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به کارگیری شاخص‌های SPI و SPIo به ترتیب مزیت نسبی بالایی برای یک تحلیل جامع و دقیق‌تر داشته و شاخص Nitzche هم برای تحلیل‌های اولیه یا مقدماتی بسیار مناسب خواهد بود. استفاده از شاخص‌های گروه دوم برای پدیده خشکسالی انحراف قابل توجهی از رخدادهای مورد انتظار از فرآیندهای طبیعی را داشته و نتایج آن نمی‌تواند برای پیش‌بینی رخداد خشکسالی قابل اطمینان باشد. شاخص PNPI به عنوان تنها شاخص خشکسالی گروه سوم، ناکارآمدترین شاخص برای پایش خشکسالی بوده و استناد به نتایج حاصل از این شاخص برای پیش‌بینی خصوصیات خشکسالی دارای خطای بالا و گمراه کننده خواهد بود.

##### ۵- مراجع

- [1] Wilhite, D. A., "Drought: A Global Assessment", Rutledge Press, London and New York, Volume I, 2000.
- [2] Heim Jr., "A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States" Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83 (8), 1149-1166.
- [3] Mishra, A. K., Singh, V. P., "Drought Modeling - A Review", Journal of Hydrology, 2011, 403 (1-2), 157-175.
- [4] Wilhite, D. A., Glantz, M. H., "Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions", Water International, 1985, 10, 111-120.
- [5] AMS (American Meteorological Society), "Statement on Meteorological Drought", Bulletin of American Meteorological Society, 2004, 85, 771-773.
- [6] Barua, S., Ng, A. W. M., Perera, B. J. C., "Comparative Evaluation of Drought Indices: A Case Study on The Yarra River Catchment in Australia", Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137 (2), 215-226.

خشکسالی به ازای شاخص PNPI به عنوان تنها شاخص گروه سوم برای ایستگاه‌های مختلف منطقه دارای تفاوت بسیار زیادی بوده و تابعی از مقدار متوسط بارندگی در هر ایستگاه می‌باشد. لذا رفتار و عملکرد شاخص PNPI برای پایش خشکسالی مستقل از مکان نبوده و استناد به نتایج حاصل از این شاخص در پیش‌بینی خشکسالی بسیار نامطمئن خواهد بود.

نتایج بند ۳-۲ برای شاخص‌های مختلف خشکسالی بیانگر اثر ضریب چولگی در عدم تطابق کامل رابطه خطی سری داده‌های شاخص‌های Nitzche و SPIo با شاخص SPI می‌باشد. همچنین نتایج مذکور نشان می‌دهد که شاخص‌های DI و RAI حالت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی را شدیدتر از شاخص SPI برآورد می‌کنند، که این امر ناشی از فرض احتمال تقریباً (RAI) یا کاملاً (DI) برابر رخدادهای سه حالت مختلف ترسالی و خشکسالی (ضعیف، متوسط و شدید) می‌باشد که مغایر با رخدادهای مورد انتظار از پدیده‌های طبیعی است. از طرف دیگر، شاخص Z-Score به دلیل نحوه کلاس‌بندی دوره‌های ترسالی و خشکسالی، برای تعیین حالت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی، یک گرایش به نقطه مرکزی یعنی حالت نرمال داشته و حالت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی را خفیف‌تر از شاخص SPI تعیین می‌کند.

نتایج بند ۳-۳ بیانگر برآورد احتمال‌های بیشتر مدت تداوم خشکسالی به ازای شاخص‌های خشکسالی گروه دوم نسبت به شاخص‌های گروه اول می‌باشند، که این مسئله ناشی از پایین‌تر بودن احتمال حالت نرمال در این گروه (۴۰٪) نسبت به گروه اول (۶۸ درصد) بوده و احتمال دوره‌های ترسالی و خشکسالی در این گروه تقریباً دو برابر گروه اول است.

شاخص‌های مورد نظر به ازای نتایج حاصل برای پارامترهای اصلی خشکسالی (بند ۳-۳) نیز در سه کلاس ذکر شده قابل تفکیک بوده و احتمال مدت تداوم و شدت خشکسالی گروه اول پایین‌تر از شاخص‌های گروه دوم بوده و این امر به دلیل دو برابر بودن احتمال سه حالت خشکسالی در گروه دوم نسبت به شاخص‌های گروه اول و همچنین همسان بودن احتمال سه حالت خشکسالی در شاخص‌های گروه دوم می‌باشد.

نتایج حاصل برای احتمال‌های شرطی حالت‌های مختلف ترسالی و خشکسالی بیانگر مشابهت رفتار شاخص‌ها در سه گروه مطرح شده بوده و احتمال‌های شرطی یعنی DD, WW, DW و WD برای تمامی شاخص‌ها تابعی از همبستگی داخلی با تأخیر یک‌ساله ( $\rho$ ) داده‌های بارندگی می‌باشد. بنابراین پارامتر  $\rho$  نقش بسیار مهمی در احتمال‌های شرطی در پایش خشکسالی‌ها به عهده دارد.

- Company, London, High Wycombe, 1976. pp 400-401.
- [19] McGhee, J. W., "Introductory Statistics", West Publishing Co., New York, USA, 1985.
- [20] Vogel, R. M., Kroll, C. N., "Low Flow Frequency Analysis Using Probability Plot Correlation Coefficients", Journal of Water Resources Planning and Management, 1989, 115 (3), 338-357.
- [21] Oladipo, E. O., "A Comparative Performance Analysis of Three Meteorological Drought Indices", Journal of Climatology, 1985, 5, 655-664.
- [22] Hayes, M. J., Michael, J., "What is Drought? Drought Indices", Climate Impacts Specialist, National Drought Mitigation Center, 2002.
- [23] Nitzche, M. H., Silva, B. B., Martinez, A. S., "Indicativo de ano Seco e Chuvoso. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia", Londrina-PR, Brazil, 1985, pp 307-314.
- [24] Willeke, G., Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., Guttman, N. B., "The National Drought Atlas", Institute for Water Resources Report 94-NDs-4, US Army Corps of Engineers, 1994.
- [25] Mishra, A. K., Singh, V. P., Desai, V. R., "Drought Characterization: A Probabilistic Approach", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23 (1), 41-55.
- [26] Mckee, T. B., Doesken, N. Y., Kleist, Y., "The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales", Preprints, 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January, 1993, pp 179-184.
- [27] Edwards, D. C., Mckee, T. B., "Characteristics of 20<sup>th</sup> Century Drought in the United State at Multiple Time Scales", Atmospheric Science, 1997, 634, 1-30.
- [28] Douglas, H., "How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business", John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2000, pp 43-47.
- [29] Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., "Applied Hydrology", McGraw-Hill Book Co., New York, 1988.
- [30] Salas, J. D., "Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series", in handbook of Hydrology, Edited by Maidment, McGraw-Hill book Co., New York, 1993.
- [31] McMahan, T. A., Mein, R. G., "River and Reservoir Yield", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 1986.
- [32] Valencia, D., Schaake, J. C., "Disaggregation Processes in Stochastic Hydrology", Water Resources Research, 1973, 9 (3), 580-585.
- [7] Moreira, E. E., Coelho, C. A., Paulo, A. A., Pereira, L. S., Mexia, J. T., "SPI-based Drought Category Prediction Using Loglinear Models", Journal of Hydrology, 2008, 354, 116-130.
- [8] Mishra, A. K., Vijay, P. S., "A Review of Drought Concepts", Journal of Hydrology, 2010, 391, 202-216.
- [9] Panu, U. S., Sharma, T. C., "Challenge in Drought Research: Some Perspectives and Future Directions", Hydrological Science Journal, 2002, 47, 19-30.
- [10] Guttman, N. B., "Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm", Journal of American Water Resources Management, 1999, 35, 311-322.
- [11] Keyantash, J., Dracup, J. A., "The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices", Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83 (8), 1167-1180.
- [12] Morid, S., Smakhtin, V., Moghaddasi, M., "Comparison of Seven Meteorological Indices for Drought Monitoring in Iran", International Journal of Climatology, 2006, 26, 971-985.
- [13] Lokas, A., Vasiliades, L., Dalezios, N. R., "Inter Comparison of Meteorological Drought Indices for Drought Assessment and Monitoring in Greece", 8<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology Lemnos Island, 8-10 September, 2003, pp 484-491.
- [۱۴] سبزی‌پور، ع.، کاظمی، آ.، "ارزیابی تطبیقی هفت نمایه خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای"، مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۸۹، ۱۲ (۱)، ۹۷-۱۱۱.
- [۱۵] خلیقی سیگارودی، ش.، صادقی سنگدهی، ع.، اوسطی، خ.، قویدل رحیمی، ی.، "بررسی نمایه‌های ارزیابی ترسالی و خشکسالی (SPI, PNPI, Nitzche) (مطالعه موردی استان مازندران)". فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۳۸۸، ۱۶ (۱)، ۴۴-۵۴.
- [16] Adeloye A. J., Montaseri M., "Preliminary Streamflow Data Analyses Prior to Water Resources Planning Study", Hydrological Sciences Journal, 2002, 47 (5), 679-692.
- [17] Bars, R. L., "Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science", Addison-Wesley Publishing Co., New York, USA, 1990.
- [18] Kendall M. G., Stuart A., "The Advanced Theory of Statistics", Charles Griffin &