

## واسنجی شاخص خشک‌سالی پالمر در ایران

سارا آزادی<sup>۱\*</sup>، سعید سلطانی<sup>۲</sup>، منیره فرامرزی<sup>۳</sup> و سعید پورمنافی<sup>۴</sup>

### چکیده

برای کمی‌سازی خشک‌سالی، شاخص‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند که هر کدام دارای نقاط قوت و ضعفی هستند. ضریب‌های برخی از معادلات این شاخص‌ها، مربوط به شرایط مناطق استخراج آن‌ها است که برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد در مناطق مختلف دیگر، لازم است مورد واسنجی قرار گیرند. هدف این پژوهش واسنجی ضرایب شاخص پالمر برای ایران است. به این منظور از داده‌های دما و بارش در مقیاس ماهانه در دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۰۲ و رطوبت ابتدایی خاک مربوط به ۵۰۶ حوضه مطالعاتی کشور استفاده شد و میانگین وزنی اطلاعات برای هفده حوضه کشور به دست آمد. سپس شاخص پالمر برای کل ایران مورد واسنجی قرار گرفت و به صورت جداگانه برای شرایط خشک و تر به ترتیب ضرایب دوگانه (۰/۸۹۲، ۰/۰۰۲) و (۰/۹۴۶، ۰/۰۰۲) در مقایسه با معادله پالمر با ضرایب (۰/۸۹۷، ۰/۳۳۳) که تنها برای شرایط خشک بود، به دست آمد. نتایج این پژوهش انطباق بسیار خوبی را در اکثر حوضه‌ها برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ به‌عنوان خشک‌ترین سال‌ها و سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ به‌عنوان مرطوب‌ترین سال‌های مورد بررسی با توجه به نتایج حاصل از تحلیل شرایط بارشی سال‌های مورد نظر نشان داد. نتایج این پژوهش زمینه‌ای را برای واسنجی شاخص پالمر و ارزیابی خشک‌سالی در مناطق اقلیمی مختلف ایران فراهم می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** ایران، حوضه هیدرولوژیکی، خشک‌سالی، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر، واسنجی.

ارجاع: آزادی س.، سلطانی س.، فرامرزی م. و پورمنافی س. ۱۳۹۷. واسنجی شاخص خشک‌سالی پالمر در ایران. مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۱۹-۲۸.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [azadivas@yahoo.com](mailto:azadivas@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۳۰

## مقدمه

خشک‌سالی، از جمله پیچیده‌ترین بلایای طبیعی، بر سلامت انسان، امنیت غذایی، فعالیت‌های اقتصادی، زیرساخت‌های فیزیکی، منابع طبیعی و محیط زیست، آثار سوء دارد (ACSD-5، ۲۰۰۷). از آنجایی که این پدیده به‌صورت خزنده است ارزیابی و کمی‌سازی آن می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از خشک‌سالی کمک کند (آسیایی، ۱۳۸۵).

ایران کشوری پهناور است که به علت موقعیت خاص و ویژگی‌های توپوگرافیک، از آب و هوای متفاوتی برخوردار است. میزان بارندگی متوسط سالانه آن حدود ۲۲۴ تا ۲۷۵ میلی‌متر است که بدین ترتیب حدود یک سوم متوسط بارندگی‌های خشکی‌ها (۸۰۰ میلی‌متر) و کمتر از یک چهارم بارندگی کره زمین (۱۱۳۳ میلی‌متر) است؛ به همین دلیل، قسمت اعظم ایران در قلمرو آب و هوای خشک جهان قرار می‌گیرد (فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۷۴). از سوی دیگر، رشد فزاینده جمعیت و نیاز به محصولات کشاورزی و محدودیت منابع آب و خاک به‌عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی، مسأله کم‌آبی را به گونه‌ای بسیار جدی فراوری کشور قرار داده است. همان‌طور که آب اساسی‌ترین نیاز بشر است، خشک‌سالی و کمبود آب، عامل بروز بحران‌های جدی در زندگی انسان است. تاکنون خشک‌سالی به اندازه سایر بلایای طبیعی مورد توجه قرار نگرفته است؛ چون اکثر بلایای طبیعی طی دوره‌های کوتاه خسارات سنگین مالی و جانی به جامعه وارد می‌کنند؛ اما خسارات سنگین‌تر خشک‌سالی به‌صورت تدریجی و در مدتی طولانی بروز می‌کند (پورحسین، ۱۳۹۰). با توجه به خسارات خشک‌سالی‌ها در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی و اقتصادی کشور، شناسایی آن از اهمیت ویژه‌ای دارد و نیازمند توجه بیشتری در تصمیم‌گیری‌های سیاسی است.

برای کمی‌سازی خشک‌سالی از شاخص‌های مختلف با نقاط قوت و ضعف استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPI)، شاخص درصد از نرمال بارندگی<sup>۲</sup> (PNPI)، شاخص دهک‌های بارندگی<sup>۳</sup> (DPI)، شاخص ناهنجاری

بارش<sup>۴</sup> (RAI)، و شاخص شدت خشک‌سالی پالم<sup>۵</sup> (PDSI). شاخص پالم در سال ۱۹۶۵ توسط پالم در آمریکا با تنها یک معادله‌ی شدت برای هر دو شرایط خشک و تر توسعه پیدا کرد (پالم، ۱۹۶۵). ویژگی‌هایی که شاخص پالم از دیگر شاخص‌ها متمایز می‌کند، شامل کاربرد عوامل دیگر علاوه بر بارش و تعریف یک عامل با مفهوم احتمالاتی برای خاتمه هر رویداد در بخش رده‌بندی است که باعث شده علی‌رغم گذشت حدود پنج دهه و ارائه شاخص‌های مختلف، همچنان مورد استفاده پژوهشگران قرار گیرد (سلطانی تودشکی، ۱۳۸۶). پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از این شاخص برای بررسی خشک‌سالی صورت گرفته است. ریند و همکاران (۱۹۹۰) در آمریکای شمالی و اروپا، آیگو و همکاران (۲۰۰۴) در سراسر جهان، گوپتا و همکاران (۲۰۱۱) در مابین، آسیایی (۱۳۸۵) در مشهد، گل محمدی و مساح بوانی (۱۳۹۰) در حوضه قره‌سو، کشاورز و همکاران (۱۳۹۱) در کل کشور، صالح‌نیا و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه نیشابور، عملکرد شاخص را تا حدودی خوب گزارش کردند؛ اما نکته قابل توجه، این است که شاخص پالم بر اساس یکسری فرضیات و ارقام منطقه استخراج شاخص محاسبه شده است که واسنجی آن در مناطق مختلف دیگر، نتایج بهتری را ارائه کرده است. بالم و مولی (۱۹۸۰) در هند، بگاردی و همکاران (۱۹۹۴) در نبراسکا و آمریکای شمالی، آکین‌رمی و همکاران (۱۹۹۶) در کانادا، ولز و همکاران (۲۰۰۴) در نبراسکا، کانزاس، کلرادو، وومینگ، مونتانا و داکوتا، مو و چلیا (۲۰۰۶) در ایالت‌های متحده، سلطانی تودشکی و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه مهارلوی فارس، کارآموز و همکاران (۲۰۰۴) در اصفهان شاخص را مورد واسنجی قرار دادند و یافته‌های بسیار خوبی را به دست آوردند. از آنجایی که شاخص پالم در مطالعات گسترده‌ای کاربرد دارد و با توجه به لزوم بررسی و ارزیابی خشک‌سالی و ترسالی در مناطق اقلیمی مختلف ایران وجود دارد، در این پژوهش، شاخص پالم برای کل کشور واسنجی و بررسی می‌شود.

4- Rainfall Anomaly Index

5- Palmer Drought Severity Index

1- Standardized Precipitation Index

2- Percent of Normal Precipitation Index

3- Deciles of Precipitation Index

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

ایران با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع، بین عرض ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی واقع شده است (فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹). دامنه ارتفاعی آن بین کمتر از سطح دریا تا بیشتر از ۵۰۰۰ متر و دارای دمای هوای متنوع از ۳۰- تا ۵۰+ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارش سالانه به صورت متغیر از حدود ۲۵ میلی‌متر در فلات مرکزی تا بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر در نواحی دریای خزر و متوسط بارش سالانه کل کشور ۲۵۰ میلی‌متر است. تقریباً ۹۰٪ کشور دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک است (شهاب‌فر و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس تقسیم‌بندی وزارت نیرو، کشور به سی حوضه هیدرولوژیکی تقسیم شده است که مرتبط با شش حوضه اصلی هستند (شکل ۱).



شکل ۱- تقسیم‌بندی حوضه‌های هیدرولوژیکی سی گانه ایران (وزارت نیرو، ۱۳۸۳)

## شاخص شدت خشک‌سالی پالمر

شاخص شدت خشک‌سالی پالمر توسط پالمر (۱۹۶۵) برای سنجش میزان نوسانات ذخیره رطوبتی خاک در آمریکا توسعه یافت و اساس آن بر معادله بیلان آب خاک است. به دلیل پیچیده و طولانی بودن روش، به صورت خلاصه مراحل آن ارائه می‌شود. به طور کلی روند محاسباتی این شاخص را می‌توان در سه گام بررسی کرد

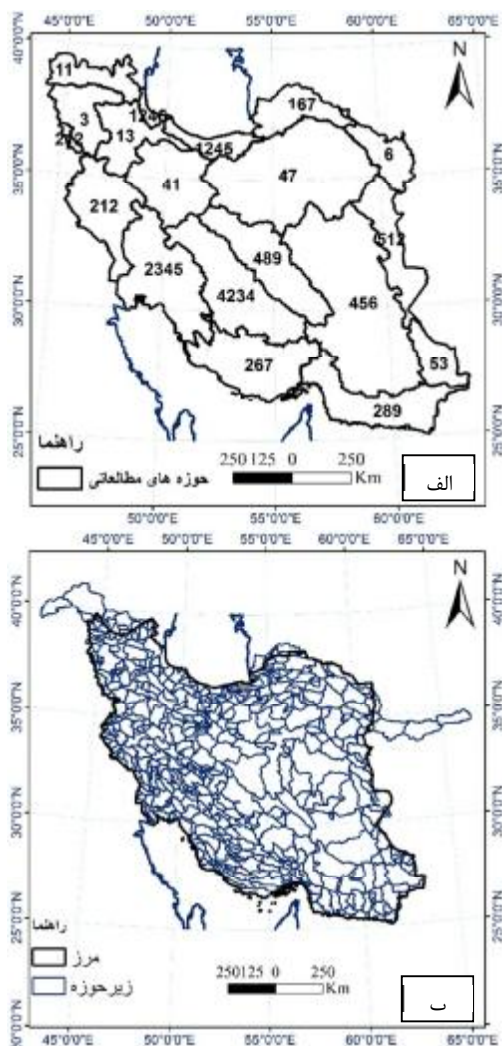
گام اول: مشابه بسیاری از شاخص‌ها، انحراف رطوبتی اقلیم مورد نظر (d) در هر دوره (i)، به دست می‌آید (معادله (۱)). به منظور برآورد d، نیاز به تعریف یک معیار مقایسه برای تعیین نوع و مقدار این انحراف است. پالمر از یک الگوریتم بیلان رطوبت آب در خاک استفاده کرد که در آن یکسری محاسبات آب‌شناختی برای اطلاعات درازمدت منطقه (ویژگی‌های خاک، بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل) صورت می‌پذیرد. این گام شامل دو قسمت محاسباتی است: قسمت اول- شبیه‌سازی ریاضی بیلان آبی و برآورد عوامل واقعی و پتانسیل بیلان آبی که شامل مقدار واقعی و پتانسیل تبخیر- تعرق، تغذیه رطوبت، اتلاف رطوبت و رواناب هستند و سپس محاسبه ضرایب چهارگانه. پالمر از روش تورنت‌وایت برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل و از مدل بیلان آبی برای به دست آوردن سایر فاکتورها استفاده کرده است (سلطانی تودشکی، ۱۳۸۶). قسمت دوم- محاسبه بارش مقتضی شرایط عادی اقلیمی (Prc-i) (با استفاده از چهار ضریب  $a_i, b_i, g_i, d_i$ ) و در ادامه محاسبه انحراف رطوبتی در دوره نام (di) برای اقلیم مورد نظر است. گام دوم: به منظور قابل مقایسه شدن انحراف رطوبتی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، مقدار انحراف رطوبتی توسط ضریب وزنی مشخصه اقلیمی ( $K_i$ ) به صورت بی‌بعد در می‌آیند؛ به عبارت دیگر در این گام، میزان شاخص انحراف رطوبتی ( $Z_i$ ) تعیین می‌شود (معادله (۲)). گام سوم: جهت تحلیل شدت رویداد و تعیین آغاز و پایان آن‌ها، مقدار انحراف رطوبتی به قالب رده‌بندی شده تبدیل می‌شود. این قسمت را در پنج مرحله محاسباتی می‌توان بررسی کرد (سلطانی تودشکی، ۱۳۸۶):

۱- تعیین قالب و مقیاس رده‌بندی (تعریف آستانه شدت‌های مختلف خشک‌سالی یا ترسالی)؛ ۲- برآورد عوامل دوام دوره و استخراج معادله شدت (معادله (۳))، معادله پالمر برای کانزاس غربی و آیوای مرکزی است؛ ۳- تعریف یک عامل با مفهوم احتمالاتی برای خاتمه هر رویداد، ۴- محاسبه شاخص‌های واسط و ۵- پیمایش معکوس و تعیین شدت و مدت رویدادها.

$$d_i = Pr_i - Pr_{c-i} \quad (1)$$

$$Z_i = d_i \times K_i \quad (2)$$

$$X_i = 0.897X_{i-1} + 0.333Z_i \quad (3)$$



شکل ۲- الف و ب- ۱۷ حوضه مطالعاتی (آزادی، ۱۳۹۲) و زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی ۵۰۶ تایی ایران (فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹)

در معادله (۱)،  $Pr_i$  میزان بارش در شرایط موجود است. طبق معادله (۳)، شاخص شدت خشک‌سالی پالم ( $X_i$ ) در مقطع زمانی  $t$  ترکیبی از سهم مشارکت انحراف رطوبتی هر مقطع ( $Z_i$ ) و شدت خشک‌سالی یک دوره ماقبل ( $X_{i-1}$ ) است. ضرایب  $0.897$  و  $0.333$  نیز مدت زمان استمرار و دوام یک رویداد خشک‌سالی یا ترسالی را تبیین می‌کنند (پالم، ۱۹۶۵).

### محاسبه شاخص

در این پژوهش برای واسنجی شاخص پالم در ایران، از اطلاعات دما و بارش ماهانه مربوط به دوره آماری (۲۰۰۲-۱۹۹۰)، مساحت، عرض جغرافیایی، ظرفیت آب قابل دسترس (TWC) و رطوبت کل خاک در ابتدای دوره آماری (سپتامبر سال ۱۹۹۰)؛ مربوط به ۵۰۶ زیرحوضه هیدرولوژیکی خروجی از مدل SWAT برای ایران استفاده شده است (فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹). فرآیندهای واسنجی و همچنین صحت‌سنجی داده‌های دبی و عملکرد محصول برای کل کشور توسط فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹) انجام گرفت و دقت خوبی را در خروجی نشان داد که به دلیل عدم قطعیت قابل قبول این مدل بود؛ بنابراین توجه به این امر که سایر خروجی‌های مدل می‌تواند قابل اعتماد باشد، از نتایج پژوهش ایشان در این بررسی استفاده شد. بدین‌صورت که میانگین وزنی این اطلاعات بر اساس شباهت اقلیمی و هیدرولوژیکی، برای هدفه حوضه آبخیز مطالعاتی مطابق با جدول ۱ محاسبه و سپس ضرایب شاخص پالم، به صورت جداگانه برای شرایط خشک سالی و ترسالی برای ایران به دست آمده است. شکل ۲- الف و ب به ترتیب مربوط به هدفه حوضه مطالعاتی و ۵۰۶ زیرحوضه هیدرولوژیکی مورد استفاده برای کل ایران است.

جدول ۱- حوضه‌های مطالعاتی و کدهای مربوطه

اسم	کد حوضه	اسم	کد حوضه
دریاچه نمک	4 - 1	ارس	1 - 1
گاوخونی، ایرقو، مهارلو	4 - 234	سفیدرود	1 - 3
کویر لوت، جازموریان	4 - 56	تالش، بین سفیدرود و هراز، هراز قره سو	1 - 245
کویر مرکزی	4 - 7	گرگانرود، اترک	1 - 67
کویر سیاه کوه، کویر در انجیر	4 - 89	کرخه، مرزی غرب	2 - 12
نمکزارخواف، هامون هیرمند	5 - 12	کارون، جراحی، حله	2 - 345
هامون مشکیل	5 - 3	کل، مند	2 - 67
سرخس	6	بندرعباس، رودخانه‌های بلوچستان	2 - 89
		دریاچه ارومیه	3

## نتایج و بحث

با توجه به بالا بودن حجم محاسبات در بومی‌سازی شاخص پالم و نتایج کمی‌سازی آن در ایران و همچنین تشابه نتایج حوضه‌های مطالعاتی مختلف، به‌عنوان نمونه

برخی از نتایج حوضه مطالعاتی ۲۳۴-۴ (حوضه‌های گاوخونی، مهارلو و ابرقو) آورده شده است. جدول ۲، خلاصه محاسبات بیلان آبی را در روش پالم واسنجی شده نشان می‌دهد.

جدول ۲- خلاصه محاسبات عوامل بیلان آبی (متوسط ماهانه و سالانه؛ میلی‌متر) و استخراج «ضرایب بیلان آبی»، حوضه مطالعاتی ۲۳۴-۴ (گاوخونی، مهارلو، ابرقو) در روش پالم واسنجی شده

عوامل بیلان	مقاطع زمانی؛ ماه‌های سال آبی											متوسط	
	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug		Sep
میانگین سالانه مقادیر واقعی و پتانسیل بیلان آبی													
Pr_mean	۵/۴	۲۳/۶	۵۷/۹	۶۳/۳	۵۷/۸	۶۵/۸	۲۷/۲	۱۰/۷	۱/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۲	۲۶/۳
ET_mean	۸/۱	۱۴/۲	۷/۹	۳/۶	۸/۱	۲۲/۹	۵۱/۷	۷۲/۲	۵۰/۳	۹/۵	۰/۷	۰/۲	۲۰/۸
RE_mean	۰/۰	۹/۶	۵۰/۱	۵۱/۷	۱۹/۰	۱۰/۰	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۱/۷
RO_mean	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸/۰	۳۰/۷	۳۳/۴	۰/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶/۱
L_mean	۲/۷	۰/۳	۰/۱	۰/۰	۰/۱	۰/۶	۲۵/۵	۶۱/۵	۴۸/۵	۸/۸	۰/۰	۰/۰	۱۲/۳
ET <sub>p</sub> _mean	۵۹/۳	۲۴/۵	۹/۷	۳/۶	۸/۱	۲۲/۹	۵۶/۸	۱۰۰/۹	۱۴۳/۵	۱۷۲/۷	۱۲۷/۷	۱۰۵/۰	۶۹/۶
RE <sub>p</sub> _mean	۱۵۸/۶	۱۶۱/۳	۱۵۱/۹	۱۰۰/۹	۴۹/۲	۳۰/۲	۲۰/۸	۴۶/۲	۱۰۷/۷	۱۵۶/۲	۱۶۵/۰	۱۶۵/۱	۱۰۹/۴
RO <sub>p</sub> _mean	۶/۵	۳/۸	۱۳/۱	۶۴/۲	۱۱۵/۹	۱۳۴/۸	۱۴۴/۳	۱۱۸/۹	۵۷/۴	۸/۹	۰/۰	۰/۰	۵۵/۷
L <sub>p</sub> _mean	۲/۸	۰/۶	۱/۸	۲/۶	۸/۱	۲۲/۷	۴۷/۵	۶۸/۹	۴۹/۲	۸/۸	۰/۰	۰/۰	۱۷/۸
ضرایب بیلان آبی (نسبت بین متوسط مقادیر واقعی متغیرهای بیلان و متوسط مقادیر پتانسیل آن‌ها)													
$\alpha$	۰/۱۴	۰/۵۸	۰/۸۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۷۲	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰	
$\beta$	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
$\gamma$	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
$\delta$	۰/۹۷	۰/۴۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۵۴	۰/۸۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	

\* در جدول فوق متوسط مقدار واقعی پارامترهای بیلان آبی به‌صورت Pr\_mean، بارش، ET\_mean، تبخیر-تعرق، RE\_mean، تغذیه رطوبت، RO\_mean، رواناب، L\_mean، اتلاف رطوبت و پارامترهای پتانسیل با پسوند p مشخص شده است.

در جدول ۲ دیده می‌شود که ضرایب چهارگانه به دست آمده (محاسبه بر اساس نسبت متوسط مقادیر واقعی و پتانسیل عوامل)، از مقدار یک تجاوز نکرده است که با شرایط این حوضه مطابقت دارد. همچنین به‌عنوان نمونه در حوضه مطالعاتی ۳-۵ (حوضه هامون مشکیل) در ماه دسامبر، ضریب  $T_{mm}$  (نسبت متوسط مقدار رواناب واقعی و پتانسیل) برابر با ۶/۳۷ به دست آمد که بزرگ‌تر شدن مقدار متوسط رواناب واقعی نسبت به مقدار متوسط پتانسیل آن را در سری زمانی نشان می‌دهد. این اشکال مربوط به فرضیه‌های بیلان آبی شاخص پالم است. پالم فرض نمود رواناب واقعی زمانی اتفاق می‌افتد که رطوبت خاک بیشتر از حد ظرفیت زراعی باشد<sup>۱</sup> (FC) و در حالت

پتانسیل، به اندازه تفاضل مقدار بارش پتانسیل (برابر با ظرفیت زراعی) و تغذیه پتانسیل خاک است؛ به عبارت دیگر، به اندازه رطوبت اولیه خاک رخ می‌دهد، با بررسی ماه دسامبر در حوضه ۳-۵ دیده شد که مقدار متوسط بارش در سری زمانی ۱۶۰ میلی‌متر و ظرفیت زراعی ۸۰ mm/m بود. همچنین مقدار متوسط پتانسیل تغذیه برابر با ۷۸/۹ میلی‌متر حاصل شد؛ بنابراین تفاضل ظرفیت زراعی و پتانسیل تغذیه خاک ۱/۱ و کمتر از مقدار متوسط رواناب واقعی (۶/۸ میلی‌متر) نتیجه شد و همین باعث ایجاد مقدار کسری بزرگ‌تر از یک شد. از این جهت شاید بتوان گفت که پالم مقدار پتانسیل را به درستی پایه‌ریزی نکرده است. بعد از محاسبه ضرایب چهارگانه بیلان آبی  $(a_i, b_i, g_i, d_i)$ ، بارش مقتضی و انحراف رطوبتی برای

ضرایب ۰/۶ و ۰/۰۸ برای منطقه مهارلوی فارس حاصل شد. همچنین کارآموز و همکاران (۲۰۰۴)، تنها یک معادله با ضرایب ۰/۶۸ و ۰/۰۶ در اصفهان گزارش کرده‌اند که در آن با محاسبه معادله شرایط خشک، آن را به صورت قرینه به دوره‌های ترسالی تعمیم دادند. نتیجه کمی‌سازی شدت خشک‌سالی با استفاده از شاخص پالمر برای سری زمانی مربوطه در حوضه مطالعاتی ۲۳۴-۴ در شکل ۴ (الف و ب) آمده است. شکل ۴-الف، مربوط به وضعیت حوضه در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۶ و شکل ۴-ب مربوط به ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ است. محور سمت راست نمودار مربوط به بارش ماهانه حوضه و محور سمت چپ مربوط به شاخص واسنجی‌شده و شاخص اولیه پالمر است. روند کلی شاخص‌ها نشان می‌دهد در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ شرایط طبیعی و بعد از آن در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ شرایط ترسالی اتفاق افتاده است؛ به طوری که سال ۱۹۹۳ مرطوب‌ترین سال بوده است و بعد از آن شرایط به سمت خشک‌سالی روی آورده و خشک‌سالی‌های شدیدی در سال ۱۹۹۴ به وقوع پیوسته است. طبق نمودار ملاحظه می‌شود که سال‌های ۱۹۹۵ و اوایل ۱۹۹۶ سال‌های تری بوده‌اند و در اواخر ۱۹۹۶ و ابتدای ۱۹۹۷ شرایط خشک‌سالی وجود داشته است. طبق شکل در سال ۱۹۹۷، شاخص اولیه شرایط خشک‌سالی و شاخص واسنجی‌شده، شرایط نرمال را نشان می‌دهند، در ابتدای این سال، بارش‌هایی اتفاق افتاده و طبق ویژگی بازگشتی بودن شاخص پالمر، شاخص واسنجی‌شده نسبت به شاخص اولیه شرایط بهتر و واقعی‌تری را نشان داده است. در اوایل سال ۱۹۹۸ شرایط تر و بعد از آن تا اوایل ۲۰۰۲، خشک‌سالی بر منطقه حاکم بوده است؛ به طوری که شدیدترین خشک‌سالی در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۹۰ مربوط به سال ۲۰۰۰ و بعد از آن ۲۰۰۱ بوده است. بررسی بارش کلی در سال‌های مورد نظر در حوضه‌های مختلف نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین شاخص واسنجی‌شده و شرایط بارشی وجود دارد. از طرف دیگر، در این حوضه مشابه با سایر حوضه‌ها، شاخص اولیه پالمر در غالب سال‌ها وضعیت خشک‌سالی و ترسالی را با شدت خیلی بیشتر نسبت به حالت واقعی و شاخص واسنجی‌شده نشان می‌دهد.

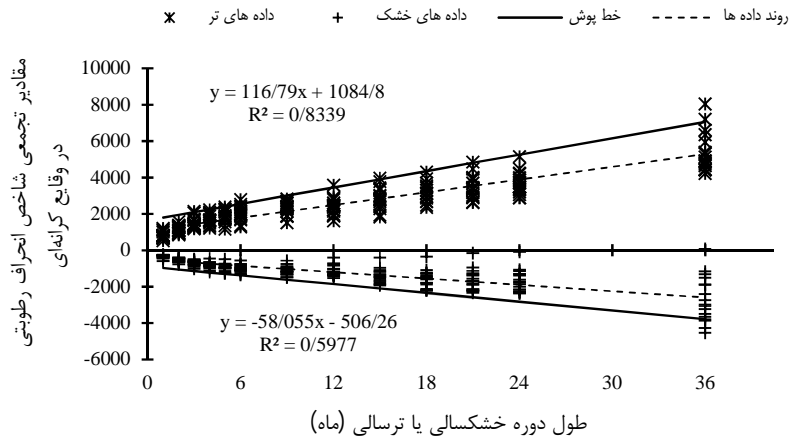
حوضه‌های مطالعاتی به دست آمد. سپس ضرایب مشخصه اقلیمی برای حوضه‌های مطالعاتی در شرایط تر و خشک و در ادامه مقدار شاخص انحراف رطوبتی ( $Z_i$ ) حاصل شد. برای استخراج معادله‌های شدت، مقدار تجمعی شاخص انحراف رطوبتی در مقاطع زمانی یک تا ۴۸ ماه مربوط به حوضه‌های مطالعاتی ایران محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت و با برازش بهترین خط (خطی با بیشترین شیب و اینکه غالب داده‌ها را دربر گیرد)، این معادله‌ها به تفکیک برای شرایط تر و خشک به دست آمده است (شکل ۳). در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که مقدار تجمعی شاخص انحراف رطوبتی ( $VW_{i-1}$ ) در رویدادهای کرانه‌ای در شرایط تر و خشک دارای  $r$  (ضریب همبستگی) بالایی است که نشان می‌دهد نتایج قابل اعتمادی می‌تواند حاصل شود. اما  $r$  در شرایط تر (۰/۹۱۳۲) نسبت به خشک (۰/۷۷۳۱) دارای مقدار بیشتری است و می‌توان چنین استنباط کرد که ضریب مشخصه اقلیمی در حالت تر، مقادیری با دامنه بزرگ‌تر و پراکندگی کمتر، از شاخص انحراف رطوبتی نهایی حاصل کرده است. در تشریح این که پراکندگی داده‌ها در شرایط خشک بیشتر از شرایط تر است، می‌توان گفت که ضریب مشخصه در ماه‌های خشک نوسانات بیشتری را نسبت به ماه‌های تر داشته و مراحل دیگر هم این تأثیر را به صورت تدریجی بسیار بیشتر کرده است. پراکندگی ارقام در حالت خشک بیشتر و بزرگی ارقام در این حالت کمتر از تر است.

با توجه به واسنجی‌های انجام‌شده، معادله‌های نهایی شدت برای شرایط تر و خشک در ایران به صورت زیر بومی‌سازی شد:

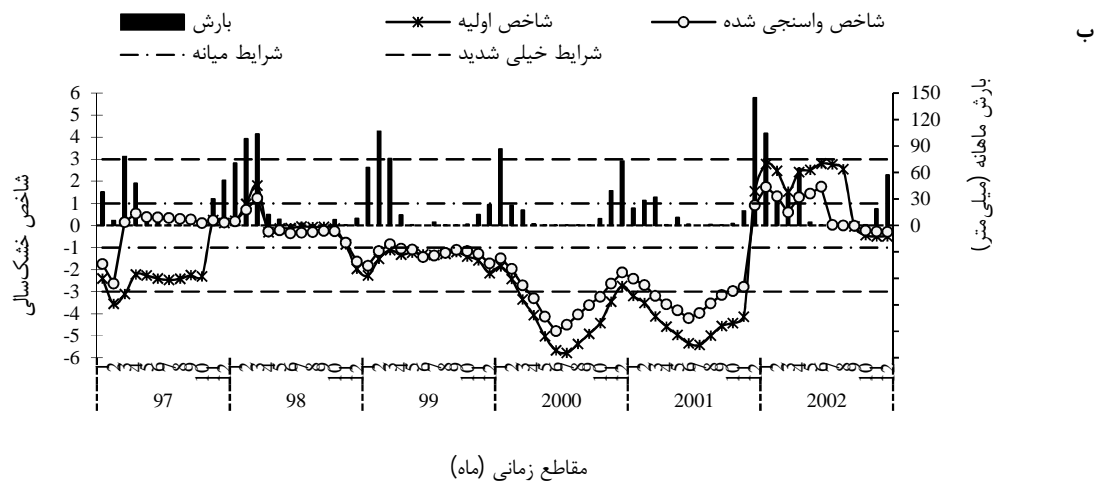
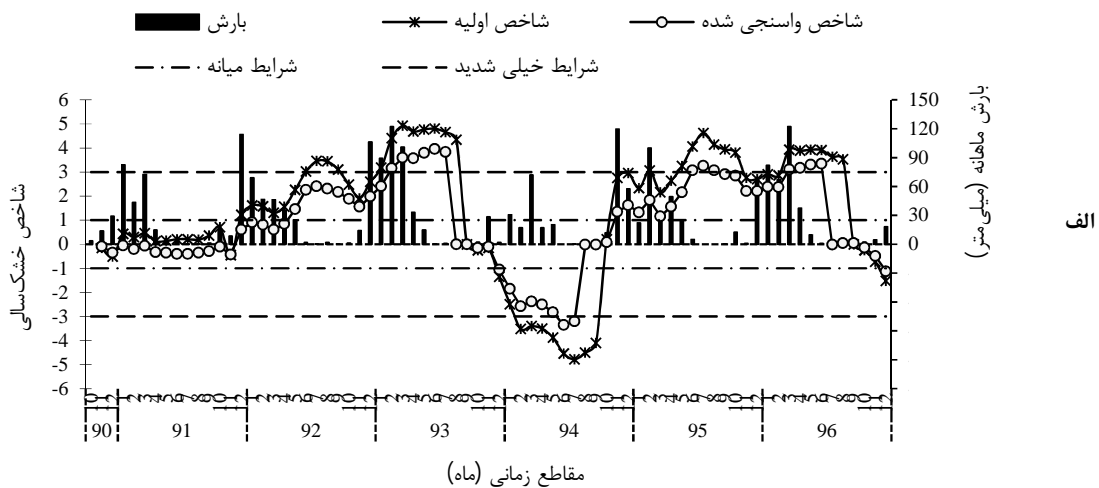
$$(۴) \quad \text{شرایب تر} \quad X1_i = 0.946X_{i-1} + 0.002Z_i$$

$$(۵) \quad \text{شرایب خشک} \quad X2_i = 0.892X_{i-1} + 0.002Z_i$$

در این معادلات ملاحظه می‌شود که سهم تأثیر شاخص انحراف رطوبتی در مقدار شاخص در ماه مورد نظر بسیار کم است (۰/۰۰۲) و عمده مقدار شاخص مربوط به مقطع قبلی است. این ویژگی شاخص پالمر است که حافظه پویا دارد و با در نظر گرفتن شرایط مقاطع پیشین، به مقداری مشخص برای شاخص در ماه مورد نظر می‌رسد، بعد از استخراج معادله‌های شدت، شاخص خشک‌سالی محاسبه و مراحل رده‌بندی صورت پذیرفت. در مطالعات دیگری چون سلطانی تودشکی و همکاران (۲۰۰۸)، معادله‌های شدت برای خشک‌سالی ضرایب ۰/۷۵ و ۰/۰۶ و برای ترسالی



شکل ۴- وقایع کرانه‌ای و خطوط پوش برای استخراج معادله‌های نهایی شدت: حوضه‌های مطالعاتی، در روش پالم‌ر واسنجی شده



شکل ۵- الف و ب- نتایج رده‌بندی شاخص پالم‌ر در روش پالم‌ر اولیه و واسنجی شده؛ حوضه ۲۳۴-۴ (۱۹۹۰-۲۰۰۲)

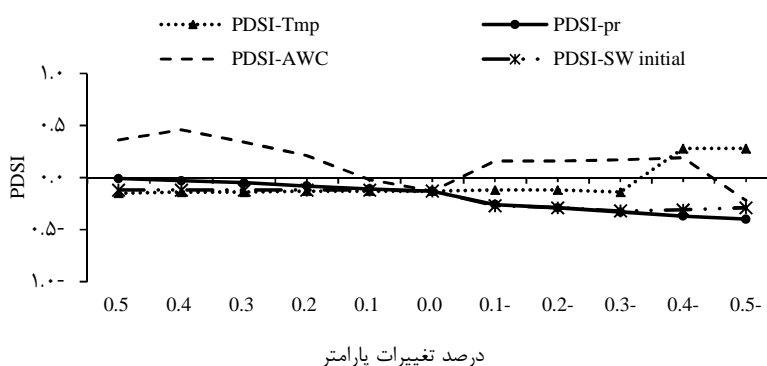
### بررسی حساسیت مدل

دمای ماهانه، رطوبت خاک و TWC) انجام شده و بدین طریق میزان تغییرات آن‌ها در مقدار شاخص PDSI به دست آمده است (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که

در این پژوهش تحلیل حساسیت مدل از صفر تا ۵۰ درصد افزایش و در مقدار پارامترهای ورودی اصلی (بارش و

شد نتایج بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت ارائه می‌کند. همچنین شاخص، نسبت به پارامتر دما، تنها در مقدار ۴۰ درصد آن حساسیت نشان می‌دهد و به خاطر این است که مدل تورنت وایت در دماهای خیلی کم، تبخیرتغرق پتانسیل را نزدیک به صفر برآورد می‌کند.

شاخص پالم به مقدار TWC حساسیت زیادی دارد و یکی از دلایلی که در این مطالعه این پارامتر (برخلاف فرضیات پالم با فرض ۸ اینچ برای کل لایه خاک) از مدل SWAT استفاده شد نیز به این موضوع مربوط می‌شود که در کشور ایران شرایط خاک‌های موجود در مناطق مختلف یکسان نیست و از این‌رو در صورتی که مقدار واقعی TWC برآورد



شکل ۵- تحلیل حساسیت شاخص بر اساس درصد تغییرات پارامترهای ورودی اصلی

و سال‌ها، وضعیت خشک‌سالی و ترسالی را با شدت خیلی بیشتر نسبت به حالت واقعی برآورد کرده است و با توجه به این‌که این شاخص در برنامه‌های مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهتر است بر اساس وضعیت موجود منطقه واسنجی و محاسبه شود که واسنجی شاخص در این پژوهش نیز به نتایج خوبی منتهی شده است. در ادامه پیشنهاداتی ارائه می‌شود: نتایج کلی این پژوهش زمینه‌ای را برای ارزیابی خشک‌سالی در مناطق اقلیمی مختلف فراهم می‌کند. با استفاده از این مطالعه، بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب و خشک‌سالی با استفاده از شاخص پالم واسنجی شده در ایران، امکان‌پذیر است. برای استفاده از هفده زیرحوضه هیدرولوژیکی جهت استخراج ضرایب مشخصه اقلیمی و معادله‌های شدت ترسالی و خشک‌سالی، پیشنهاد می‌شود که با تعداد سی و یا بیشتر کار انجام شود تا تحلیل وقایع خشک‌سالی و ترسالی با دقت بهتری صورت گیرد. با توجه به فرضیه‌های ساده پالم در محاسبه عوامل بیلان، برای مثال فرض دو لایه‌ای بودن خاک و در نظر گرفتن یک اینچ برای لایه سطحی و هفت اینچ برای لایه تحتانی خاک و همچنین در نظر نگرفتن میزان فرونشست (Deep Percolation, DP) برای بیلان آبی پیشنهاد می‌شود سایر عوامل مربوط به چرخه هیدرولوژیکی و بیلان آبی در نظر گرفته شوند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای واسنجی شاخص خشک‌سالی پالم در ایران، ابتدا حوضه‌های هیدرولوژیکی سی‌گانه کشور به هفده حوضه بزرگ‌تر تبدیل و سپس با میانگین وزنی از داده‌های موجود برای ۵۰۶ زیرحوضه ایران (خروجی از مدل SWAT)، متغیرهای هفده حوضه مطالعاتی به دست آمد. با استفاده از داده‌های مختلف، ضرایب معادله‌های شاخص پالم در سطح کل ایران که به هفده حوضه مطالعاتی تبدیل شده بود، واسنجی شد. با استفاده از معادلات تعمیم یافته شاخص پالم، معادله‌های نهایی شدت برای خشک‌سالی و ترسالی به ترتیب با ضرایب دوگانه (۰/۸۹۲، ۰/۰۰۲) و (۰/۹۴۶، ۰/۰۰۲) به دست آمد. همچنین نتایج کلی این پژوهش نشان داد در غالب حوضه‌های مطالعاتی کشور، سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ خشک‌ترین و سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ مرطوب‌ترین سال‌های دوره آماری (۱۹۹۰-۲۰۰۲) بودند که این نتایج منطبق با نتایج حاصل از تحلیل شرایط بارشی این حوضه‌ها در سال‌های مورد نظر بوده است و نشان می‌دهد واسنجی شاخص پالم برای هر منطقه می‌تواند انجام شود و نتایج قابل اطمینانی را حاصل کند. نتایج مقایسه شدت خشک‌سالی و ترسالی در دو شاخص واسنجی شده و شاخص اولیه نشان داد که شاخص اولیه در غالب حوضه‌ها



شدت خشکسالی پالم. فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۲: ۹۷-۱۱۰.

۹. گل محمدی م. و مساح بوانی ع. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر اقلیم. نشریه آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی. ۲۵(۲): ۳۱۵-۳۲۶.

علاوه بر ظرفیت آب قابل دسترس، سایر خروجی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی مانند رواناب، رطوبت کل خاک در تمامی مقاطع بازه زمانی، تبخیر- تعرق پتانسیل نیز مورد استفاده قرار بگیرند و خروجی‌های آن‌ها با مدل بیلان آبی مورد استفاده در روش پالمر مقایسه و بهترین مدل برای مرتبط‌شدن با شاخص پالمر انتخاب شود.

## منابع

10. (ACSD). Africa Review Report on Drought and Desertification. 2007. Fifth Meeting of The Africa Committee on Sustainable Development (ACSD-5).
11. Aiguo D. Kevin E. and Trenberth T. Q. 2004. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*. 5: 1117-1130.
12. Akan A. O. 2006. *Open Channel Hydraulics*. Chapter 8: Introduction to Unsteady Open-Channel Flow. Elsevier. 364 p.
13. Akinremi O. O. McGinn S. M. and Barr A. G. 1996. Evaluation of the Palmer drought index on the Canadian prairies. *Journal of Climate*. 9: 897-905.
14. Bhalme H. N. and Mooley D. A. 1980. Large scale droughts / floods and monsoon circulation. *Journal of Meteorological Society*. Monthly Weather Review. 108: 1197-1211.
15. Bogardi I. Matyasovszky I. Bardossy A. and Duckstein L. 1994. A hydroclimatical model of real drought. *Journal of Hydrology*. 153: 245-264.
16. Faramarzi M. Abbaspour K. C. Schulin R. and Yang H. 2009. Modeling blue and green water resources availability in Iran. *Hydro Processes*. 23: 486-501.
17. Gupta A. S. Jain S. and Kim J. S. 2011. Past climate, future perspective: An exploratory analysis using climate proxies and drought risk assessment to inform water resources management and policy in Maine. USA, *Journal of Environmental Management*. 92: 941-947.
18. Karamouz M. Torabi S. and Araghinejad S. 2004. Analysis of hydrologic and agricultural droughts in central part of Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*. 9(5): 402-414.
19. Mo K. C. and Chelliah M. 2006. The modified Palmer Drought Severity Index based on the NCEP North America regional reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 45: 1362-1375.
20. Palmer W. C. 1965. *Meteorological Drought*. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper, 45, 58p.
۱. آزادی س. ۱۳۹۲. ارزیابی شاخص خشکسالی پالمر در حوضه‌های ایران مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۲۳۸ ص.
۲. آسیایی م. ۱۳۸۵. شاخص‌های خشکسالی. چاپ اول، انتشارات سخن گستر، مشهد. ۱۷۶ ص.
۳. پورحسین س. ۱۳۹۰. بررسی اثر اقلیم، رژیم بارش و طول دوره شاخص خشکسالی پالم و مولی در ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۵۳ ص.
۴. سلطانی تودشکی ع. ۱۳۸۶. کمی‌سازی خشکسالی با رویکرد هوا-آب‌شناختی؛ مبانی نظری و کاربرد. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. ۲۷۳ ص.
۵. شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۸۳. دستورالعمل و ضوابط تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی در سطح کشور. وزارت نیرو. شماره ۲۸۲. ۱۷۸ ص.
۶. صالح‌نیا ن. موسوی بیگی م. و انصاری ح. ۱۳۹۲. پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از نمایه PDSI به کمک مدل‌های LARS-WG و HadCM3 (مطالعه موردی: حوضه نیشابور). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*. ۷: ۹۳-۱۰۳.
۷. فرج‌زاده م. موحد دانش ع. ا. و قائمی ه. ۱۳۷۴. خشکسالی در ایران (با استفاده از برخی شاخص‌های آماری). *مجله دانش کشاورزی*. دانشگاه تبریز. ۵(۱ و ۲): ۳۱-۵۳.
۸. کشاورز م. ر. وظیفه‌دوست م. فتاحی ا. و بهیار م. ب. ۱۳۹۱. الگوی توزیعی جهت و شدت روند تغییرات خشکسالی ایران به کمک نمایه توزیعی

21. Rind D. Goldberg R. Hansen J. Rosenzweig C. and Ruedy R. 1990. Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. *Journal of Geophysical Research*. 95: 83-99.
22. Shahabfar A. Ghulam A. and Eitzinger j. 2012. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 18: 119-127.
23. Soltani Tudeshki A. R. Sichani S. A. Nazemossadat S. M. J. Karamouz M. and Javanmard S. 2008. The scaling technique in Palmer drought severity index; Generalized calibration and modification. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 11(5): 702-710.
24. Wells N. Goddard S. and Hayes M. J. 2004. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*. 2335-2351.