



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و ششم، شماره ششم، ۱۳۹۸  
۳۱-۵۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15612.3079

## ارزیابی خشک‌سالی بر اساس پایداری طولانی‌مدت روند بارش و دما در حوضه دره رود اردبیل

مجتبی فریدپور<sup>۱</sup>، \*بتول زینالی<sup>۲</sup>، صیاد اصغری<sup>۳</sup>، اردوان قربانی<sup>۴</sup> و مجید رضایی بنفشه<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، استاد گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** از جمله مخاطرات طبیعی مهم که با توجه به آسیب‌های گسترده، بر تعداد قابل توجه از انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، خشک‌سالی است. هم‌چنین خشک‌سالی، پدیده‌ای است که مستقیماً به مسأله کمبود آب مربوط می‌شود و به دلیل برگشت‌پذیر بودن می‌تواند جنبه‌های مختلف زندگی انسان و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد. خشک‌سالی تقریباً تمامی عوامل تعیین‌کننده چرخه هیدرولوژیکی از آغاز بارش و سپس جریان آب سطحی و در نهایت ذخیره‌سازی در آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، در پژوهش حاضر با توجه به نتایج روند پایدار بارش و دما در حوضه دره رود اردبیل، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به‌عنوان شاخص متکی بر بارش با شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI) به‌عنوان شاخص ترکیب‌کننده پارامترهای تبخیر و تعرق بالقوه و بارش، در بازه‌های زمانی مختلف با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شد.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش به منظور شناسایی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی، از داده‌های بارندگی ماهانه، کمینه و بیشینه دمای ماهانه هفت ایستگاه هم‌دید در بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در حوضه دره رود اردبیل واقع در شمال غرب ایران استفاده شد. به منظور شناسایی روند در سری زمانی بارش و دما در این پژوهش با استفاده مدل‌های من-کندال و شیب سن صورت گرفت و به منظور ارزیابی پایداری طولانی‌مدت روند در سری زمانی داده‌ها از منحنی LOWESS (در سطح معنی‌داری ۵٪) استفاده شد. هم‌چنین با استفاده از شاخص خشکی، چهار ایستگاه در منطقه خشک و سه ایستگاه در منطقه نیمه‌خشک واقع شدند. به منظور محاسبه شاخص RDI از مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه استفاده شد. مقدار PET در شاخص RDI با استفاده از اطلاعات درجه حرارت ماهانه و با روش هارگریوز به‌دست آمد. در ادامه هر دو شاخص در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با یکدیگر مقایسه شدند.

**یافته‌ها:** نتایج روند من-کندال نشان داد که در سری زمانی مقادیر بارش، ماه‌های نوامبر و فوریه و در سری زمانی مقادیر دما، ماه‌های اکتبر و دسامبر هیچ روندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده نشد. این در حالی است که در سایر ماه‌ها و حتی مقادیر سالانه و فصلی، همه ایستگاه‌ها حداقل یک مورد روند در سری زمانی بارش و دما را تجربه

\* مسئول مکاتبه: zeynali.b@uma.ac.ir

کرده‌اند. هم‌چنین نتایج منحنی LOWESS نشان داد که دمای سالانه در همه ایستگاه‌ها از یک سناریوی افزایشی پیروی می‌کند. درحالی‌که بارندگی رفتار متفاوتی و اغلب کاهشی دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که شاخص‌های SPI و RDI در بازه‌های زمانی مختلف و طبقات خشک‌سالی و ترسالی بسیار مشابه یکدیگر رفتار کرده و مقدار  $R^2$  در بسیاری از موارد ۰/۹۰ است. شدیدترین خشک‌سالی مشاهده‌شده در مدل‌های SPI و RDI مربوط به ایستگاه اردبیل در سال آبی ۲۰۱۰-۲۰۱۱ و در بازه ۳ ماهه است که مقادیر آن به ترتیب ۳/۱۱- و ۳/۰۹- بوده است. هم‌چنین نتایج نشان داد که RDI مقادیر ترسالی شدید و خیلی شدید را بزرگ‌تر از SPI نشان می‌دهد. در نهایت هر دو شاخص مشابهت‌های زیادی با یکدیگر دارند اما به دلیل استفاده RDI از PET می‌تواند برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به صورت گسترده‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

**نتیجه‌گیری:** به منظور مقایسه رویدادهای خشک‌سالی و ترسالی در حوضه آبریز دره‌رود اردبیل واقع در شمال غرب ایران از دو شاخص SPI و RDI استفاده شد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک اکثر مناطق ایران، مقدار بارش صفر در برخی از فصول محتمل است؛ بنابراین شاخص‌های متکی بر بارندگی مانند SPI ممکن است کارایی کم‌تری نسبت به شاخص RDI که علاوه بر بارندگی، تبخیر و تعرق بالقوه (PET) را نیز در فرمول‌بندی خود لحاظ می‌کند، داشته باشد. با توجه به اهمیت پارامتر PET در بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب در ایران، می‌طلبد که شاخص RDI را در دیگر مناطق ایران مانند شمال غرب و مناطق کوهستانی ایران، به صورت گسترده بررسی گردد و نتایج آن را با دیگر شاخص‌ها مانند شاخص مهم و پرکاربرد SPI مقایسه شود.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص‌های خشک‌سالی، تبخیر و تعرق بالقوه، رگرسیون خطی، منحنی LOWESS، حوضه دره‌رود اردبیل

## مقدمه

محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد (۲۸). یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت منابع آب، پایش و پیش‌بینی وقایع خشک‌سالی است (۲۱). خشک‌سالی تقریباً تمامی عوامل تعیین‌کننده چرخه هیدرولوژیکی از آغاز بارش و سپس جریان آب سطحی و در نهایت ذخیره‌سازی در آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۲). با این حال، درک بهتر تنوع فضایی و زمانی خشک‌سالی برای کشورهای درگیر خشک‌سالی بسیار مهم است (۳۱). شاخص‌های خشک‌سالی، ابزار ضروری برای مشخص کردن و پایش خشک‌سالی هستند، زیرا آن‌ها عملکردهای آب‌وهوایی را ساده نموده و می‌توانند ناهنجاری‌های هواشناسی را به عنوان شدت، مدت زمان و فرکانس اندازه‌گیری کنند (۳۳). هم‌چنین این شاخص‌ها، روابط پیچیده بین بسیاری از

از جمله مخاطرات طبیعی مهم که با توجه به آسیب‌های گسترده، بر تعداد قابل‌توجهی از انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، خشک‌سالی است (۳۶). خشک‌سالی یک پدیده بسیار پیچیده است که نه تنها اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه تولید محصولات کشاورزی را نیز با مخاطره روبرو می‌کند (۱۲). بنابراین شناخت ویژگی‌های خشک‌سالی مانند هشدار زودهنگام خشک‌سالی (۱۳) و مدیریت ریسک و تجزیه و تحلیل خشک‌سالی (۸) به مدیران، اجازه آماده‌سازی بهتر برای مواجهه با این پدیده را می‌دهد. هم‌چنین خشک‌سالی، پدیده‌ای است که مستقیماً به مسأله کمبود آب مربوط می‌شود و به دلیل برگشت‌پذیر بودن می‌تواند جنبه‌های مختلف زندگی انسان و

سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱، خشک‌سالی شدید در منطقه رخ داده است. مقدار شدیدترین خشک‌سالی در سال ۱۹۹۹، برابر با  $SPI = -2/24$  بوده است (۱). خان و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با استفاده از منحنی LOWESS به بررسی سری زمانی بارش و دما به صورت فصلی و سالانه و همچنین پایش خشک‌سالی در حوضه رودخانه سونگوا<sup>۱</sup> در کشور چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بارش در فصل زمستان و پاییز افزایش می‌باشد و دارای روند کاهشی شدید در پاییز است. مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ ) در این پژوهش نشان داد که یک رابطه قوی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی در سری زمانی داده‌های بارش و دما برقرار است (۱۲). از جمله پژوهشگرانی که از رگرسیون LOWESS در پژوهش‌های خود استفاده نموده‌اند می‌توان به فینگ و همکاران (۲۰۱۶) و تاکسک و همکاران (۲۰۱۴) اشاره نمود (۵ و ۲۶). مراتبی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با استفاده از ۱۲۳ ایستگاه بارندگی، به بررسی تنوع فضایی و زمانی خشک‌سالی در شمال شرق الجزایر با استفاده از شاخص‌های SPI و RDI در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو شاخص در تمام بازه‌های زمانی رفتار مشابه و هماهنگی دارند. با این حال شاخص RDI در مناطق جنوبی منطقه خشک‌سالی‌های شدید و متوسط را با حساسیت بیشتری نشان می‌دهد (۱۸). همچنین پژوهشگران متعددی از شاخص‌های خشک‌سالی RDI و SPI به صورت هم‌زمان و یا در مقایسه با سایر پدیده‌ها استفاده کرده‌اند که می‌توان به رحمت و همکاران (۲۰۱۵)، تیگکاس و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶)، نیلاکانس و همکاران (۲۰۱۷) و سورندران و همکاران (۲۰۱۷) اشاره نمود (۱۹، ۲۰، ۲۵، ۲۹ و ۳۰). با توجه

پارامترهای مرتبط با آب‌وهوا را که در برخی مطالعات تغییرات آب‌وهوایی (۳) و تأثیر آن بر منابع آب (۱۴ و ۳۶) کاربرد دارد، ساده‌سازی می‌کنند. در ادامه به برخی مطالعات در این زمینه پرداخته می‌شود.

زارچ و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی به مطالعه دو شاخص SPI و RDI در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه در ایران پرداختند. در این پژوهش، از داده‌های بارش ۴۰ ایستگاه همدید و برای محاسبه RDI از مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه به عنوان یک عامل مهم در پایش خشک‌سالی استفاده شده است. آن‌ها در محاسبه تبخیر و تعرق از معادله Penman-Monteith استفاده نمودند. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که مقادیر SPI و RDI در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه بیش‌تر از دیگر بازه‌های زمانی است. همچنین به‌طور کلی روش‌های SPI و RDI نتایج مشابهی برای تأثیر خشک‌سالی در مناطق مختلف ایران نشان داده‌اند (۱۱). تیگکاس و تساکریس (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی اثر خشک‌سالی با استفاده از شاخص RDI بر کشاورزی دیم به‌خصوص بر گندم در آب‌وهوای مدیترانه‌ای در یونان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص RDI برای تشخیص خشک‌سالی در دوره‌های مرجع که برای رشد گندم بسیار حیاتی است، بسیار مناسب هستند و با عملکرد محصول گندم بسیار ارتباط دارد (۲۷). احمد و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی الگوی زمانی خشک‌سالی در شالیمار کشور پاکستان با استفاده از رویکرد SPI پرداختند. در این پژوهش از داده‌های بارش ماهانه از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ استفاده شده است. ایشان الگوی کوتاه‌مدت و بلندمدت خشک‌سالی را با استفاده از روش SPI محاسبه و شدت و مدت خشک‌سالی‌ها را برای منطقه مورد مطالعه محاسبه نمودند. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان داده است که سال‌های ۱۹۸۹، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸، خشک‌سالی متوسط و

### مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: مساحت حوضه آبریز دره رود اردبیل معادل ۱۴۲۰۰ کیلومتر مربع است که بخشی از آب‌های سطحی استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی را به سمت رودخانه ارس و دریای خزر زهکشی می‌نماید. این حوضه، از هفت زیرحوضه شامل سراب اهرچای (شهرستان اهر- ورزقان)، سراب قره‌سو، قره‌سو میانی و بالخوچای چای (شهرستان اردبیل)، پایاب قره‌سو و پایاب اهرچای (شهرستان مشگین‌شهر) و پایاب دره‌رود (شهرستان پارس‌آباد مغان) تشکیل شده است (شکل ۱). با توجه به نتایج شاخص خشکی ایستگاه‌های اهر، اردبیل، پارس‌آباد و سراب در مناطق خشک و ایستگاه‌های کلیبر، خلخال و مشگین‌شهر در مناطق نیمه‌خشک واقع شده‌اند. جدول ۱ خصوصیات اقلیمی و هم‌چنین مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

به مسائل مطرح‌شده، مطالعات متنوعی با استفاده از شاخص‌های SPI و RDI و دیگر شاخص‌ها در ارتباط با ارزیابی خشک‌سالی در ایران و خارج از ایران صورت گرفته است، اما در حوضه آبریز دره رود اردبیل که به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های مهم و راه‌برد چه از نظر کشاورزی و مراتع و چه از نظر مسکونی و صنعتی در شمال‌غرب ایران قرار دارد، مطالعات قابل‌توجهی در خصوص خشک‌سالی صورت نگرفته است. بنابراین شناسایی دوره‌های خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های مختلف در حوضه دره‌رود، با توجه به روند افزایشی دما و کاهش بارندگی در این حوضه بسیار مهم است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی SPI و RDI و روابط بین آن‌ها در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، خشک‌سالی در این حوضه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

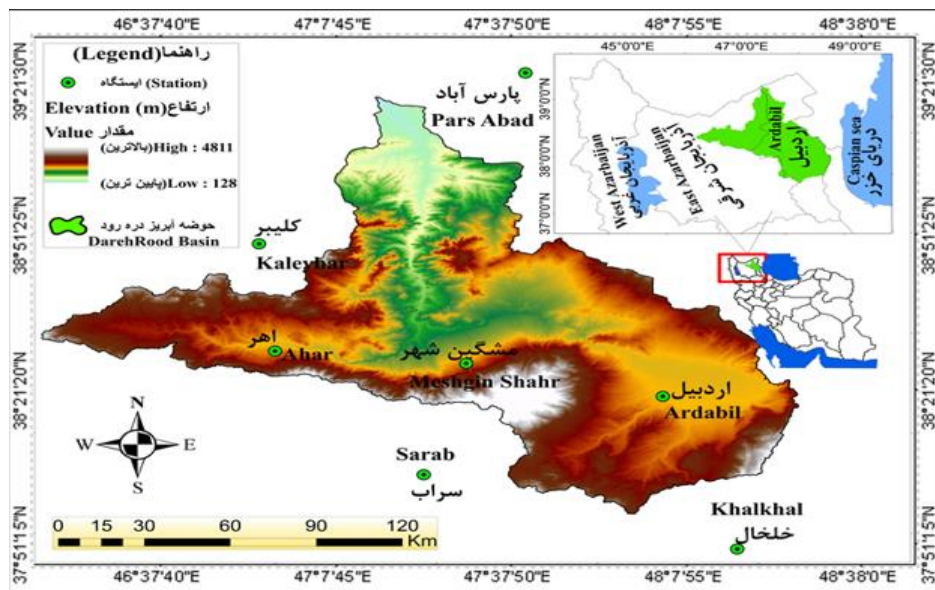
جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Geographic and climatic characteristics of stations the study area.

شماره NO	ایستگاه همدید Synoptic Station	مختصات طول جغرافیایی X Coordinate	مختصات عرض جغرافیایی Y Coordinate	ارتفاع (متر) Elevation (m)	بارش P (mm)	دما $T_{(mean)}$ (°C)	تبخیر و تعرق PET (mm)	ضریب خشکی $AI^* =$ P/PET	شاخص خشکی Aridity index
1	اهر Ahar	47° 04'	38° 26'	1390	285.00	10.80	1558.00	0.18	خشک Arid
2	اردبیل Ardabil	48° 17'	38° 15'	1332	289.60	9.20	1564.70	0.18	خشک Arid
3	کلیبر Kaleybar	47° 01'	38° 52'	1180	409.60	12.60	1548.10	0.26	نیمه‌خشک Semi-arid
4	خلخال Khalkhal	48° 31'	37° 38'	1796	374.20	8.70	1454.50	0.25	نیمه‌خشک Semi-arid
5	مشگین‌شهر Meshgin Shahr	47° 40'	38° 23'	1568	389.20	10.70	1483.30	0.26	نیمه‌خشک Semi-arid
6	پارس‌آباد Pars Abad	47° 55'	39° 39'	31/9	273.80	15.00	1703.40	0.16	خشک Arid
7	سراب Sarab	47° 32'	37° 56'	1682	245.40	8.70	1515.40	0.16	خشک Arid

\* شاخص خشکی

\* Aridity index



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه همراه با ایستگاه‌های منتخب.

Figure 1. The location of the study area and the selected stations.

LOWESS اولین بار توسط کلوند (۱۹۷۹) به منظور ایجاد منحنی‌های هموارسازی شده<sup>۳</sup> با استفاده از داده‌های دارای پراکندگی معرفی شد (۲). رگرسیون LOWESS بسیار مشابه رگرسیون کرنل یا هسته‌ای<sup>۴</sup> است، زیرا همانند یک رگرسیون چندجمله‌ای عمل کرده و نیازمند یک تابع هسته یا کرنل می‌باشد که مشاهدات را وزن کند. الگوریتم LOWESS را می‌توان با توجه به هر نقطه‌ای (i) که پیش‌بینی می‌کنیم، به شرح زیر توصیف نمود:

۱- ابتدا، فاصله اقلیدسی  $d(i,j)$  بین مشاهدات  $i$  و  $j$  محاسبه می‌شود. تابع  $f$  از نزدیک‌ترین مشاهدات  $N$  به مشاهدات  $i$  انتخاب می‌شود. سپس وزن نقاط انتخاب شده با استفاده از یکی از قسمت‌های رگرسیون کرنل (Tricube kernel) و فاصله زیر انتخاب می‌شود (رابطه ۱):

$$D(i,j) = \frac{d(i,j)}{\text{Max}_j(d(i,j))} \quad (1)$$

$$\text{Weight}(j) = \text{Tricube}(D(i,j)) \quad (2)$$

تشخیص روند در سری زمانی: در پژوهش حاضر به منظور پاسخ دادن به این سؤال که آیا با گذشت زمان، مقادیر مرکزی و یا میانه یک سری زمانی تغییر می‌کند یا نه، از آزمون من-کندال استفاده شد. آزمون من-کندال توسط من (۱۹۴۵) و کندال (۱۹۷۵) توسعه یافت (۱۰ و ۱۶). در فرمول‌بندی آزمون من-کندال نیازی به نرمال‌سازی سری زمانی نیست اما به منظور دقیق بودن مقادیر P-value در بررسی روند، مقادیر سری زمانی نباید دارای خودهمبستگی یا همبستگی متوالی باشند (۹). به منظور حذف اثرات خودهمبستگی<sup>۱</sup> در میان داده‌ها از روش TFPW در آزمون من-کندال استفاده شد. آزمون من-کندال اصلاح شده توسط یو و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) توسعه یافت که جزییات این روش توسط یو و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) ارائه شده است (۳۷ و ۳۸).

ارزیابی پایداری طولانی مدت روند در سری زمانی: به منظور ارزیابی پایداری طولانی مدت روند از رگرسیون LOWESS<sup>۲</sup> استفاده شد. رگرسیون

3- Smoothing  
4- Kernel regression

1- Trend-Free Pre-Whitening  
2- Locally weighted regression and smoothing scatter plots

$$ET0 = 0.0023(T \max - T \min)^{0.5} \frac{Ra}{\lambda} \quad (5)$$

که در آن،  $ET0$  تبخیر و تعرق،  $Ra$  میانگین تابش فرازمینی ( $MJ/m^2/day$ )،  $\lambda$  ضریب رطوبتی (ثابت رطوبت‌سنجی) و  $T$  میانگین دمای ماهانه بر حسب درجه سانتی‌گراد است (۳۵).

**شاخص خشک‌سالی استاندارد شده<sup>۱</sup>:** محاسبه شاخص  $SPI$  در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه (در مطالعه حاضر) نیازمند مراحل زیر است. این شاخص توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده است (۱۷). در بسیاری از موارد، توزیع گاما مناسب‌ترین توزیع جهت برازش داده‌های بارندگی است (۲۲). تابع چگالی احتمال برای توزیع گاما به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود (۲۲).

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \text{ for } x, \alpha, \beta > 0 \quad (6)$$

که در آن،  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب پارامترهای شکل و بازه هستند و  $X$  میزان بارندگی و  $\Gamma(\alpha)$  تابع گاما می‌باشد (۶ و ۲۲). به منظور محاسبه داده‌های بارش و برازش آن‌ها به تابع توزیع ذکر شده، باید ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  را از رابطه‌های ۷، ۸ و ۹ محاسبه نمود:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{44}{3}} \right) \quad (7)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (8)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $n$  تعداد مشاهدات بارندگی و  $\bar{x}$  میانگین بارش در مدت زمان مورد نظر است (۲۲ و ۲۴). سپس پارامترهای حاصل از  $\alpha$  و  $\beta$  با استفاده از رابطه ۱۰

۲- سپس یک مدل رگرسیون و یک مدل پیش‌بینی برای مشاهدات  $i$  محاسبه می‌شود. برای انجام یک رگرسیون قوی LOWESS، محاسبات اضافی انجام می‌شود که در ادامه ذکر شده است.

۳- وزن‌های به دست آمده با استفاده از فاصله زیر مجدداً محاسبه می‌شوند:

$$D'(i, j) = \frac{|r(j)|}{6 \cdot \text{Median}_i(r(j))} \quad (3)$$

جایی که  $r(j)$  باقی‌مانده مربوط به مشاهدات  $j$  بعد از مرحله قبلی است. در ادامه با استفاده از قسمت دیگر رگرسیون کرنل به نام Quartic (biweight) kernel داریم:

$$\text{Weight}(j) = \text{Quartic}(D'(i, j)) \quad (4)$$

۴- سپس رگرسیون با استفاده از وزن‌های جدید مجدداً محاسبه می‌شود.

۵- مراحل ۳ و ۴ به صورت تکرار انجام می‌شود و در انتها پیش‌بینی نهایی برای مشاهده  $i$  محاسبه می‌شود\*.

**روش محاسباتی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی:** به منظور بررسی شاخص‌های  $SPI$  و  $RDI$  در این پژوهش از داده‌های حداقل و حداکثر دمای ماهانه و مجموع بارندگی ماهانه ۷ ایستگاه همدید در بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۵) استفاده شد. ابتدا جهت محاسبه شاخص  $RDI$  باید مقدار تبخیر و تعرق بالقوه را به دست آورد. در این پژوهش برای محاسبه تبخیر و تعرق (PET)، از رابطه هارگریوز-سامانی (۱۹۸۵) استفاده شده است (۷). مدل هارگریوز یک روش تجربی است و در مواقعی که دسترسی به داده‌های آب و هوایی کافی وجود ندارد، استفاده می‌شود (۳۵). در این رابطه داده‌های کمینه و بیشینه دما و هم‌چنین عرض جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه مورد نیاز است (۵). رابطه PET به صورت زیر است:

1- Standardized Precipitation Index  
\*www.xlstat.com

$$SPI = z = + \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (15)$$

$$k = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[1-H(x)]^2} \right\}} \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (16)$$

که در آن،

$$c_0 = 2/5155, c_1 = 0/8028, c_2 = 0/0103,$$

$$d_1 = 1/4327, d_2 = 0/1839, d_3 = 0/001308$$

آستانه‌هایی که برای تعریف شدت خشک‌سالی SPI بیان می‌شوند، در جدول ۲ قابل مشاهده است. شاخص شناسایی خشک‌سالی<sup>۱</sup>: شاخص RDI توسط تساکریس و وانگلس (۲۰۰۵) پیشنهاد داده شد (۳۴). این شاخص به‌عنوان شاخصی جهت بررسی کمبود آب در منطقه مدیترانه با استفاده از تعادل بین آب ورودی (بارش) و خروجی (تبخیر و تعرق مرجع) در سال ۲۰۰۵ ارائه شده است. مقادیر RDI می‌تواند در سه شکل بیان شود: مقادیر اولیه RDI (a0)، مقادیر RDI نرمال شده و مقادیر RDI استاندارد شده (۳۳ و ۳۴). مقادیر اولیه RDI می‌تواند برای سال آبی، فصلی و ماهانه محاسبه شود از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} p_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (17)$$

که در آن،  $p_{ij}$  و  $PET_{ij}$  به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در  $j$  امین ماه سال  $i$  است. این رابطه می‌تواند برای شروع هر ماه از سال مورد استفاده قرار گیرد. RDI نرمال شده از طریق رابطه ۱۸ قابل محاسبه است.

جهت برآورد احتمال تجمعی برای بارش‌های غیر صفر مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۴ و ۲۴).

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\beta \hat{\alpha}} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\beta} dx \quad (10)$$

رابطه ۱۰ هم‌چنین به صورت رابطه ۱۱ نیز می‌تواند بیان شود (۲۲ و ۲۴).

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dx \quad (11)$$

چنانچه فرض گردد که  $t = x/\hat{\beta}$  است، ممکن است تابع گاما برای مقادیر بارش صفر در نظر گرفته نشود و  $X=0$  محاسبه گردد. در صورتی که ممکن است بارندگی حاوی مقادیر صفر نیز باشد، در این صورت محاسبه احتمال صفر و غیر صفر بارش با استفاده از رابطه ۱۲ صورت می‌گیرد (۱۵).

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad (12)$$

که در آن،  $q$  این احتمال است که بارش وجود ندارد و  $H(x)$  یک توزیع استاندارد نرمال شده با میانگین صفر و واریانس واحد است که باعث تولید شاخص SPI با توزیع گاما می‌شود (۴ و ۱۵). باین‌حال در رویکرد فوق، چنانچه تعداد نقاط یا ایستگاه‌های زیادی برای محاسبه شاخص SPI وجود داشته باشد، این روش به صورت عددی و عملی به سادگی قابل اجرا نیست. به همین دلیل یک روش جایگزین توسط ادوارد و مک‌کی (۴) با استفاده از تکنیک تبدیل تقریبی توسعه داده شده است که احتمال تجمعی را به یک متغیر استاندارد  $Z$  تبدیل می‌کند. سپس شاخص SPI به صورت رابطه‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ تعریف می‌شود.

$$SPI = z = - \left( k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad (13)$$

$$k = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[H(x)]^2} \right\}} \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (14)$$

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\bar{\sigma}_k} \quad (19)$$

که در آن،  $y_k$  برابر با  $(a_k^{(i)})$  است و  $\bar{y}_k$  میانگین حسابی برای  $y_k$  و  $\bar{\sigma}_k$  انحراف استاندارد است (۲۸). در جدول ۲ طبقات خشک‌سالی RDI قابل مشاهده است.

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (18)$$

که در آن،  $\bar{a}_k$  متوسط مقدار اولیه RDI برای یک دوره خاص است. RDI استاندارد شده بر اساس یک روش مشابه SPI محاسبه می‌شود و در رابطه ۱۹ به این روش اشاره شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی خشک‌سالی با توجه به مقادیر شاخص‌های SPI و RDI.

Table 2. Drought classification according to the values of the SPI and RDI indices.

مقادیر SPI و RDI (SPI and RDI range)	طبقات خشک‌سالی (Drought classes)
2.00 یا بیشتر	ترسالی خیلی شدید (Extremely Wet)
1.50 تا 1.99	ترسالی شدید (Severely Wet)
1.00 تا 1.49	ترسالی متوسط (Moderately Wet)
0.99 تا -0.99	نزدیک نرمال (Near normal)
-1.00 تا -1.49	خشک‌سالی متوسط (Moderately Dry)
-1.5 تا -1.99	خشک‌سالی شدید (Severely Dry)
-2.00 یا کم‌تر	خشک‌سالی خیلی شدید (Extremely Dry)

### نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل روند ماهانه و فصلی بارش و دما: جهت شناسایی روند در داده‌های بارندگی و دما در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه از آزمون Man-Kendall(MK) و Sen's slope(Sen) در سطح معنی‌داری ۰.۰۵ استفاده شد. نتایج روند MK و Sen به صورت افزایشی و کاهش‌ی در همه ماه‌ها و فصول و حتی سالانه در سطح معنی‌داری ۰.۰۵ با یکدیگر مطابقت داشتند. جدول ۳ نتایج مربوط به روند ماهانه، فصلی و سالانه دما در حوضه دره‌رود اردبیل با استفاده از آزمون

Man-Kendall(MK) و Sen's slope(Sen) در سطح معنی‌داری ۰.۰۵ را نشان می‌دهد. نتایج روند دما نشان داد که در ماه‌های اکتبر و دسامبر هیچ روندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده نشده و از نظر آماری نیز معنی‌دار نبوده است و به همین دلیل از جدول ۳ حذف گردید. بیش‌ترین روند کاهش‌ی دما مربوط به ایستگاه سراب در ماه نوامبر می‌باشد که در سطح ۰.۰۵ معنی‌دار می‌باشد. بیش‌ترین مقدار روند افزایش دما مربوط به ایستگاه مشگین‌شهر در فصل زمستان و مقادیر سالانه این ایستگاه مشاهده شده است.



جدول ۳- نتایج M-K و Sen برای سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه دما.

Table 3. MK and Sen Results of monthly, seasonal and annual temperature data series.

Stat NO		Nov (نوامبر)	Jan (ژانویه)	Feb (فوریه)	Mar (مارس)	Apr (آوریل)	May (می)	Jun (ژوئن)	Jul (جولای)	Aug (اگوست)	Sep (سپتامبر)	Annual (سالانه)	Fall (پاییز)	Winter (زمستان)	Spring (بهار)	Summer (تابستان)
1	M-K	0.06	-0.04	0.10	-0.18	0.09	0.09	-0.07	0.14	0.01	0.09	-0.08	-0.08	-0.10	0.01	0.06
	P-V	0.39	0.34	0.07	0.00	0.10	0.01	0.24	0.02	0.91	0.03	0.07	0.14	0.09	0.85	0.15
	Sen	0.15	-0.07	0.21	-0.37	0.34	0.28	-0.27	0.15	0.00	0.05	-0.81	-0.50	-0.37	0.07	0.18
2	M-K	0.02	-0.18	-0.01	-0.07	0.07	-0.02	-0.03	0.04	0.10	0.02	-0.18	-0.15	-0.12	0.02	0.17
	P-V	0.69	0.00	0.89	0.19	0.03	0.77	0.64	0.58	0.04	0.57	0.00	0.02	0.02	0.77	0.00
	Sen	0.05	-0.24	-0.01	-0.12	0.22	-0.08	-0.04	0.02	0.04	0.02	-1.52	-0.46	-0.41	0.11	0.30
3	M-K	0.08	0.00	0.03	-0.03	-0.25	0.13	0.53	0.16	0.09	0.04	0.35	0.11	0.01	0.18	0.15
	P-V	0.38	1.00	0.72	0.70	0.00	0.19	0.00	0.17	0.32	0.66	0.00	0.30	0.86	0.01	0.29
	Sen	0.28	-0.00	0.23	-0.24	-1.66	0.82	3.91	0.72	0.08	0.11	8.26	1.20	0.01	4.23	1.51
4	M-K	-0.05	-0.22	0.05	-0.10	-0.05	0.05	0.03	0.15	0.17	0.18	-0.07	-0.19	-0.09	-0.02	0.16
	P-V	0.27	0.00	0.40	0.02	0.14	0.31	0.49	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00	0.20	0.53	0.00
	Sen	-0.41	-0.60	0.16	-0.44	-0.36	0.13	0.03	0.15	0.03	0.10	-1.61	-1.55	-0.40	-0.20	0.51
5	M-K	-0.03	-0.25	-0.05	0.02	-0.07	0.05	0.40	0.00	0.27	0.07	0.09	0.08	-0.12	0.11	0.03
	P-V	0.75	0.00	0.59	0.84	0.12	0.38	0.00	1.00	0.00	0.21	0.10	0.07	0.13	0.05	0.66
	Sen	-0.14	-0.59	-0.25	0.03	-0.49	0.51	2.41	0.00	0.34	0.32	1.19	1.03	-1.37	1.76	0.46
6	M-K	0.00	0.06	0.00	-0.02	0.02	0.05	0.08	0.03	-0.01	0.21	0.07	-0.02	0.05	0.09	0.03
	P-V	0.52	0.04	1.00	0.65	1.00	0.18	0.13	0.46	0.75	0.00	1.00	0.61	0.21	0.03	0.35
	Sen	0.06	0.11	0.00	-0.10	0.09	0.14	0.22	0.00	0.00	0.40	0.98	-0.27	0.33	0.68	0.23
7	M-K	0.09	-0.05	0.07	-0.20	0.18	0.02	0.12	0.07	0.11	0.16	0.12	0.00	-0.07	0.13	0.11
	P-V	0.08	0.46	0.20	0.00	1.00	0.70	0.05	0.17	0.12	0.00	1.00	0.95	0.24	0.01	0.00
	Sen	0.25	-0.09	0.14	-0.27	0.87	0.09	0.16	0.08	0.07	0.05	1.09	0.05	-0.16	1.11	0.23

بارش مربوط به ایستگاه مشکین شهر در ماه ژانویه می باشد که با توجه به مقدار P-value از نظر آماری معنی دار است. همچنین نتایج نشان داد که ایستگاه پارس آباد در هیچ کدام از ماهها و فصول مختلف روند کاهشی قابل توجهی از نظر بارندگی نداشته است. بیشترین روند افزایشی بارش نیز مربوط به ایستگاه کلیبر در ماه ژوئن می باشد.

در ادامه در جدول ۴ روند ماهانه، فصلی و سالانه مقادیر بارندگی در منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که ماههای نوامبر و فوریه هیچ روندی در ایستگاههای منتخب مشاهده نشد. عدم وجود روند در برخی ماهها مانند ژانویه و دسامبر در پژوهشهای مشابهی مانند خان و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است (۱۲). بیشترین روند کاهشی

جدول ۴- نتایج M-K و Sen برای سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه بارش.

Table 4. MK and Sen Results of monthly, seasonal and annual precipitation data series.

Stat NO		Oct (اکتبر)	Dec (دسامبر)	Jan (ژانویه)	Mar (مارس)	Apr (آوریل)	May (مئی)	Jun (ژوئن)	Jul (جولای)	Aug (اگوست)	Sep (سپتامبر)	Annual (سالانه)	Fall (پاییز)	Winter (زمستان)	Spring (بهار)	Summer (تابستان)
1	M-K	-0.15	-0.12	-0.04	-0.18	0.09	0.09	-0.07	0.14	0.01	0.09	-0.08	-0.08	-0.10	0.01	0.06
	P-V	0.00	0.05	0.34	0.00	0.10	0.01	0.24	0.02	0.91	0.03	0.07	0.14	0.09	0.85	0.15
	Sen	-0.34	-0.25	-0.07	-0.37	0.34	0.28	-0.27	0.15	0.00	0.05	-0.81	-0.50	-0.37	0.07	0.18
2	M-K	-0.14	-0.23	-0.18	-0.07	0.07	-0.02	-0.03	0.04	0.10	0.02	-0.18	-0.15	-0.12	0.02	0.17
	P-V	0.00	0.00	0.00	0.19	0.03	0.77	0.64	0.58	0.04	0.57	0.00	0.02	0.02	0.77	0.00
	Sen	-0.42	-0.49	-0.24	-0.12	0.22	-0.08	-0.04	0.02	0.04	0.02	-1.52	-0.46	-0.41	0.11	0.30
3	M-K	0.00	0.15	0.00	-0.03	-0.25	0.13	0.53	0.16	0.09	0.04	0.35	0.11	0.01	0.18	0.15
	P-V	1.00	0.09	1.00	0.70	0.00	0.19	0.00	0.17	0.32	0.66	0.00	0.30	0.86	0.01	0.29
	Sen	-0.05	1.09	-0.00	-0.24	-1.66	0.82	3.91	0.72	0.08	0.11	8.26	1.20	0.01	4.23	1.51
4	M-K	-0.11	-0.16	-0.22	-0.10	-0.05	0.05	0.03	0.15	0.17	0.18	-0.07	-0.19	-0.09	-0.02	0.16
	P-V	0.05	0.03	0.00	0.02	0.14	0.31	0.49	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00	0.20	0.53	0.00
	Sen	-0.34	-0.37	-0.60	-0.44	-0.36	0.13	0.03	0.15	0.03	0.10	-1.61	-1.55	-0.40	-0.20	0.51
5	M-K	0.00	0.26	-0.25	0.02	-0.07	0.05	0.40	0.00	0.27	0.07	0.09	0.08	-0.12	0.11	0.03
	P-V	1.00	0.00	0.00	0.84	0.12	0.38	0.00	1.00	0.00	0.21	0.10	0.07	0.13	0.05	0.66
	Sen	0.00	0.71	-0.59	0.03	-0.49	0.51	2.41	0.00	0.34	0.32	1.19	1.03	-1.37	1.76	0.46
6	M-K	0.04	-0.03	0.06	-0.02	0.02	0.05	0.08	0.03	-0.01	0.21	0.07	-0.02	0.05	0.09	0.03
	P-V	1.00	0.42	0.04	0.65	1.00	0.18	0.13	0.46	0.75	0.00	1.00	0.61	0.21	0.03	0.35
	Sen	0.18	-0.07	0.11	-0.10	0.09	0.14	0.22	0.00	0.00	0.40	0.98	-0.27	0.33	0.68	0.23
7	M-K	-0.04	0.10	-0.05	-0.20	0.18	0.02	0.12	0.07	0.11	0.16	0.12	0.00	-0.07	0.13	0.11
	P-V	0.51	0.12	0.46	0.00	1.00	0.70	0.05	0.17	0.12	0.00	1.00	0.95	0.24	0.01	0.00
	Sen	-0.13	0.15	-0.09	-0.27	0.87	0.09	0.16	0.08	0.07	0.05	1.09	0.05	-0.16	1.11	0.23

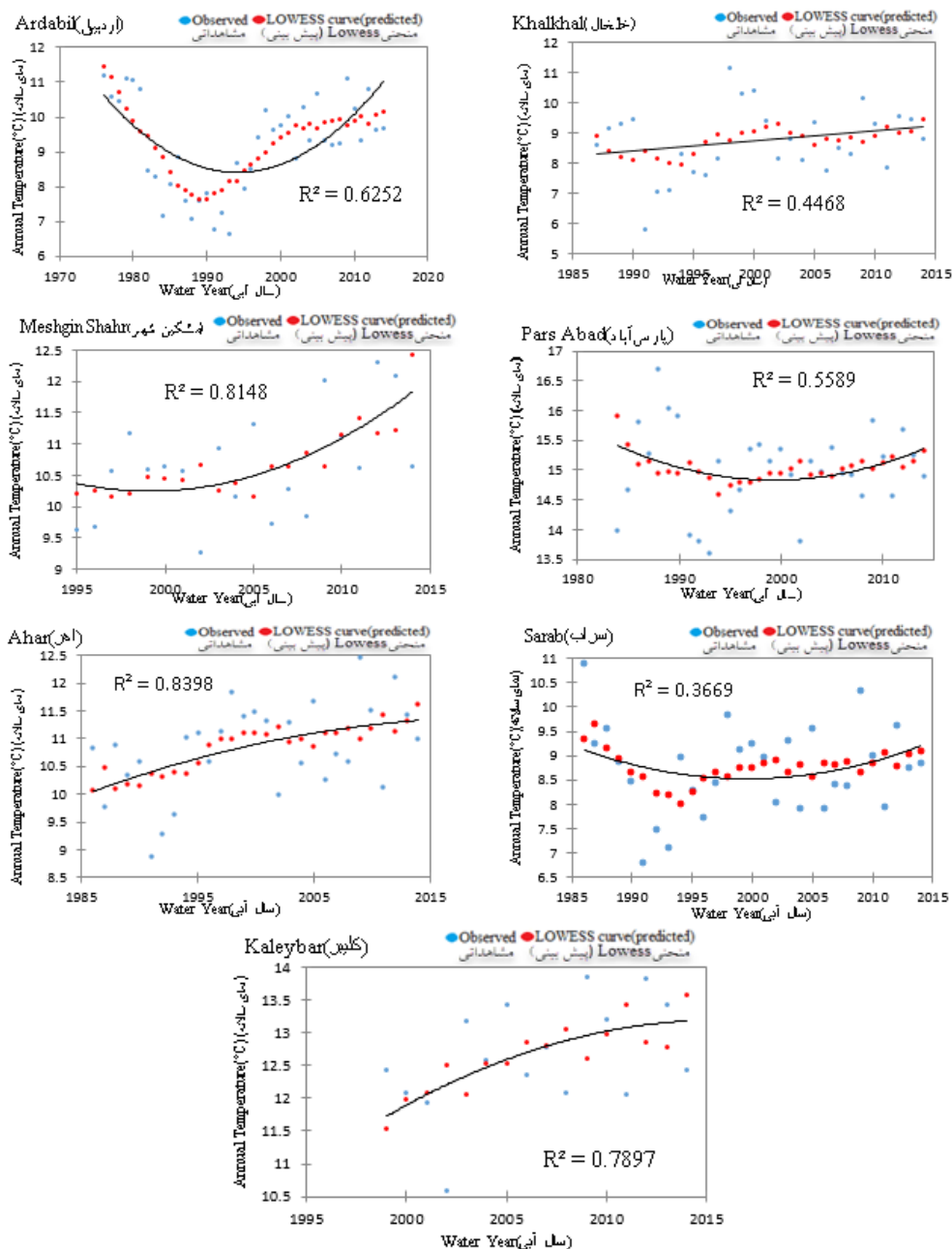
معنی است که به احتمال زیاد در سال‌های آینده نیز، هم‌چنان افزایش خواهد یافت. به‌طور مثال، در ایستگاه اردبیل روند کاهشی دما از ابتدای دوره آماری تا سال ۱۹۹۰ با یک شیب تند قابل مشاهده است، اما از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۴ دما افزایش چشمگیر داشته و از سال ۲۰۰۴ روند افزایش دما با شیب ملایم‌تری تا پایان دوره آماری ادامه داشته است.

این در حالی است که مقدار  $R^2$  بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی دما در ایستگاه اردبیل برابر با ۰/۶۲ می‌باشد. نتایج منحنی LOWESS هم‌چنین

بررسی پایداری طولانی‌مدت بارش و دما: در این بخش به بررسی نتایج رگرسیون نا پارامتریک با استفاده از منحنی LOWESS جهت شناسایی پایداری طولانی‌مدت روند بارش و دمای سالانه در حوضه دره رود پرداخته شده است. در این منحنی مقادیر مشاهداتی دما و بارش با رنگ آبی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با رنگ قرمز قابل مشاهده است. نتایج منحنی LOWESS برای مقادیر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده یک سناریو تقریباً یکسان افزایش دما در طول دوره آماری می‌باشد. این بدان

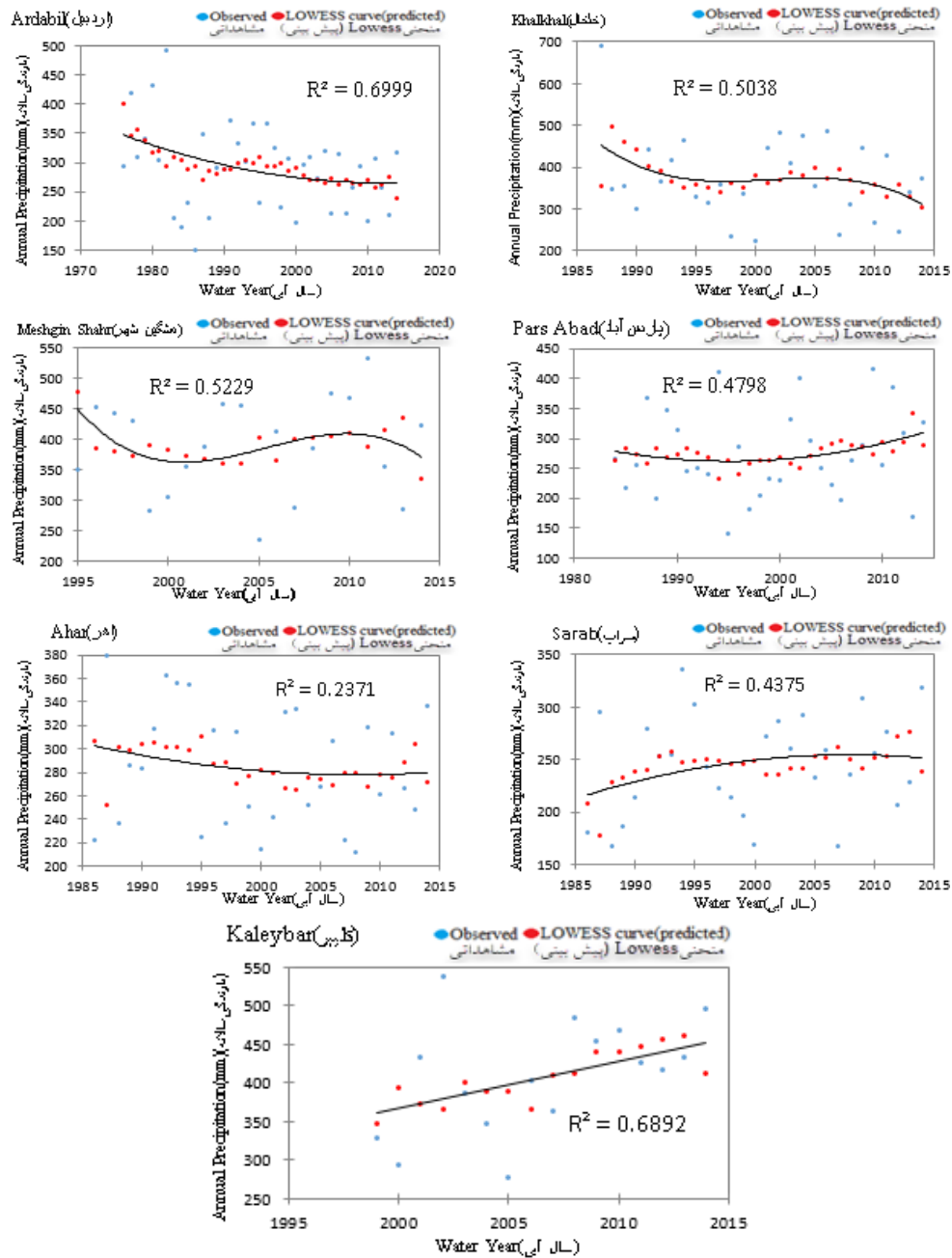
مشگین شهر (۰/۸۱) و اهر (۰/۸۳) بوده و کمترین مقدار  $R^2$  مربوط به ایستگاه سراب (۰/۳۶) است. شکل های ۲ و ۳ نتایج مربوط به منحنی LOWESS برای ایستگاه های مورد مطالعه در حوضه آبریز دره رود اردبیل را نشان می دهد.

نشان داد که ایستگاه خلخال از نظر روند دما در طولانی مدت شرایط پایدارتری را نسبت به دیگر ایستگاه ها تجربه کرده است. هر چند روند دما در ایستگاه خلخال نیز افزایشی می باشد، ولی دارای یک شیب ملایم است. بیشترین مقادیر  $R^2$  بین دمای مشاهداتی و پیش بینی مربوط به ایستگاه های



شکل ۲- منحنی LOWESS برای مقادیر مشاهداتی و پیش بینی دمای سالانه.

Figure 2. LOWESS curve for observational values and prediction of annual temperature.



شکل ۳- منحنی LOWESS برای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی بارش سالانه.

Figure 3. LOWESS curve for observational values and prediction of annual Precipitation.

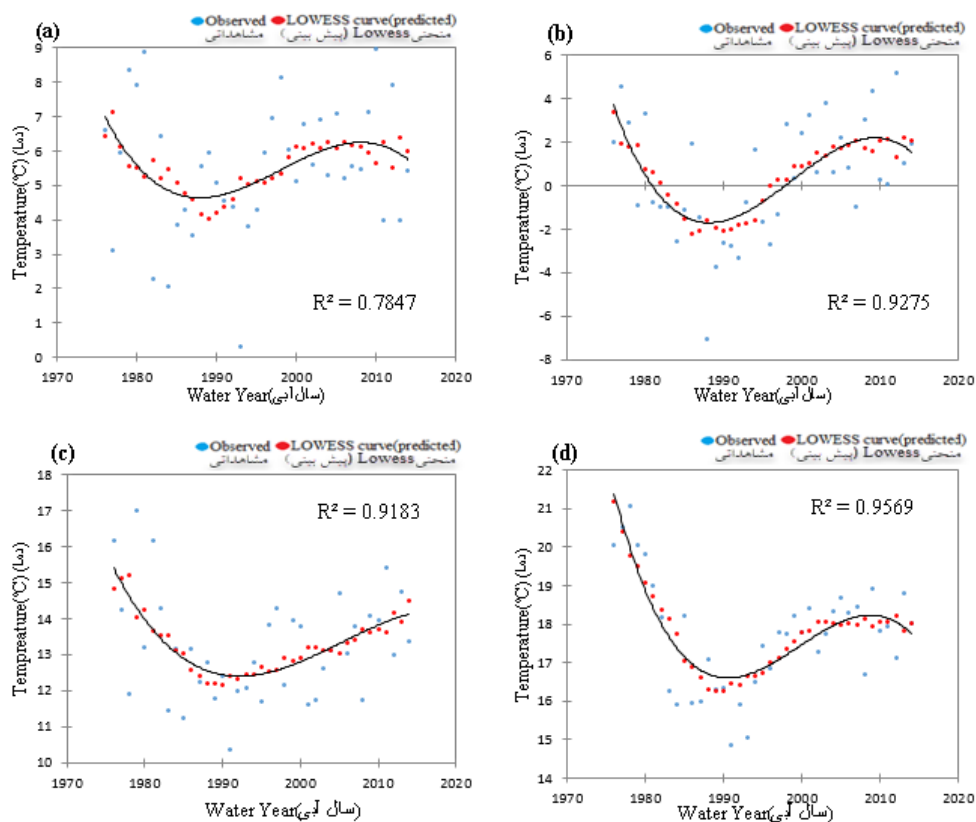
از سال ۲۰۰۰ تا پایان دوره آماری روند بارندگی با شیب ملایم، افزایشی است. این در حالی است که مقدار  $R^2$  بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی بارش در ایستگاه پارس‌آباد، ۰/۴۷ است. هم‌چنین با توجه به نتایج منحنی LOWESS در ایستگاه کلیبر و سراب نیز روند بارش نیز افزایشی است. با این تفاوت که در

نتایج شکل ۳ مربوط به منحنی LOWESS برای مقادیر بارندگی سالانه در این پژوهش، نشان‌دهنده سناریوهای متفاوتی برای هر ایستگاه برخلاف روند افزایشی دما دارد. به‌طور مثال در ایستگاه‌های پارس‌آباد مقادیر بارندگی از ابتدای دوره آماری تا سال ۲۰۰۰ یک روند تقریباً ثابتی را دنبال می‌کند ولی

۲۰۱۱ را تجربه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در فصل بهار روند افزایشی دما، با یک شیب ملایم تا پایان دوره آماری افزایشی می‌باشد و مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده دما در فصل بهار برابر با ۰/۹۱ می‌باشد که این مقدار بیان‌کننده یک رابطه قوی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده دما در فصل بهار می‌باشد. این روند افزایشی ممکن است در سال‌های آینده نیز ادامه داشته باشد. روند دما در فصول پاییز، زمستان و تابستان نشان‌دهنده یک روند کاهشی ملایم از سال ۲۰۱۱ تا پایان دوره آماری است. بالاترین ضریب تعیین بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده دما در ایستگاه اردبیل مربوط به فصل تابستان است که مقدار آن برابر با ۰/۹۵ می‌باشد.

ایستگاه سراب از سال ۲۰۰۵ تا پایان دوره آماری بارندگی روند تقریباً ثابتی را دارد. با توجه به نتایج منحنی LOWESS، دیگر ایستگاه‌ها روند بارندگی، کاهشی و دارای شیب متفاوت هستند. این در حالی است که در ایستگاه اردبیل، روند کاهشی بارندگی محسوس بوده و به احتمال زیاد می‌تواند در سال‌های آینده نیز این روند ادامه داشته باشد. مقدار  $R^2$  بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی بارش در ایستگاه اردبیل، ۰/۶۹ می‌باشد. در ادامه با توجه به حجم مقاله نتایج روند بارش و دما به صورت فصلی را برای ایستگاه اردبیل به عنوان نمونه توضیح داده می‌شود و از نتایج سایر ایستگاه‌ها صرف نظر می‌گردد.

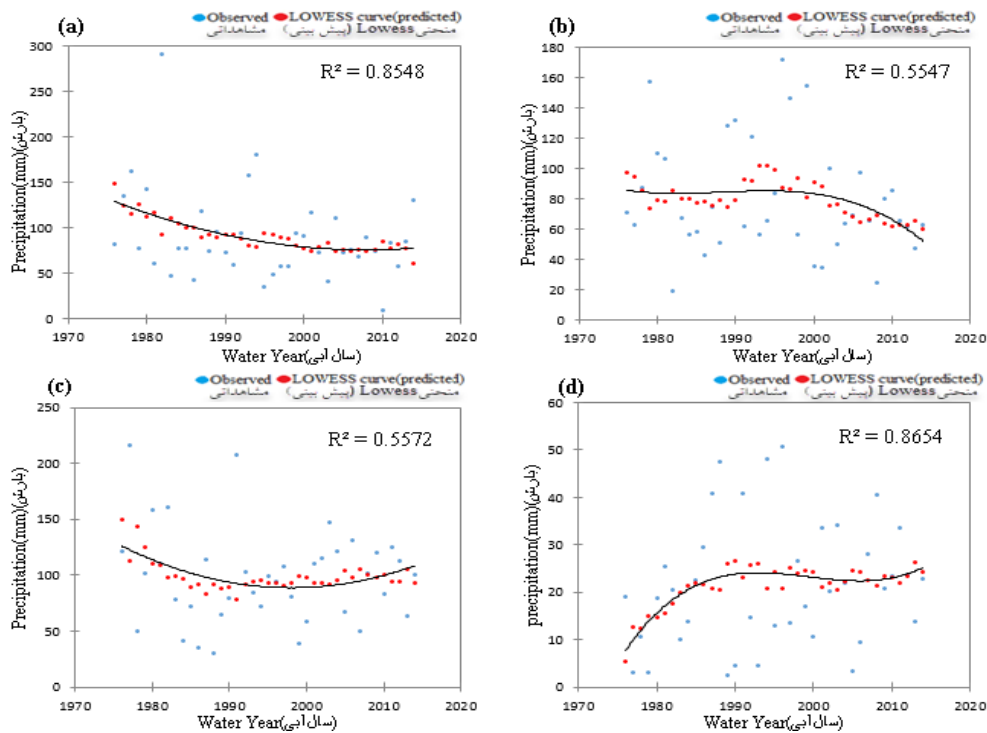
شکل ۴ نشان می‌دهد که با توجه به منحنی LOWESS در ایستگاه اردبیل، مقادیر دما حدوداً از سال ۲۰۰۰ در همه فصول یک روند افزایشی تا سال



شکل ۴- منحنی LOWESS برای دما در ایستگاه اردبیل: a پاییز b زمستان c بهار d تابستان.  
Figure 4. LOWESS curve of temperature trends: a fall b winter c spring d summer.

هم‌چنین نتایج منحنی LOWESS برای فصول بهار و تابستان نسبت به فصول پاییز و زمستان تقریباً متفاوت بوده به طوری که در فصل بهار نتایج منحنی LOWESS نشان می‌دهد که پس از یک روند کاهشی بارش از سال ۱۹۷۵ تا سال ۲۰۰۰، شاهد افزایش بارندگی به طور ملایم از سال ۲۰۰۰ تا پایان دوره آماری هستیم. این روند افزایشی ممکن است در سال‌های پایانی نیز ادامه داشته باشد. مقدار ضریب تعیین در فصل بهار برابر با ۰/۵۵ است؛ اما نتایج منحنی LOWESS برای فصل تابستان متفاوت از سایر فصول است. به طوری که از سال ۱۹۷۵ تا سال ۱۹۹۰ یک روند افزایشی را شاهد هستیم. سپس در یک دوره تقریباً ۲۰ ساله یعنی از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۰ روند تقریباً ثابت بارندگی را شاهد هستیم و در سال‌های پایانی یعنی از سال ۲۰۱۰ به بعد یک روند افزایشی با شیب ملایم به دست آمده است که می‌توان در سال‌های آینده این روند افزایشی ادامه داشته باشد. مقدار ضریب تعیین بارش در فصل تابستان برابر با ۰/۸۶ می‌باشد.

در ادامه شکل ۵ روند پایدار طولانی مدت بارش را با استفاده از رگرسیون LOWESS در ایستگاه اردبیل به صورت فصلی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج روند بارش در فصل پاییز، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در این فصل یک روند کاهشی ملایم در مقادیر بارش از سال ۱۹۷۵ تا سال ۲۰۱۰ مشاهده می‌شود که در سال‌های پایانی به یک روند تقریباً ثابت تبدیل شده است. این در حالی است که مقدار ضریب تعیین بین داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بارش برابر با ۰/۸۵ می‌باشد؛ اما نتایج بارش در فصل زمستان نشان می‌دهد که از سال ۱۹۷۵ تا سال ۲۰۰۰ یک روند تقریباً ثابت دارد و ناگهان از سال ۲۰۰۰ تا پایان دوره آماری روند کاهشی شدید را دنبال می‌کند. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بارش در فصل زمستان برابر با ۰/۵۵ می‌باشد. کاهش بارش در فصل زمستان با استفاده از منحنی LOWESS در پژوهش‌هایی هم‌چون فینگ و همکاران (۲۰۱۶) و تاکسک و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است (۵ و ۲۶).



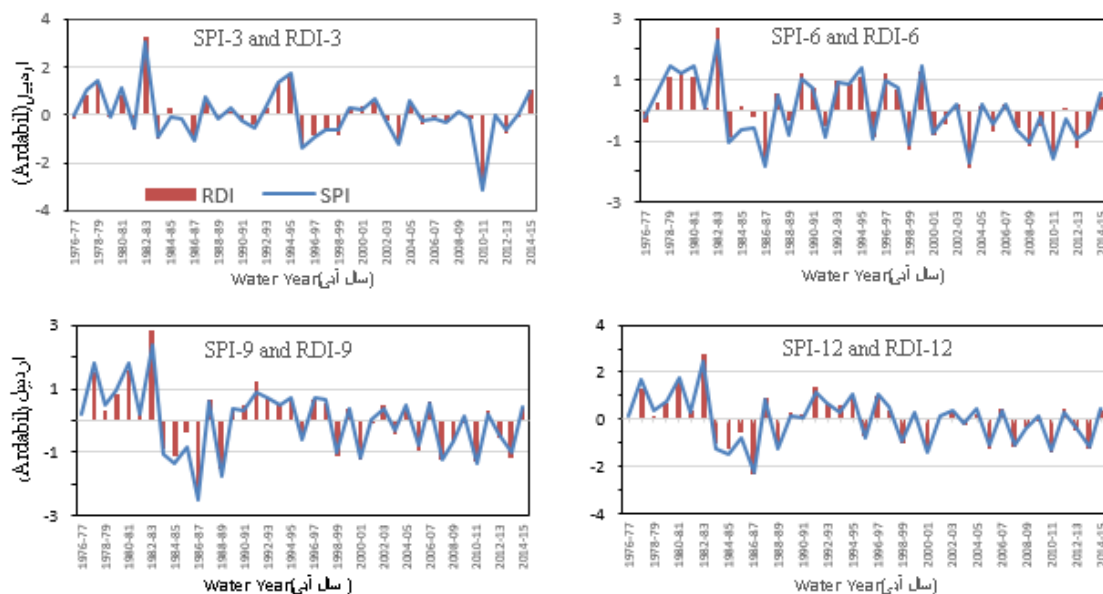
شکل ۵- منحنی LOWESS برای بارندگی در ایستگاه اردبیل: a پاییز b زمستان c بهار d تابستان.

Figure 5. LOWESS curve of precipitation trends: a fall b winter c spring d summer.

پارس‌آباد را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که رفتار دو شاخص SPI و RDI در بازه‌های زمانی موردبررسی در حوضه آبریز دره رود، بسیار مشابه است. شناسایی خشک‌سالی و ترسالی در مناطق مختلف در هر بازه‌ای می‌تواند متفاوت باشد به طوری که با مقایسه مدل‌های خشک‌سالی می‌توان به نوع رفتار مناطق نسبت به پارامترهای اقلیمی همچون بارش و دما پی برد. در مقایسه دو مدل SPI و RDI مشاهده می‌شود در برخی از بازه‌ها مانند بازه ۶ ماهه مقادیر RDI مقادیر بالاتری نسبت به SPI را نشان می‌دهند.

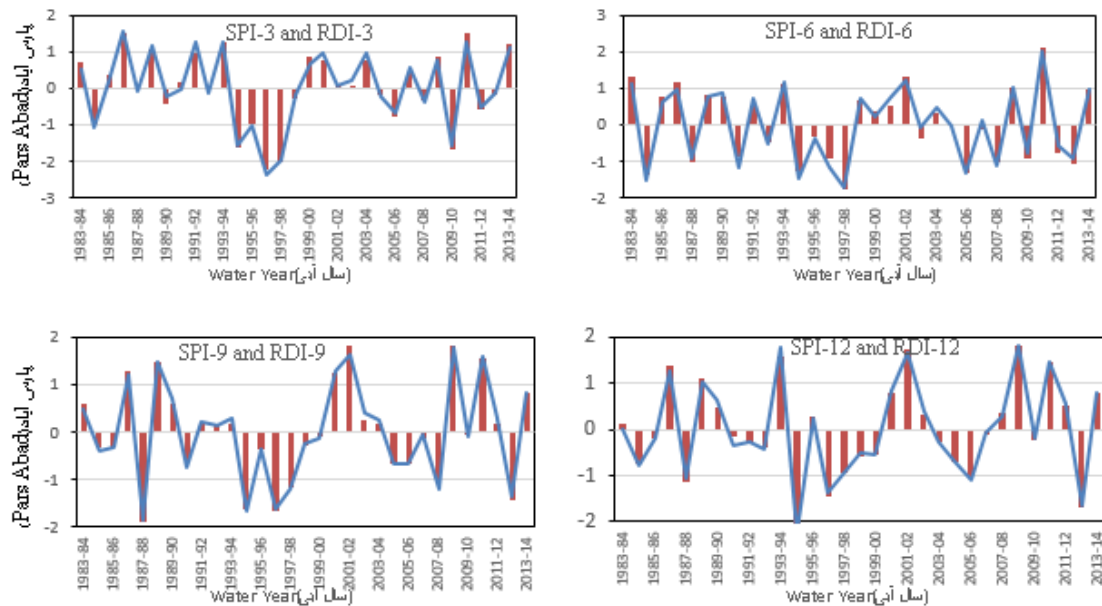
تحلیل شرایط خشک‌سالی و ترسالی: تغییرات روند بارش و دما می‌تواند علت مخاطراتی از جمله خشک‌سالی باشد. با توجه به تغییرات روند سری زمانی بارش و دما در حوضه دره‌رود اردبیل در این بخش، نتایج دو شاخص خشک‌سالی SPI و RDI برای هفت ایستگاه همدید مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به عنوان نمونه نتایج خشک‌سالی در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای دو ایستگاه اردبیل و پارس‌آباد به دلیل اختلاف ارتفاع بین دو ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل‌های ۶ و ۷، نتایج خشک‌سالی در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای ایستگاه‌های اردبیل و



شکل ۶- سری زمانی خشک‌سالی بر اساس SPI( ) و RDI(-) در بازه‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در ایستگاه اردبیل.

Figure 6. Time series of drought based on SPI ( ) and RDI ( ) in measures 3, 6, 9 and 12 months in Ardabil station.



شکل ۷- سری زمانی خشک‌سالی بر اساس  $SPI(-)$  و  $RDI(-)$  در بازه‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در ایستگاه پارس‌آباد.

Figure 7. Time series of drought based on  $SPI(-)$  and  $RDI(-)$  in measures 3, 6, 9 and 12 months in Pars Abad station.

نتیجه با پژوهش‌های زارچ و همکاران (۲۰۱۱)، رحمت و همکاران (۲۰۱۵) و مرباتی و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد (۱۸، ۲۰ و ۳۹). به طوری که در بازه ۳ ماهه مشاهده می‌شود که مقادیر  $SPI$  بیش‌تر از مقادیر  $RDI$  به دست آمده است. در دوره‌های زمانی بلندمدت مانند بازه ۱۲ ماهه در برخی از سال‌ها مقدار شدیدترین خشک‌سالی به دست آمده با یکدیگر همخوانی نداشته که می‌تواند دلیل بر دخالت پارامتر تبخیر و تعرق در شاخص  $RDI$  باشد که باعث تعدیل در ناهنجاری‌های بارندگی به عنوان تنها متغیر ورودی مدل  $SPI$  می‌باشد؛ اما به طور کلی نتایج به دست آمده از مقادیر شدیدترین خشک‌سالی‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک است.

نتایج شکل‌های ۶ و ۷، نشان می‌دهد که در ایستگاه اردبیل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ بارندگی نسبت به مقدار بلندمدت پایین بوده و بیش‌ترین تداوم خشک‌سالی در بازه ۶ ماهه به مدت ۷ سال (۲۰۰۷-۲۰۱۳) رخ داده است. همچنین، بیش‌ترین تداوم خشک‌سالی در ایستگاه پارس‌آباد در بازه‌های زمانی ۳ و ۹ ماهه به مدت ۵ سال (۱۹۹۳-۱۹۹۷) بوده است. شدیدترین خشک‌سالی‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه با استفاده از دو شاخص  $SPI$  و  $RDI$  در جدول ۵ قابل مشاهده است. نتایج این جدول ۵ نشان می‌دهد که هر دو شاخص قادر به تشخیص شدیدترین خشک‌سالی‌های رخ داده در منطقه در بازه‌های زمانی مختلف هستند و تنها در میزان حساسیت مقدار خشک‌سالی تا حدودی با یکدیگر متفاوت هستند. این



جدول ۵- مقادیر شدیدترین خشک‌سالی‌های مشاهده‌شده در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه.

**Table 5. The most severe observed droughts in the time scales of 3, 6, 9 and 12 months.**

SPI-12		SPI-9		SPI-6		SPI-3		ایستگاه Station
شدیدترین مقدار SPI Extreme amount SPI	سال Year	شدیدترین مقدار SPI Extreme amount SPI	سال Year	شدیدترین مقدار SPI Extreme amount SPI	سال Year	شدیدترین مقدار SPI Extreme amount SPI	سال Year	
-1.58	2008 - 09	-1.88	2008 - 09	-2.18	2003 - 04	-3.13	2010 - 11	
-2.27	1986 - 87	-2.46	1986 - 87	-1.85	1986 - 87	-3.11	2010 - 11	اردبیل Ardabil
-1.98	2005 - 06	-2.46	2005 - 06	-2.01	2010 - 11	-2.72	2010 - 11	کلبر Kaleybar
-1.74	2000 - 01	-2.05	2007 - 08	-1.68	2010 - 11	-2.65	1995 - 96	خلخال Khalkhal
-2.17	2005 - 06	-2.43	2005 - 06	-2.61	2003 - 04	-2.63	2010 - 11	مشگین‌شهر Meshgin Shahr
-2.22	1995 - 96	-1.83	1988 - 89	-1.70	1998 - 99	-2.36	1997 - 98	پارس‌آباد Pars Abad
-1.78	1988 - 89	-2.44	1988 - 89	-2.12	2010 - 11	-2.83	2010 - 11	سراب Sarab

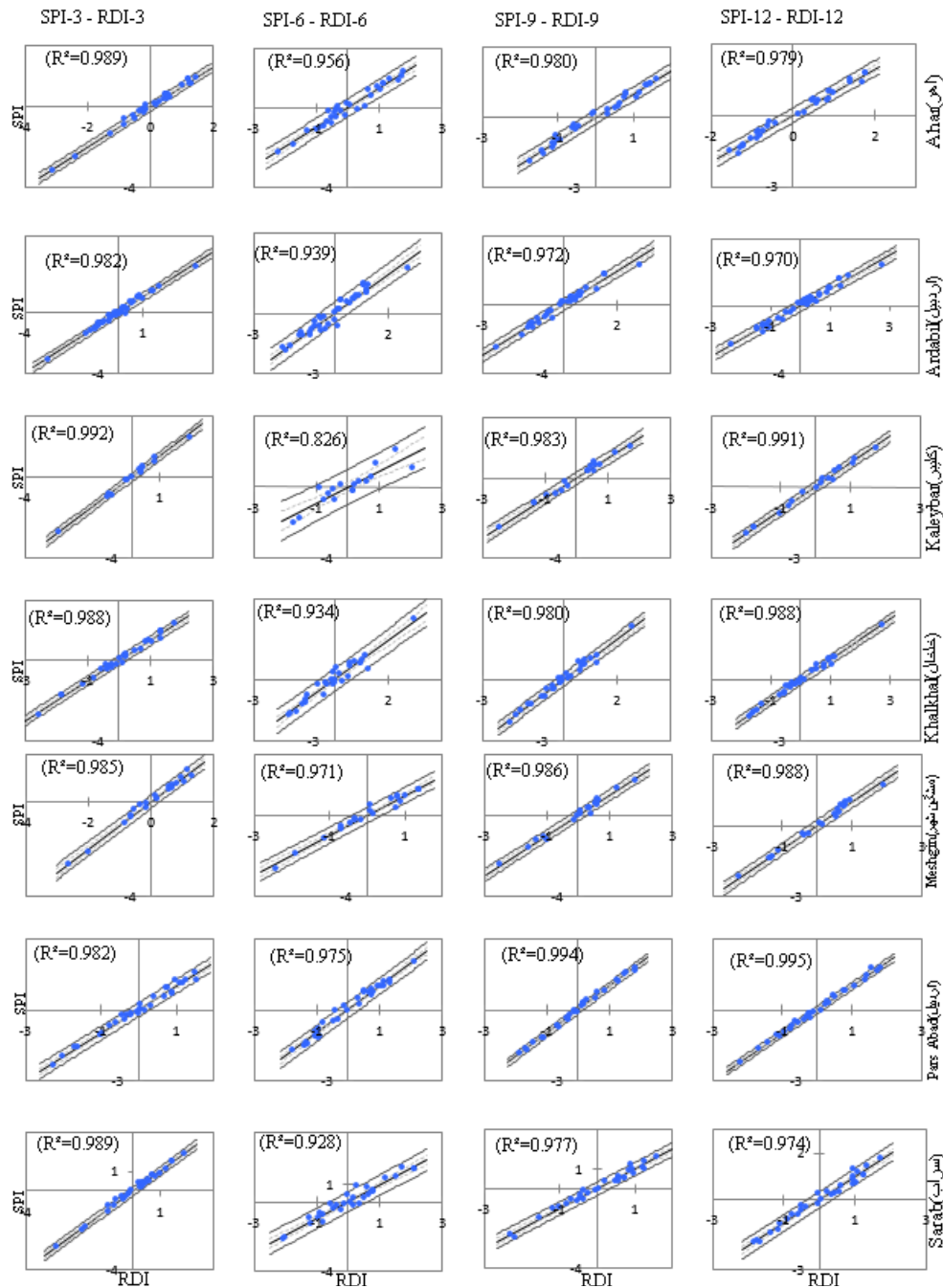
RDI-12		RDI-9		RDI-6		RDI-3		ایستگاه Station
شدیدترین مقدار RDI Extreme amount RDI	سال Year	شدیدترین مقدار RDI Extreme amount RDI	سال Year	شدیدترین مقدار RDI Extreme amount RDI	سال Year	شدیدترین مقدار RDI Extreme amount RDI	سال Year	
-1.52	2000 - 01	-1.73	2008 - 09	-2.21	2003 - 04	-3.09	2010 - 11	
-2.31	1986 - 87	-2.46	1986 - 87	-1.90	2003 - 04	-3.02	2010 - 11	اردبیل Ardabil
-1.97	2005 - 06	-2.44	2005 - 06	-1.71	2010 - 11	-2.71	2010 - 11	کلبر Kaleybar
-1.72	2000 - 01	-1.96	2007 - 08	-1.65	2010 - 11	-2.56	1995 - 96	خلخال Khalkhal
-2.25	2005 - 06	-2.51	2005 - 06	-2.44	2003 - 04	-2.64	2010 - 11	مشگین‌شهر Meshgin Shahr
-2.18	1995 - 96	-1.87	1988 - 89	-1.75	1998 - 99	-2.24	1997 - 98	پارس‌آباد Pars Abad
-1.82	2007 - 08	-2.28	2007 - 08	-2.08	2010 - 11	-2.82	2010 - 11	سراب Sarab

باران کم‌تر است می‌تواند نقش مهم‌تری را ایفا کند. همان‌طوری که در شکل‌های ۶ و ۷ هم مشخص است در سال‌هایی که خشک‌سالی و ترسالی شدید و خیلی شدید مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص RDI به‌دلیل تأثیر تبخیر و تعرق در مدل حساسیت نسبتاً بیش‌تری را در مقایسه با SPI نشان می‌دهند. به‌طور خلاصه تفاوت بین شاخص‌های SPI و RDI در دوره‌های

مقایسه مدل‌های خشک‌سالی SPI و RDI با توجه به اقلیم مناطق می‌تواند متفاوت باشد. به‌طوری‌که در مناطق خشک با توجه به این‌که مقدار تبخیر و تعرق بیش‌تر است، ممکن است شاخص RDI حساسیت بیش‌تری نسبت به شاخص SPI که فقط بارندگی را در نظر می‌گیرد، داشته باشد و مقادیر بالاتری را نشان دهد زیرا PET در مناطقی که بارش

متغیر ورودی این مدل قابل مشاهده است، تعدیل کند و درک بهتری از خشک‌سالی را ارائه دهد. به‌منظور شناسایی بهتر تفاوت شاخص‌های خشک‌سالی در بازه‌های زمانی مختلف در این پژوهش، یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای هفت ایستگاه همدید مشخص شده استفاده شد که در شکل ۸ قابل مشاهده است.

کوتاهی آشکار است و در بسیاری در سال‌ها مقادیر این دو شاخص بسیار مشابه یکدیگر است؛ اما مسأله‌ای که می‌تواند مهم باشد دخالت نقش PET در برآورد خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و حتی مناطق مرطوب است که می‌تواند شدت ناهنجاری‌های بارش را که در مدل SPI به‌عنوان تنها



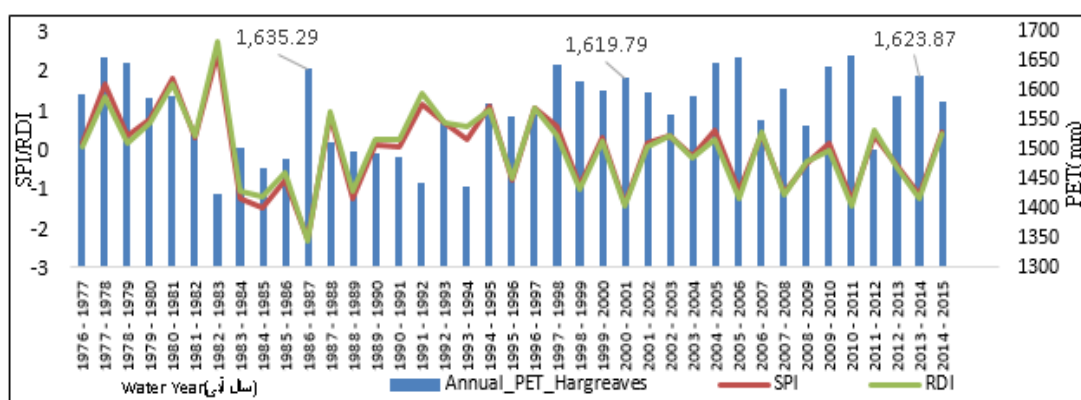
شکل ۸- مقایسه نتایج شاخص‌های SPI و RDI با استفاده از رگرسیون خطی.

Figure 8. Comparison of the results of SPI and RDI indices using linear regression.

داد که دو شاخص خشک‌سالی منتخب با مقادیر PET همخوانی داشته به طوری که در سال‌هایی که خشک‌سالی در ایستگاه اردبیل رخ داده است مقدار PET سالانه که از مقادیر دمای کمینه و بیشینه و با مدل هارگریوز محاسبه شده است، افزایش یافته و بالعکس در سال‌هایی که بارندگی مناسب و به عبارتی ترسالی رخ داده است از مقدار PET کاسته شده است و در نتیجه شاخص‌های منتخب دوره‌های ترسالی را نشان داده‌اند. شدیدترین خشک‌سالی که در ایستگاه اردبیل به وقوع پیوسته است مربوط به سال ۱۹۸۶-۸۷ بوده است که مقدار آن برابر با ۲/۲۸- بوده است، این در حالی است که مقدار PET در این سال با افزایش چشمگیری روبرو بوده است که مقدار آن برابر با ۱۶۳۵,۳۰ میلی‌متر بوده است.

نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تعیین  $R^2$  در همه موارد بیش از ۰/۹۰ را نشان می‌دهد که بیانگر این مطلب است که واریانس شاخص‌های SPI و RDI مشابه یکدیگر است. با این حال در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر مانند بازه ۶ ماهه، مقادیر  $R^2$  نسبت به بازه‌های زمانی بزرگ‌تر کاهش می‌یابد که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر PET در برآورد خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت منطقه باشد. به عنوان نمونه، مقدار  $R^2$  در ایستگاه کلیبر در بازه زمانی ۶ ماهه حدوداً ۰/۸۲ و در دیگر ایستگاه‌ها بالای ۰/۹۰ می‌باشد.

با توجه به نتایج همبستگی که در شکل ۸ مشخص شد، در ادامه نتایج خشک‌سالی سالانه SPI و RDI استانداردشده با مقادیر سالانه PET یا تبخیر و تعرق پتانسیل برای ایستگاه اردبیل به عنوان نمونه در شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان



شکل ۹- مقایسه PET سالانه با خشک‌سالی در ایستگاه همدید اردبیل.

Figure 9. Yearly PET Comparison with Drought at Ardebil Station.

است؛ اما این نتیجه در مورد همه ایستگاه‌ها صدق نمی‌کند، ولی در این پژوهش عمدتاً شاخص RDI برای به دست آوردن وقایع ترسالی حساسیت بیشتری نشان داده است. این نتیجه با پژوهش خلیلی و همکاران (۲۰۱۱) متفاوت بوده و ایشان شاخص RDI را حساس به برآورد خشک‌سالی‌های شدید ذکر نموده‌اند که می‌توان متفاوت بودن شرایط اقلیمی

در ادامه به منظور مقایسه بهتر شاخص‌های SPI و RDI، درصد فراوانی مقادیر خشک‌سالی در دوره‌های زمانی مشخص شده در جدول ۴ برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دره‌رود قابل مشاهده است. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که شاخص RDI به طور کلی برای وقایع ترسالی شدید و خیلی شدید، مقادیر بالاتری نسبت به شاخص SPI محاسبه نموده

مختلف ایران را دلیل این تفاوت ذکر کرد، به طوری که در پژوهش ایشان هیچ‌یک از مناطق شمال غرب ایران در نظر گرفته نشده است (۱۱). تفاوت بین شاخص‌ها در بازه‌های زمانی مورد بررسی و همچنین در طبقات مختلف خشک‌سالی و ترسالی بسیار کوچک است و تقریباً مشابه یکدیگر هستند. با این حال درصد بیش‌تری از خشک‌سالی‌های شدید و خیلی شدید مربوط به شاخص SPI است، در حالی که شاخص RDI تمایل دارد درصد بیش‌تری از وقایع ترسالی شدید و خیلی شدید را نشان دهد. این نتایج با پژوهش مراتی و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد (۱۸).

جدول ۶- درصد فراوانی خشک‌سالی‌های به دست آمده از SPI و RDI در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه.

**Table 6. The Frequency percentage of drought caused by SPI and RDI the time scales of 3, 6, 9 and 12 months.**

درصد فراوانی وقایع خشک‌سالی و ترسالی Frequency percentage events Drought and Wet								بازه زمانی خشک‌سالی Drought Time Scale	ایستگاه Station
مقادیر ترسالی Wet values				مقادیر خشک‌سالی Drought values					
کل ترسالی Total Wet	شدید و خیلی شدید Severe and Extreme	متوسط Moderate	نزدیک نرمال Near normal	کل خشک‌سالی Total drought	نزدیک نرمال Near normal	متوسط Moderate	شدید و خیلی شدید Severe and Extreme		
58.62	0	17.24	41.38	41.38	31.03	3.45	6.9	SPI-3	اهر Ahar
44.83	6.9	13.79	24.14	55.17	41.37	6.9	6.9	SPI-6	
52.22	3.55	17.44	31.23	47.78	24.01	14.87	8.9	SPI-9	
51.72	6.9	10.34	34.48	48.28	31.04	10.34	6.9	SPI-12	
51.72	0	13.79	37.93	48.28	34.49	3.45	10.34	RDI-3	
41.37	10.34	10.34	20.69	58.63	44.83	6.9	6.9	RDI-6	
48.28	3.45	17.24	27.59	51.72	24.13	20.69	6.9	RDI-9	
51.73	6.9	6.9	37.93	48.27	27.58	17.24	3.45	RDI-12	
43.6	5.13	10.26	28.21	56.4	46.15	7.69	2.56	SPI-3	
48.71	2.56	15.38	30.77	51.29	35.91	7.69	7.69	SPI-6	
61.54	7.69	0	53.85	38.46	15.38	17.95	5.13	SPI-9	
61.53	7.69	7.69	46.15	38.47	15.39	17.95	5.13	SPI-12	
46.15	5.13	7.69	33.33	53.85	46.16	5.13	2.56	RDI-3	
53.84	2.56	17.95	33.33	46.16	30.78	7.69	7.69	RDI-6	
56.4	7.69	2.56	46.15	43.6	23.08	17.95	2.57	RDI-9	
58.97	5.13	7.69	46.15	41.03	15.38	23.08	2.57	RDI-12	
62.5	6.25	0	56.25	37.5	31.25	0	6.25	SPI-3	کلبر Kaleybar
50	6.25	12.5	31.25	50	37.5	0	12.5	SPI-6	
56.25	6.25	6.25	43.75	43.75	31.25	6.25	6.25	SPI-9	
56.25	6.25	12.5	37.5	43.75	25	6.25	12.5	SPI-12	
56.25	6.25	0	50	43.75	37.5	0	6.25	RDI-3	
50	12.5	0	37.5	50	37.5	0	12.5	RDI-6	
56.25	6.25	6.25	43.75	43.75	31.25	6.25	6.25	RDI-9	
62.5	6.25	12.5	43.75	37.5	18.75	6.25	12.5	RDI-12	
49.7	3.57	10.55	35.58	50.29	35.01	3.57	11.71	SPI-3	
46.42	3.57	7.14	35.71	53.58	32.16	10.71	10.71	SPI-6	
49.99	3.57	7.14	39.28	50.01	28.57	7.14	14.3	SPI-9	
42.85	3.57	10.71	28.57	57.15	39.29	7.15	10.71	SPI-12	
53.57	3.57	14.29	35.71	46.43	32.14	3.57	10.72	RDI-3	
50.04	3.53	10.8	35.71	49.96	28.57	14.2	7.19	RDI-6	
46.42	3.57	10.71	32.14	53.58	35.71	7.14	10.73	RDI-9	
49.99	3.57	10.71	35.71	50.01	32.14	7.14	10.73	RDI-12	

ادامه جدول ۶-

Continue Table 6.

درصد فراوانی وقایع خشک‌سالی و ترسالی Frequency percentage events Drought and Wet								بازه زمانی خشک‌سالی Drought Time Scale	ایستگاه Station
مقادیر ترسالی Wet values				مقادیر خشک‌سالی Drought values					
کل ترسالی Total Wet	شدید و خیلی شدید Severe and Extreme	متوسط Moderate	نزدیک نرمال Near normal	کل خشک‌سالی Total drought	نزدیک نرمال Near normal	متوسط Moderate	شدید و خیلی شدید Severe and Extreme		
55	0	15	40	45	35	0	10	SPI-3	مشگین شهر MeshginShahr
55	0	10	45	45	30	5	10	SPI-6	
65	5	5	55	35	10	15	10	SPI-9	
60	5	5	50	40	15	20	5	SPI-12	
55	0	15	40	45	35	0	10	RDI-3	
49.48	0	9.18	40.3	50.52	34.01	6.01	10.5	RDI-6	
65	5	5	55	35	10	15	10	RDI-9	
60	5	0	55	40	15	20	5	RDI-12	
48.39	3.23	16.13	29.03	51.61	32.26	6.45	12.9	SPI-3	
51.61	3.23	12.9	35.48	48.39	25.81	16.13	6.45	SPI-6	
48.39	9.68	9.68	29.03	51.61	32.26	9.68	9.67	SPI-9	
41.94	9.68	9.68	22.58	58.06	41.93	9.68	6.45	SPI-12	
48.39	3.23	9.68	35.48	51.61	35.48	0	16.13	RDI-3	
48.39	3.23	16.13	29.03	51.61	29.03	19.35	3.23	RDI-6	
48.39	9.68	9.68	29.03	51.61	32.25	9.68	9.68	RDI-9	
45.17	9.68	9.68	25.81	54.83	38.7	9.68	6.45	RDI-12	
58.63	6.9	3.45	48.28	41.37	27.58	3.45	10.34	SPI-3	سراب Sarab
58.62	0	17.24	41.38	41.38	31.03	3.45	6.9	SPI-6	
44.83	6.9	13.79	24.14	55.17	41.37	6.9	6.9	SPI-9	
52.22	3.55	17.44	31.23	47.78	24.01	14.87	8.9	SPI-12	
51.72	6.9	10.34	34.48	48.28	31.04	10.34	6.9	RDI-3	
51.72	0	13.79	37.93	48.28	34.49	3.45	10.34	RDI-6	
41.37	10.34	10.34	20.69	58.63	44.83	6.9	6.9	RDI-9	
48.28	3.45	17.24	27.59	51.72	24.13	20.69	6.9	RDI-12	

### نتیجه‌گیری کلی

مورد مطالعه مشاهده نشد. این در حالی است که در سایر ماه‌ها و حتی مقادیر سالانه و فصلی، همه ایستگاه‌ها حداقل یک مورد روند در سری زمانی بارش و دما را تجربه کرده‌اند. نتایج منحنی LOWESS نشان داد که یک سناریو افزایش دما برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دره رود اردبیل قابل مشاهده است. با توجه به خط روند در منحنی LOWESS، افزایش دما به احتمال زیاد در آینده نیز قابل پیش‌بینی است. این در حالی است روند طولانی مدت بارندگی، در همه ایستگاه‌ها، دارای رفتار

شناسایی روند در سری زمانی بارش و دما در این پژوهش با استفاده مدل‌های Man-Kendall و Sen's slope صورت گرفت و به منظور ارزیابی پایداری طولانی مدت روند در سری زمانی داده‌ها از منحنی LOWESS (در سطح معنی‌داری ۵٪) در حوضه دره رود اردبیل استفاده شد. نتایج روند من-کندال نشان داد که در سری زمانی مقادیر بارش، ماه‌های نوامبر و فوریه و در سری زمانی مقادیر دما، ماه‌های اکتبر و دسامبر هیچ روندی در ایستگاه‌های

شاخص SPI نسبت به خشک‌سالی‌های شدید حساسیت بیشتری دارد که یکی از دلایل آن را می‌توان عدم دخالت پارامتر تبخیر و تعرق در این مدل نسبت به مدل RDI باشد. باین وجود در حوضه آبریز دره‌رود به دلیل وجود ارتفاعاتی از جمله رشته‌کوه سبلان در غرب حوضه و رشته‌کوه‌های شرق اردبیل از جمله رشته‌کوه‌های طالش که در جهت شمالی به جنوبی و مابین حوضه دره رود و دریای خزر قرار دارند، باعث به وجود آمدن تفاوت در گردش جوی از جمله وزش بادهای شدید و مقادیر دما، رطوبت، PET و در نهایت تفاوت‌های جزئی در مقادیر دو شاخص خشک‌سالی SPI و RDI شده است. برخی از بازه‌های زمانی مانند بازه ۶ ماهه اندکی تفاوت در شاخص‌ها مشاهده شد و ضریب  $R^2$  مقادیر نزدیک به ۰/۹۰ را نشان داد (شکل ۸)، این در حالی است که در دیگر بازه‌ها مانند بازه ۱۲ ماهه، ضریب تعیین بالای ۰/۹۵ و نزدیک به ۱ به دست آمد که بیانگر شباهت نتایج دو مدل برآورد خشک‌سالی در بازه‌های بلندمدت است. مرباتی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی برای شمال شرق الجزایر، تفاوت بین دو شاخص SPI و RDI را در بازه ۳ ماهه به دست آوردند و دیگر بازه‌ها ضریب تعیین بالای ۰/۹۰ را میان دو شاخص خشک‌سالی به دست آورد (۱۸). در ایران نیز زارعی و همکاران (۲۰۱۶) به مقایسه نتایج دو شاخص SPI و RDI در مناطق جنوبی ایران پرداختند و نتایج این دو شاخص در شناسایی مناطق خشک و نیمه‌خشک در سطح ۰/۹۵ درصد را معنی‌دار محاسبه نموده‌اند (۴۰).

هر دو شاخص قادر به شناسایی وقایع خشک‌سالی و ترسالی در حوضه دره‌رود اردبیل هستند که این تشابه در پژوهش‌های مختلف پژوهشگرانی چون زارچ و همکاران (۲۰۱۱)، زهتابیان و همکاران (۲۰۱۳)، تیگکاس و تساکریس (۲۰۱۵)، سافیولا و

یکسانی نمی‌باشد و سناریوهای متفاوتی را می‌توان برای بارندگی در حوضه دره‌رود در نظر گرفت. از جمله ایستگاه‌های که دارای روند بارشی مثبت می‌باشند می‌توان به ایستگاه‌های پارس‌آباد، کلیبر و سراب اشاره نمود. لازم به ذکر است که ایستگاه سراب در سال‌های اخیر از یک روند تقریباً ثابت بارندگی پیروی می‌کند. بیش‌ترین روند کاهش بارندگی مربوط به ایستگاه اردبیل است که مقدار  $R^2$  برای مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی، برابر با ۰/۶۹ است. تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در روند دما و بارش در یک منطقه منجر به ایجاد مخاطراتی از جمله خشک‌سالی می‌شود که می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تولید محصولات کشاورزی و منابع آب سرزمینی داشته باشد. در این پژوهش تأثیر دو عامل دما و بارش و تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه این پارامترهای اقلیمی، در ایجاد دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی با استفاده از دو شاخص SPI و RDI مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور به بررسی دو شاخص خشک‌سالی منتخب در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در حوضه آبریز دره‌رود اردبیل پرداخته شد. هر دو شاخص قادر به شناسایی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی تقریباً مشابه در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. نتایج خشک‌سالی در همه ایستگاه نشان می‌دهد که از سال آبی ۱۲-۲۰۱۱ تا پایان دوره آماری یعنی سال ۱۵-۲۰۱۴ خشک‌سالی در منطقه فراگیر بوده است. شدیدترین خشک‌سالی مشاهده شده در مدل SPI مربوط به ایستگاه‌های اردبیل و اهر در سال آبی ۱۱-۲۰۱۰ در بازه سه ماهه است که مقادیر آن به ترتیب ۳/۱۱- و ۳/۱۳- بوده است. همین خشک‌سالی شدید را شاخص RDI برای همین سال و بازه در هر دو ایستگاه اردبیل و اهر به ترتیب ۳/۰۲- و ۳/۰۹- محاسبه نموده است. این نتیجه شباهت این دو شاخص را نشان می‌دهد و می‌توان گفت که

در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند بسیاری از مناطق ایران که ممکن است بارندگی به صفر برسد و میزان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد، بسیار مهم و کاربردی است و صرفاً استفاده از پارامتر بارندگی برای برآورد خشک‌سالی نمی‌تواند کافی باشد. با توجه به اهمیت پارامتر PET در بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب در ایران، می‌طلبند که شاخص RDI را در دیگر مناطق ایران به‌ویژه در مناطقی که اقلیم محلی می‌تواند تأثیر داشته باشد مانند شمال‌غرب و مناطق کوهستانی ایران، به‌صورت گسترده بررسی گردد و نتایج آن را با دیگر شاخص‌ها مانند شاخص مهم و پرکاربرد SPI مقایسه شود.

همکاران (۲۰۱۵) و مرباتی و همکاران (۲۰۱۸) نیز بیان‌شده است (۱۸، ۲۳، ۲۷، ۳۹ و ۴۱). به‌طورکلی در پژوهش حاضر در خشک‌سالی‌های خیلی شدید، شاخص SPI مقادیر بیش‌تری نسبت به RDI نشان می‌دهد، این در حالی است که ترسالی‌های خیلی شدید را شاخص RDI مقادیر بالاتری را محاسبه نموده است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که با توجه به اهمیت PET در کشاورزی و مدیریت منابع آب در ایران، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی که بتوانند مقادیر تبخیر و تعرق را علاوه بر پارامتر بارندگی در فرمول‌بندی خود بررسی نمایند، بسیار ضروری و مهم می‌باشد. این نتایج می‌تواند چنین تفسیر شود که مزیت احتمالی استفاده از PET در برآورد خشک‌سالی

#### منابع

- Ahmad, L., Parvaze, S., Majid, M., and Kanth, R.H. 2016. Analysis of Historical Rainfall Data for Drought Investigation Using Standard Precipitation Index (SPI) Under Temperate Conditions of Srinagar Kashmir. Pak. J. Meteorol. 13: 25. 29-38.
- Cleveland, W.S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. J. Amer. Statist. Assoc. 74: 829-836.
- Dastorani, M.T., Massah Bavan, A.R., Poormohammadi, S., and Rahimian, M.H. 2011. Assessment of potential climate change impacts on drought indicators (Case study: Yazd station, Central Iran). Desert. 16: 2. 159-167.
- Edwards, D.C., and McKee, T.B. 1997. Characteristics of 20<sup>th</sup> century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Rep. 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 585p.
- Feng, G., Cobb, S., Abdo, Z., Fisher, D.K., Ouyang, Y., Adeli, A., and Jenkins, J.N. 2016. Trend analysis and forecast of precipitation, reference evapotranspiration and rainfall deficit in the Blackland Prairie of Eastern Mississippi. J. Appl. Meteorol. Climatol. 55: 1425-1439.
- Gašiorek, E., and Musiał, E. 2015. Evaluation of the Precision of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Years 1954-1995 in Łódź. J. Ecol. Engin. 16: 4.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1: 2. 96-99.
- Hayes, M.J., Wilhelmi, O.V., and Knutson, C.L. 2004. Reducing drought risk: bridging theory and practice. Natural Hazards Review. 5: 2. 106-113.
- Helsel, D.R., and Hirsch, R.M. 1992. Statistical Methods in Water Resources. Elsevier, Amsterdam.
- Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London.
- Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A.A., and Zand-Parsa, S. 2011. Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. Water Resources Management. 25: 6. 1737-1757.
- Khan, M.I., Liu, D., Fu, Q., Dong, S., Liaqat, U.W., Faiz, M.A., and Hu, Y. and Saddique, Q., 2016. Recent climate trends and drought behavioral

- assessment based on precipitation and temperature data series in the Songhua River basin of China. *Water resources management*. 30: 13. 4839-4859.
13. Kogan, F.N. 2000. Contribution of remote sensing to drought early warning. *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management, Proceedings of an expert group meeting held on Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*. Edited by D.A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar, and D.A. Wood. Lisbon, Portugal, Pp: 75-87.
  14. Kousari, M.R., Dastorani, M.T., Niazi, Y., Soheili, E., Hayatzadeh, M., and Chezgi, J. 2014. Trend Detection of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran Based on Implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Application of Non-Parametrical Statistical Method. *Water Resour Manage*. 28: 1857-1872.
  15. Lloyd-Hughes, B., and Saunder, M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *Inter. J. Climatol*. 22: 13. 1571-1592.
  16. Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13: 245-259.
  17. McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1993. January. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
  18. Merabti, A., Martins, D.S., Meddi, M., and Pereira, L.S. 2018. Spatial and time variability of drought based on SPI and RDI with various time scales. *Water Resources Management*. 32: 1087.
  19. Neelakanth, J.K., Balakrishnan, P., Muthuchamy, I., and Tamilmanai, D. 2017. Assessment of drought using standardized precipitation index (SPI) for Koppal district, Karnataka, India. *Environment and Ecology*. 35: 3. 1665-1668.
  20. Rahmat, S., Jayasuriya, N., and Bhuiyan, M. 2015. Assessing droughts using meteorological drought indices in Victoria, Australia. *Hydrology Research*. 46: 3. 463-476.
  21. Rahmat, S.N. 2015. Methodology for development of drought severity-duration-frequency (SDF) Curves. Ph.D. Thesis, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia.
  22. Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B., Eds. 2007. *Methods and tools for drought analysis and management* (Vol. 62). Springer Science & Business Media.
  23. Safiolea, E., Tsakiris, V., Vangelis, H., Verbeiren, B., and Huysmans, M. 2015. Analysing drought characteristics in recharging areas of Belgian aquifers. *European Water*. 50: 59-72.
  24. Shishutosh Barua, S.M.A.S.C.E., Ng, A.W.M., and Perera, B.J.C. 2010. Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia. *J. Water Resour. Plan. Manage*. 137: 2. 215-226.
  25. Surendran, U., Kumar, V., Ramasubramoniam, S., and Raja, P. 2017. Development of drought indices for semi-arid region using drought indices calculator (DrinC)—A case study from Madurai District, a semi-arid region in India. *Water Resources Management*. 11: 13. 3593-3605.
  26. Taxak, A.K., Murumkar, A.R., and Arya, D.S. 2014. Long term spatial and temporal rainfall trends and homogeneity analysis in Wainganga basin, Central India. *Weather and Climate Extremes*. 4: 50-61.
  27. Tigkas, D., and Tsakiris, G. 2015. Early estimation of drought impacts on rainfed wheat yield in Mediterranean climate. *Environmental Processes*. 2: 1. 97-114.
  28. Tigkas, D., Vangelis, H., and Tsakiris, G. 2012. Drought and climate change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*. 440: 33-41.
  29. Tigkas, D., Vangelis, H., and Tsakiris, G. 2013. The RDI as a composite climatic index. *European Water*. 41: 17-22.
  30. Tigkas, D., Vangelis, H., and Tsakiris, G. 2016. Introducing a modified reconnaissance drought index (RDle) incorporating effective precipitation. *Procedia Engineering*. 162: 332-339.



31. Tsakiris, G. 2017. Drought risk assessment and management. *Water Resources Management*. 31: 10. 3083-3095.
32. Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., Jacquemin, I., Canters, F., Vanderhaegen, S., Engelen, G., Poelmans, L., De, Becker, P., and Batelaan, O. 2013. A system-based paradigm of drought analysis for operational management. *Water Resources Management*. 27: 10. 5281-5297.
33. Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H., 2007. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21: 5. 821-833.
34. Tsakiris, G., and Vangelis, H. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9: 10. 3-11.
35. Ueangawat, K., Nilsamranchit, S., and Jintrawet, A. 2016. Comparison of estimation methods for Daily reference evapotranspiration under Limited Climate data in Upper Northern Thailand. *Environ. Natur. Resour. J.* 14:2. 10-23. DOI: 10.14456/enrj.2016.9.
36. Wilhite, DA. 1993. The enigma of drought. *Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Ma, Pp: 3-15.
37. Yue, S., and Wang, C.Y. 2004. The mann-kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially Correlated hydrological series. *Water Resource Management*. 18: 201-218.
38. Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G.S. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*. 16: 1807-1829.
39. Zarch, M.A.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Dastorani, M.T., and Kousari, M.R. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water resources management*. 25: 13. 3485.
40. Zarei, A.R., Moghimi, M.M., and Mahmoudi, M.R. 2016. Analysis of changes in spatial pattern of drought using RDI index in south of Iran. *Water resources management*. 30: 11. 3723-3743.
41. Zehtabian, G., Karimi, K., Mirdashtvan, M., and Khosravi, H. 2013. Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in South Khorasan Province in Iran. *Inter. J. Adv. Biol. Biom. Res.* 1: 9. 981-992.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(6), 2020*

*<http://jwsc.gau.ac.ir>*

*DOI: 10.22069/jwsc.2019.15612.3079*

## **Drought assessment based on the long-term stability of temperature and precipitation in Ardabil DareRood basin**

**M. Faridpour<sup>1</sup>, \*B. Zeinali<sup>2</sup>, S. Asghari<sup>3</sup>, A. Ghorbani<sup>4</sup> and M. Rezaei Banafsheh<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, <sup>4</sup>Associate Prof., Dept. of Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, <sup>5</sup>Professor, Dept. of Climatology, University of Tabriz

Received: 09.11.2018; Accepted: 03.17.2019

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Drought is one of the most important natural hazards that affect a significant number of people due to extensive damage. Drought is also a phenomenon that directly related to the issue of water scarcity and because of its reversibility, can affect the various aspects of human life and the environment. The drought affects almost all the determinants of the hydrological cycle from the onset of precipitation and then the surface water flow and eventually storage in groundwater. Therefore, in this research, due to the results of the stable process of precipitation and temperature in the Ardabil DareRood basin, SPI Index which relies on precipitation, with the RDI index which combines the parameters of potential evapotranspiration and precipitation, were compared and evaluated in different time intervals.

**Materials and Methods:** In this study, in order to identify drought and wet periods, monthly precipitation data, Minimum and maximum monthly temperature for seven stations were used during the period of 30 years (1985-2014) in the Ardabil valley northwest of Iran. In order to identify the trend in the precipitation and temperature series in this research Man-Kendall (MK) and Sen's slope (Sen) models were used. Also, to assess the long-term stability of the trend in the time series LOWESS curve (at a significant level of 5%) was used. Also, using Aridity index, four stations in the arid area and three stations in the semi-arid region were established. In order to calculate the RDI index, potential evapotranspiration values were used. The PET value in the RDI index was obtained using monthly temperature data and Hargreaves method. Finally, SPI and RDI indices were compared in 3, 6, 9 and 12-month scales.

**Results:** The results of the LOWESS curve showed that the annual temperature at all stations follows an incremental scenario. While the precipitation behaves differently and often is decreasing. The results also showed that SPI and RDI indices are very similar in different time scales, and R2 is in most cases greater than 0.90. The most severe drought observed in the SPI and RDI models of the Ardabil station in 2010-2011 on a 3-month scale, whose values were respectively -3/11 and -3/09. Also, the results showed that the RDI index that extreme and severe wet values it's larger than SPI. Eventually, both indices are many similarities with each other but because of RDI's use of PET, it can be used more widely for arid and semi-arid regions of Iran

**Conclusion:** This research, two SPI and RDI indices were used to compare the drought events in the DarehRood Ardabil basin of the northwest of Iran. Due to the dry and semi-arid climate of

---

\* Corresponding Author; Email: [zeynali.b@uma.ac.ir](mailto:zeynali.b@uma.ac.ir)

most regions of Iran, it is very probable that the amount of precipitation is zero in some seasons. Therefore, precipitation-based indices such as SPI may have less efficiency than RDI index, which, in addition to rainfall, uses potential evapotranspiration (PET) in their formulation. Considering the importance of PET parameter in agriculture and water resources management in Iran, it is necessary to examine the RDI index in other regions of Iran, such as the northwest and mountainous regions of Iran and its results can be compared with other indicators such as the important and highly applicable SPI indicator.

**Keywords:** DarehRood Ardabil basin, Drought indices, Linear regression, LOWESS curve, Potential evapotranspiration

