

ارزیابی شاخص خشکسالی پالم در حوزه‌های ایران مرکزی

سارا آزادی^{۱*}، سعید سلطانی^۱، منیره فرامرزی^۱، علی رضا سلطانی تودشکی^۲ و سعید پورمنافی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۲)

چکیده

شاخص شدت خشکسالی پالم که متغیرهای مختلف آب و هواشناسی را برای یک موازنه آبی ساده در خاک تحلیل می‌کند و شرایط خشکسالی یا ترسالی را به صورت پدیده‌ای پویا در نظر می‌گیرد، در بسیاری از نقاط جهان جهت بررسی شرایط خشکسالی و تداوم آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که واسنجی شاخص براساس شرایط منطقه مورد مطالعه می‌تواند منجر به ارائه نتایج بهتر و دقیق‌تری گردد، هدف این تحقیق، ارزیابی شاخص پالم براساس فرضیات اولیه، وضعیت واسنجی شده در حوزه‌های ایران مرکزی و همچنین استفاده از خروجی‌های واسنجی - صحت‌سنجی شده مدل SWAT به عنوان ورودی شاخص می‌باشد. لذا شاخص پالم براساس روش‌های: (۱) شاخص اولیه پالم بدون واسنجی، با استفاده از ضرائب اقلیمی و معادله شدت استخراجی برای کانزاس غربی و آیوای مرکزی؛ (۲) شاخص اولیه همراه با اصلاح ضرائب معادله‌های شدت خشکسالی؛ (۳) شاخص واسنجی شده با بومی‌سازی معادلات شدت؛ (۴) شاخص با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک و تبخیر تعرق پتانسیل از مدل SWAT؛ و (۵) شاخص با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک، تبخیر تعرق پتانسیل و رواناب از مدل SWAT؛ در سطح کل ایران، در قالب ۱۷ حوزه مطالعاتی، در مقیاس ماهانه در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۹۰ محاسبه شد. سپس با استفاده از هر پنج روش، شدت خشکسالی برای ۱۶۰ زیرحوزه واقع در ایران مرکزی محاسبه و ارزیابی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که، در بین آنها روش ۴ نتایج مطمئن‌تری را ارائه می‌کند همچنین این روش‌ها مرطوب‌ترین سال (۱۹۹۲) و خشک‌ترین سال (۲۰۰۱) را به خوبی مشخص نمودند. نتایج این پژوهش، مطالعه واسنجی شاخص پالم را برای هر منطقه و با استفاده از خروجی سایر مدل‌های هیدرولوژیکی امکان‌پذیر می‌سازد.

واژگان کلیدی: شاخص پالم، خشکسالی، واسنجی، مدل SWAT، ایران مرکزی

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azadiyas@yahoo.com

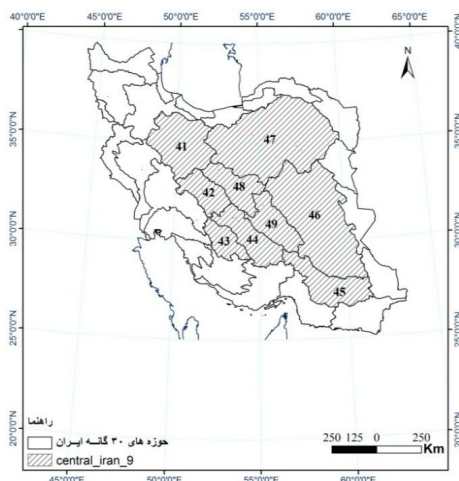
مقدمه

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی در مناطق مختلف اقلیمی به وقوع می پیوندد (۲۲). به منظور شناسائی شدت و گسترش این پدیده عموماً شاخص‌هایی توسعه داده شده است که هر کدام ورودی‌ها و شرایط استفاده خاص خود را دارا می‌باشند. با توجه به در دسترس بودن اطلاعات اقلیمی، بسیاری از این شاخص‌ها متغیرهای هواشناسی (عموماً بارش) را به عنوان ورودی در نظر می‌گیرند، مانند شاخص بارش استاندارد شده Standardized Precipitation Index (SPI) (۱۳)، شاخص دهک‌های بارندگی Deciles of Precipitation Index (DPI)، شاخص درصد از نرمال Percent of Normal (PN)، اما شاخصی که متغیرهای مختلف آب و هواشناسی (بارش، تبخیر، تعرق، پتانسیل، رطوبت پیشین خاک و رواناب) را برای یک موازنه آبی ساده در خاک تحلیل می‌کند و شرایط خشکسالی یا ترسالی را به صورت پدیده‌ای پویا در نظر می‌گیرد شاخص شدت خشکسالی پالمر Palmer Drought Severity Index می‌باشد (۲۵). مطالعات گسترده‌ای در رابطه با شاخص پالمر در مناطق مختلف جهان مانند: کوتاوالا (۲۰) در سراسر استرالیا، کیم و همکاران (۱۹) در حوزه رودخانه کنچوس در مکزیک، دای و همکاران (۱۳) برای مناطق مختلف جهان، ایستوان و همکاران (۱۶) در غرب هانگاری، کارنایوسکاز و همکاران (۱۸) در آمریکای شمالی، لمپروس و آتاناسیوس (۲۱) در گریس، بینینگ و همکاران (۲۸) در سراسر جهان، سومارو و همکاران (۲۶) در هند، آسیایی (۲) در مشهد، انصاری و همکاران (۳) در استان خراسان، مقدم‌نیا و همکاران (۷) در بیرجند و شفیعی و همکاران (۶) نیز در مشهد؛ صورت گرفته است که در اکثر آنها عملکرد شاخص تا حدودی رضایت‌بخش بوده است.

از طرفی بونسال و همکاران (۱۲) مطرح نمودند که هر کدام از شاخص‌ها معایب و مزایای خود را دارند، اما نقص عمده‌ای که در این شاخص‌ها وجود دارد این است که در یک فاکتور قوی هستند و سایر جوانب خشکسالی را در نظر نمی‌گیرند،

مطالعات پیشین با محاسبه شاخص‌های مختلف به ارزیابی خشکسالی پرداخته‌اند درحالی‌که باید به این نکته توجه داشت که بیشتر این مطالعات به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی، قادر به ارزیابی صحیح وضعیت خشکسالی‌ها نبوده‌اند، از سوی دیگر، این شاخص‌ها تنها براساس یکسری فرضیات اولیه و داده‌های خود محاسبه شده‌اند که در یک منطقه خاص ممکن است نتایج متفاوتی را نشان دهند. اگر خصوصیات و شرایط فیزیکی یک منطقه وارد محاسبات شاخص شود می‌تواند باعث ارائه نقشه‌هایی با دقت بسیار بهتری شود، از اینرو با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و فیزیکی و مرتبط نمودن آنها با شاخص‌ها، حساسیت لازم در کار لحاظ می‌شود و این خلأ علمی تا حدودی رفع می‌گردد؛ همچنین در صورت بومی‌سازی روابط و ضرائب شاخص‌ها برای منطقه مطالعاتی مورد نظر، نتایج به دست آمده با درجه اطمینان بالایی می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های سیاسی مورد استفاده قرار گیرد. با بررسی منابع مطالعاتی صورت گرفته مشخص گردید که واسنجی شاخص پالمر و یا مرتبط ساختن آن با مدل‌هایی که اساس فیزیکی دارند، نتایج موفق‌تری را ارائه می‌کند؛ بالم و مولی (۱۰) در هند، بگاردی و همکاران (۱۱) در نبراسکا و آمریکای شمالی، آکینرمی و همکاران (۹) در کانادا، مو و چلیا (۲۳) در ایالات متحده، سلطانی تودشکی (۲۷) در حوزه مهارلوی فارس و کارآموز و همکاران (۱۷) در اصفهان، شاخص را مورد واسنجی قرار دادند و نتایج خوبی را گزارش نمودند. دنگوآ و همکاران (۱۴) برای حوزه رودخانه لانه در شمال چین شاخص پالمر را با مدل هیدرولوژیکی Soil and Water Assessment Tool (SWAT) مرتبط ساختند و نتایج رضایت‌بخشی را به دست آوردند.

از آنجایی‌که شاخص شدت خشکسالی پالمر در بسیاری از نقاط جهان جهت بررسی شرایط خشکسالی و تداوم آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به این‌که واسنجی شاخص براساس شرایط منطقه مورد مطالعه و یا مرتبط ساختن آن با مدل‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی، می‌تواند منجر به ارائه نتایج



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و حوزه‌های آن در ایران

حوزه اندک بوده و متوسط سالیانه آن کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و اغلب ۵۰ میلی‌متر و در مواردی حتی به ۲۵ میلی‌متر در سال می‌رسد. بالعکس تبخیر سالیانه در این حوزه بالا بوده و در موارد زیادی به بیش از ۴۰۰۰ میلی‌متر در سال هم می‌رسد. به این ترتیب میزان تبخیر می‌تواند به بیش از ۴۰ تا ۸۰ برابر بارندگی سالیانه بالغ گردد (۸). در مورد تشکیلات زمین‌شناسی این حوزه فقط به این نکته اکتفا می‌گردد که در هر جایی از ایران مرکزی که رسوبات میوسن دیده شود، اغلب منابع آب و منابع خاک تحت نفوذ رسوبات تبخیری آن قرار دارند، یعنی به نحوی آلوده به املاح گچ و نمک می‌باشند (۸). از نظر تقسیمات زیرحوزه‌ای ایران مرکزی می‌توان به حوزه‌های آبخیز زیر اشاره کرد: حوزه آبخیز دریاچه نمک قم (کد ۴۱)، حوزه آبخیز باتلاق گاوخونی (کد ۴۲)، حوزه آبخیز طشک-نیریز یا بختگان-مهارلو (کد ۴۳)، حوزه آبخیز ابرقو-سیرجان (کد ۴۴)، حوزه آبخیز هامون-جازموریان (کد ۴۵)، حوزه آبخیز کویر لوت (کد ۴۶)، حوزه آبخیز کویر مرکزی (کد ۴۷)، حوزه آبخیز کویر سیاه‌کوه (کد ۴۸)، حوزه آبخیز کویر در انجیر (کد ۴۹)، که در شکل ۱ آمده است.

شاخص شدت خشکسالی پالم

شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) توسط پالم (۲۵) برای سنجش میزان نوسانات ذخیره رطوبتی خاک در آمریکا

بهتر و دقیق‌تری گردد، هدف از این مطالعه ارزیابی، مقایسه و اعتبارسنجی شاخص شدت خشکسالی پالم براساس فرضیات اولیه مدل پالم و ضرایب معادله در آمریکا، براساس فرضیات پالم و واسنجی ضرایب بر مبنای شرایط حوزه‌های ایران مرکزی و نیز براساس پارامترهای ورودی شاخص پالم که از نتایج واسنجی و صحت‌سنجی شده مدل SWAT (۱۵) استخراج شده است، می‌باشد. همچنین در این تحقیق سعی در مقایسه نتایج خروجی شاخص پالم براساس پارامترهای ورودی محاسبه شده بر پایه فرضیات پالم و مقادیر واقعی پارامترها که از مدل SWAT حاصل گردیده، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران مرکزی: حوزه ایران مرکزی محدوده اقلیمی مربوط به دشت‌های خشک تا کویری فلات مرکزی ایران را شامل می‌شود، که مهم‌ترین آنها دشت‌های پهناور کویری چون دشت لوت و دشت کویر می‌باشد که دارای دمای هوای متنوع از ۱۵ درجه سانتی‌گراد زیر صفر تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد بالای صفر می‌باشد. متوسط رطوبت نسبی این دشت‌ها ۳۰ تا ۴۰ درصد است، اما در دوره‌های گرم سال ۱۵ درصد و در موارد استثنایی می‌تواند تا ۱۰ درصد و کمتر برسد. نزولات جوی این

ضرائب ۸۹۷/۰ و ۳۳۳/۰ نیز مدت زمان استمرار و دوام یک واقعه خشکسالی یا ترسالی را تبیین می‌نمایند. ۳- تعریف یک عامل با مفهوم احتمالاتی برای خاتمه هر واقعه، ۴- محاسبه شاخص‌های واسطه، ۵- پیمایش معکوس و تعیین شدت و مدت وقایع.

مدل هیدرولوژیکی SWAT

SWAT مخفف ابزار ارزیابی آب و خاک با در نظر گرفتن اندرکنش میان آب، خاک، گیاه و اتمسفر در مقیاس حوزه آبخیز توسعه یافته است، هدف از طراحی این مدل پیش‌بینی و بررسی تأثیر اقدامات مدیریتی، تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی، رطوبت خاک، تولید و انتقال رسوب، کیفیت آب و رشد گیاه در حوزه‌های پیچیده و بزرگ است. در این مدل روابط فیزیکی دخیل در سیستم آب- خاک- گیاه به صورت پیوسته در گام‌های زمانی روزانه و در بازه زمانی طولانی شبیه‌سازی می‌شود. نقشه‌های پایه مورد نیاز شامل نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشند که هر سه باید در قالب رستری به مدل ارائه شوند. چرخه هیدرولوژیکی که در مدل شبیه‌سازی می‌شود، براساس معادله بیلان آب یک حوزه استوار است (رابطه ۴).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad [3]$$

که SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر آب)، SW_0 مقدار اولیه رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر آب)، t زمان (روز)، R_{day} مقدار بارش در روز t ام (برحسب میلی‌متر آب)، Q_{surf} مقدار رواناب در روز t ام (برحسب میلی‌متر آب)، W_{seep} مقدار تبخیر و تعرق روزانه، W_{seep} مقدار نشت که در روز t ام از نیمرخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود (برحسب میلی‌متر آب) و Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز t ام (برحسب میلی‌متر آب) می‌باشد (۲۴).

توسعه یافته و به‌طور گسترده در سایر کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفت، اساس آن معادله موازنه آب خاک می‌باشد. به‌دلیل پیچیده و طولانی بودن روش، به‌صورت خلاصه مراحل آن ارائه می‌گردد. روند محاسباتی این شاخص را می‌توان در سه بخش اصلی بررسی نمود (۵): الف- بیلان آبی و تخمین انحراف رطوبتی یک منطقه، ب- مقیاس‌بندی و پ- رده‌بندی شاخص:

الف. در قسمت اول، مشابه بسیاری از شاخص‌ها، انحراف رطوبتی اقلیم مورد نظر (d) در هر دوره (i)، به‌دست می‌آید (رابطه ۱). در این قسمت مقادیر بارش واقعی (Pr) با مقدار بارش مورد انتظار منطقه یا بارش مقتضی شرایط عادی آن اقلیم Climatically Appropriate For Existing Conditions (CAFE) (Precipitation) (Pr_c) برای هر مقطع زمانی مقایسه شده و میزان انحراف از رطوبت معیار یا انحراف رطوبتی Moisture Departure (d) مشخص می‌گردد (۴).

$$D_i = Pr_i - Pr_{ci} \quad [1]$$

ب. در قسمت دوم، مقادیر انحراف رطوبتی با استفاده از یک ضریب مشخصه اقلیمی، K ، بی‌بعد می‌شوند، بگونه‌ای که نسبت به مکان و زمان خاص وابسته نباشند (رابطه ۲).

$$Z_i = d_i \times K_i \quad [2]$$

پ. در قسمت سوم، جهت تحلیل شدت وقایع و تعیین آغاز و پایان آنها، مقادیر انحراف رطوبتی به قالب رده‌بندی شده تبدیل می‌گردد

این قسمت را در پنج گام محاسباتی می‌توان بررسی نمود:

۱. تعیین قالب و مقیاس رده‌بندی (تعریف آستانه شدت‌های مختلف خشکسالی یا ترسالی)، ۲- برآورد عوامل دوام دوره و استخراج معادله شدت (رابطه ۳، معادله پالمر برای کائزاس غربی و آیوای مرکزی می‌باشد)،

$$X_i = 0.00004271 X_i^{1.5} Z_i \quad [3]$$

طبق رابطه ۳، شاخص شدت خشکسالی پالمر (X) در مقطع زمانی t ، ترکیبی از سهم مشارکت انحراف رطوبتی هر مقطع (Z_i) و شدت خشکسالی یک دوره ماقبل (X_{i-1}) می‌باشد (۴)،

جدول ۱. مقایسه روش‌های مختلف مورد بررسی برای محاسبه شاخص خشکسالی پالم

روش های مختلف محاسبه شدت خشکسالی پالمر					متغیرهای مورد نیاز			۹
PIs2	PIs1	PIcalb	PIeq	PIo				۱
۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۱	۱	AWCs	ظرفیت لایه سطحی	اطلاعات خاک	برآورد انحراف رطوبتی
SWAT	SWAT	SWAT	۷	۷	AWCu	ظرفیت لایه زیرسطحی		
SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SW0	رطوبت اولین مقطع		
SWAT	SWAT	بیان آبی			SW	رطوبت ماهانه همه مقاطع (سری زمانی)		
SWAT					RE	واقعی	عوامل بیان	
					RO			
SWAT					ET			
					L			
SWAT					ETp	بالتقوه		
					REp			
					ROp			
					Lp			
نسبت عوامل واقعی به پتانسیل (متوسط بلندمدت)					α	ضرایب ۴ گانه		
					β			
					γ			
					δ			
					$\hat{p}_i$	بارش مقتضی شرایط موجود		
					di	انحراف رطوبتی		
					ki	تقریب اولیه ی ضریب مشخصه ی اقلیمی		
					zi	شاخص انحراف رطوبتی اولیه		
					$\frac{\overline{Dw_i}}{\overline{Dd_i}}$		میانگین مقادیر انحراف رطوبتی مثبت	
							میانگین قدرمطلق مقادیر انحراف رطوبتی منفی	
بهترین برازش					I_w	ضرایب برازش معادله مشخصه اقلیمی		
					I_d			
					q_w			
					q_d			
					m_w			
					m_d			
واسنجی منطقه ای					۰/۸۹۷	تر		
					۰/۳۳۳			
					۰			
					۰/۸۹۷			
واسنجی منطقه ای					۰/۳۳۳	خشک		
					۰			
					p			
					q			
					r	ضرایب معادله ی شدت		
					p			
					q			
					r			

محاسبه شاخص

جهت محاسبه شاخص در حوزه‌های مرکزی ایران، از اطلاعات (دما، بارش، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق پتانسیل، رطوبت خاک، ظرفیت رطوبت قابل دسترس خاک (AWC)؛ مساحت و عرض جغرافیایی) مربوط به ۵۰۶ زیرحوزه هیدرولوژیکی ایران حاصل از مدل (۱۵)، در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۹۰ استفاده شد. بدین ترتیب که ۳۰ حوزه آبخیز ایران به علت پیچیده شدن کار به ۱۷ حوزه تقسیم گردیده (کدهای: ۱-۱، ۱-۳، ۱-۲۴۵، ۱-۶۷، ۱-۱۲، ۲-۳۴۵، ۲-۶۷، ۲-۸۹، ۳، ۴-۱، ۴-۲۳۴، ۴-۵۶، ۴-۷، ۴-۸۹، ۵-۱۲، ۵-۳ و ۶؛ به عنوان مثال کد ۴-۲۳۴ به این معنی است که حوزه‌های فرعی (۲، ۳ و ۴) مربوط به حوزه ۴ با هم ترکیب شده‌اند) و برای محاسبه ضرائب اقلیمی و تعیین معادله‌های نهایی شدت خشکسالی، از میانگین وزنی این اطلاعات برای ۱۷ حوزه کشور استفاده و نهایتاً شاخص خشکسالی پالمر طبق ۵ روش محاسبه شده است:

۱. روش (۱) شاخص اولیه پالمر بدون واسنجی، (Pio): محاسبه شاخص براساس تمامی فرضیات اولیه آن و با استفاده از ضرائب و معادله‌های شدت به دست آمده اولیه (برای کانزاس غربی و آیوای مرکزی).

۲. روش (۲) شاخص با اصلاح ضرائب، (Pieq): محاسبه شاخص اولیه همراه با استخراج معادله‌های شدت خشکسالی.

۳. روش (۳) شاخص واسنجی شده، (Picalb): محاسبه شاخص با بومی سازی معادلات شدت (رطوبت و ظرفیت خاک حوزه‌ها از مدل SWAT). در دو روش بعدی، با توجه به «فرضیات» ساده شده شاخص پالمر، از داده‌های واسنجی و صحت سنجی شده مدل هیدرولوژیکی SWAT جهت جایگزینی برخی از عوامل بیلان آبی، استفاده شده است. تفاوت در روش‌های ۴ و ۵ در تعداد داده‌های انتخابی از مدل می‌باشد. بدیهی است در این روش‌ها، ضرائب اقلیمی و معادله‌های شدت واسنجی می‌شود:

۴. روش (۴) شاخص با مدل-۱، با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک و تبخیر-تعرق پتانسیل، (Pis1).

۵. روش (۵) شاخص با مدل-۲، با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک، تبخیر-تعرق پتانسیل و رواناب، (Pis2).

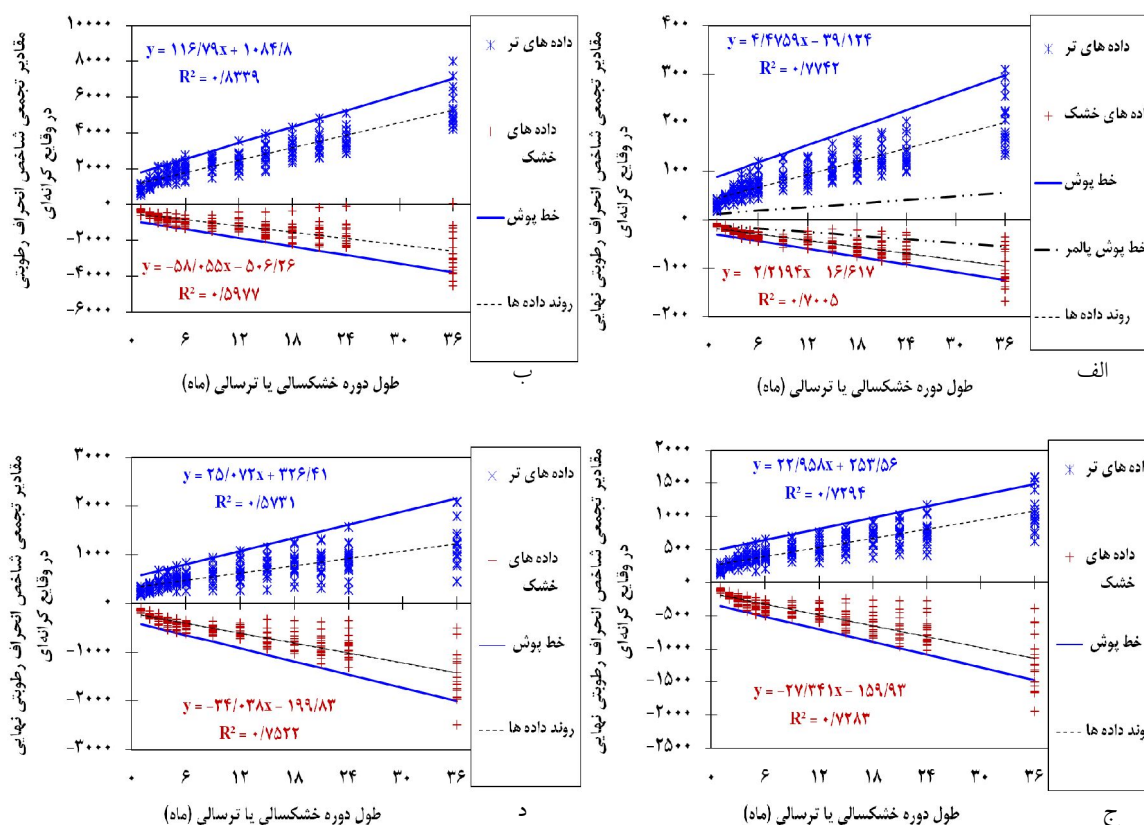
خلاصه مراحل کلی محاسبه متغیرهای مورد نیاز جهت ارزیابی شاخص پالمر در روش‌های مختلف ذکر شده، در جدول ۱ آورده شده است (داده‌ها در روش‌های ۱ و ۲ با واحد اینچ و در سایر روش‌ها با واحد میلی متر بکار برده شده‌اند (۱)). لازم است اشاره گردد که طبق دو شاخص SPI و PNPI مرطوب‌ترین (۱۹۹۲) و خشک‌ترین سال (۲۰۰۱) در دوره آماری مورد نظر مبنای مقایسه قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

با توجه به بالا بودن حجم محاسبات، نتایج نهایی استخراج معادلات شدت خشکسالی و رده‌بندی شاخص در روش‌های مختلف ارائه شده است. در برخی از قسمت‌ها به دلیل تشابه نتایج در حوزه‌های مختلف، به عنوان نمونه نتایج حوزه مطالعاتی ۴-۲۳۴ (حوزه‌های گاوخونی، مهارلو، ابرقو) ارائه گردیده است. پس از محاسبه شاخص انحراف رطوبتی، Z، به روش‌های پنج گانه تحقیق، مقادیر تجمعی آنها در ۱۷ حوزه مطالعاتی ترسیم و سپس خطپوش مناسب (خطی با بیشترین شیب و اینکه غالب داده‌ها را در بر گیرد) جهت استخراج معادله‌های شدت خشکسالی تعیین گردید (شکل ۲).

با توجه به نمودارهای شکل ۲ (الف تا د)، ملاحظه می‌گردد که پراکندگی ارقام تجمعی شاخص انحراف رطوبتی مناطق مطالعاتی، در روش‌های ۱، ۲ و ۳ در حالت خشک بیشتر از تر، در روش ۴ تقریباً یکسان برای تر و خشک، و در روش ۵ در حالت تر بیشتر از خشک است. با استفاده از شکل ۲ معادله‌های نهایی شدت در روش‌های مختلف و به تفکیک شرایط خشکسالی به دست آمده است (جدول ۲).

بر همین اساس، در مطالعات مختلف مانند بالم و مولی (۱۰) در هند، برای این ضرائب به ترتیب ارقام ۵۰۰/۵ و ۲۱/۰، بگاردی و همکاران (۱۱) در نبراسکا، ۴۵۲/۰ و ۳۴۴/۲ و در آمریکای شمالی ۵۴۸/۰ و ۳۴۵/۲، آکینرمی و همکاران (۹) در



شکل ۲. خطوط پوش جهت استخراج معادله‌های نهایی شدت در حوزه‌های مطالعاتی: الف) روش‌های ۱ و ۲، ب) ۳، ج) ۴ و د) ۵

و ۲ ملاحظه می‌شود. در ادامه نتایج رده‌بندی شاخص پالمر در روش‌های مختلف آورده می‌شود.

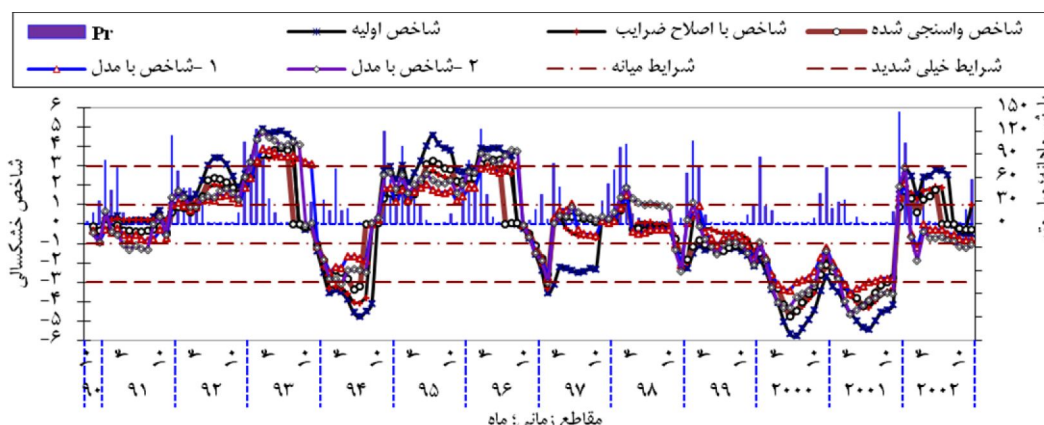
شکل ۳، وضعیت حوزه را در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ نشان می‌دهد. محور سمت راست نمودار مربوط به بارش ماهانه حوزه و محور سمت چپ مربوط به مقادیر شاخص در روش‌های مختلف می‌باشد. روند کلی ۵ روش مورد نظر نشان می‌دهد در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ شرایط طبیعی و سپس خشکسالی ملایمی رخ داده است بعد از آن در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ شرایط ترسالی دیده شده است همچنین سال ۱۹۹۳ مرطوب‌ترین بوده و بعد از آن شرایط به سمت خشکسالی روی آورده است و خشکسالی شدیدی در سال ۱۹۹۴ به وقوع پیوسته است. طبق نمودار ملاحظه می‌گردد که سال‌های ۱۹۹۵ و اوایل ۱۹۹۶ ترسالی بوده و در اواخر ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ شرایط خشکسالی وجود داشته است. در اوایل سال ۱۹۹۸ شرایط

کانادا، ۷۳۲/۰ و ۱۰/۰، مو و چلیا (۲۳) در ایالات متحده، مقادیری بین ۸۳/۰ تا ۹۴/۰، دنگوآ و همکاران (۱۴) برای حوزه رودخانه لانه در شمال چین مقادیر ۸۹/۰ و ۱۸/۰، سلطانی تودشکی (۲۷)، معادله‌های شدت برای خشکسالی ضرائب ۷۵ و ۰/۰۰۶ و برای ترسالی ضرائب ۶/۰ و ۰/۰۰۸ در منطقه مهارلوی فارس، کارآموز و همکاران (۱۷) در اصفهان، ۶۸/۰ و ۰/۰۰۶ گزارش نموده‌اند. از جدول ۲ چنین استنباط می‌گردد که به ترتیب در روش‌های ۱، ۲، ۴، ۵ و ۳ میزان سهم مشارکت انحراف رطوبتی نهایی ماه مورد نظر در تعیین شاخص خشکسالی پالمر همان ماه، کم می‌شود. بالاترین سهم مشارکت شاخص خشکسالی مقطع قبل در حالت ترسالی؛ در روش ۳ و سپس روش ۴ و در حالت خشکسالی؛ در روش‌های ۲ و ۴ دیده می‌شود. کمترین سهم شاخص ماه قبل در حالت خشکسالی؛ در روش ۱ و سپس ۳ و در حالت ترسالی؛ روش ۱

جدول ۲. ضرائب معادله‌های شدت ترسالی و خشکسالی در روش‌های مختلف برای ایران: ۱۹۹۰-۲۰۰۲

روش	دوران ترسالی		دوران خشکسالی	
	q	p	q	p
۱	۰/۸۹۷	۰/۳۳۳	۰/۸۹۷	۰/۳۳۳
۲	۰/۹۳۰	۰/۰۴۷	۰/۹۱۲	۰/۱۳۰
۳	۰/۹۴۶	۰/۰۰۲	۰/۸۹۲	۰/۰۰۲
۴	۰/۹۴۵	۰/۰۰۸	۰/۹۰۹	۰/۰۱۱
۵	۰/۹۲۲	۰/۰۰۷	۰/۸۹۴	۰/۰۰۹

* ضرائب p و q به ترتیب مدت زمان استمرار و دوام یک واقعه خشکسالی یا ترسالی را تبیین می‌نمایند و به همین جهت عوامل دوام دوره نامیده می‌شوند.



شکل ۳. نتایج رده‌بندی شاخص پالمر در روش‌های مختلف: حوزه ۲۳۴-۴

در روش‌های مختلف، درصد تطابق شدت‌های مختلف ترسالی، خشکسالی و شرایط طبیعی (۱۰ طبقه) در شاخص‌های به‌دست آمده با شاخص عمومی تر یعنی شاخص واسنجی‌شده (روش ۳، Picalb) محاسبه گردید (جدول ۳). دلیل انتخاب شاخص واسنجی‌شده به‌عنوان مبنای مقایسه، این است که این شاخص حالت تعمیم‌یافته‌ای از شاخص پالمر برای شرایط ایران می‌باشد؛ تماماً براساس فرضیات پالمر، اما با داده‌های دما، بارش و رطوبت خاک متفاوت با منطقه مطالعاتی پالمر (کانزاس غربی و آیوای مرکزی) محاسبه شده است. طبق جدول ۳، ملاحظه می‌گردد که تقریباً در حالت‌های مختلف ترسالی، خشکسالی روش ۲ به‌صورت مشابه با روش مبنا عمل نموده است. تنها در حالت‌های خشکسالی ملایم و میانه شاخص محاسبه شده با

ترسالی و بعد از آن تا اوایل ۲۰۰۲، خشکسالی بر منطقه حاکم بوده است. به‌طوری‌که شدیدترین خشکسالی در ۲۰۰۲-۱۹۹۰ مربوط به ۲۰۰۰ و بعد از آن ۲۰۰۱ است. طبق شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که در سال ۱۹۹۷، شاخص اولیه (روش ۱) با سایر شاخص‌ها در نشان‌دادن وضعیت تفاوت زیادی دارد به‌طوری‌که این شاخص، شرایط را در حد خشکسالی میانه (متوسط) و شاخص‌های مدل-۱ (روش ۴) و با اصلاح ضرائب (روش ۲)، شرایط طبیعی تا خشکسالی خفیف و در حال توسعه و شاخص‌های واسنجی‌شده (روش ۳) و مدل-۲ (روش ۵) شرایط ترسالی در حال توسعه تا طبیعی (عادی) را ارائه می‌کنند.

جهت بررسی و نتیجه‌گیری بهتر در مورد عملکرد شاخص

جدول ۳. خلاصه تطبیق شناسایی شدت مقاطع در روش‌های مختلف، حوزه ۲۳۴-۴

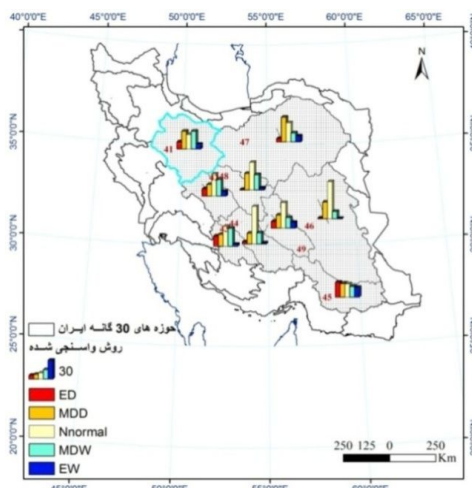
روش‌های مختلف محاسبه شاخص خشکسالی پالمر									
۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
Plo	PIeq	PIcalb	PIs1	PIs2	Plo	PIeq	PIcalb	PIs1	PIs2
ترسالی فوق العاده شدید (Xwex)					خشکسالی فوق العاده شدید (Xdex)				
۰	۰	۰	۰	۰	۵	۵	۵	۰	۳
۰٪	۰٪	۰٪	۰٪	۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۰٪	۶۰٪
ترسالی شدید (XWsx)					خشکسالی شدید (XDsx)				
۴	۶	۱۳	۶	۴	۰	۷	۱۱	۵	۶
۳۱٪	۴۶٪	۱۰۰٪	۴۶٪	۳۱٪	۰٪	۶۴٪	۱۰۰٪	۴۵٪	۵۵٪
ترسالی میانه (XWmd)					خشکسالی میانه (XDmd)				
۵	۷	۱۲	۱	۶	۱	۴	۱۲	۹	۶
۴۲٪	۵۸٪	۱۰۰٪	۸٪	۵۰٪	۸٪	۳۳٪	۱۰۰٪	۷۵٪	۵۰٪
ترسالی ملایم (XWml)					خشکسالی ملایم (XDml)				
۲	۱۶	۱۶	۱۱	۶	۱۳	۷	۱۸	۹	۱۰
۱۳٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۶۹٪	۳۸٪	۷۲٪	۳۹٪	۱۰۰٪	۵۰٪	۵۶٪
شرایط طبیعی (Normal)					عدم تطبیق (N)				
۳۷	۴۹	۵۹	۴۶	۳۳	۷۹	۴۵	۰	۵۹	۷۲
۶۳٪	۸۳٪	۱۰۰٪	۷۸٪	۵۶٪	۵۴٪	۳۱٪	۰٪	۴۰٪	۴۹٪

و فوق‌العاده شدید در دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۲ می‌باشند. ملاحظه می‌گردد که حوزه آبخیز ابرقو- سیرجان (کد ۴۴) و بعد از آن حوزه آبخیز کویر لوت (کد ۴۶)، بیشترین درصد فراوانی را برای شرایط طبیعی دارا می‌باشند. بالاترین درصد فراوانی نسبی خشکسالی شدید (ED) مربوط به حوزه آبخیز هامون- جازموریان (کد ۴۵) است. بالاترین درصد ترسالی متوسط (MDW) مربوط به حوزه آبخیز طشک- نیریز یا بختگان- مهارلو (کد ۴۳) و حوزه آبخیز باتلاق گاوخونی (کد ۴۲) می‌باشد. روند کلی در این ۱۳ سال نشان می‌دهد مقادیر خشکسالی متوسط و شدید از جنوب غرب به طرف شمال شرق افزایش یافته است.

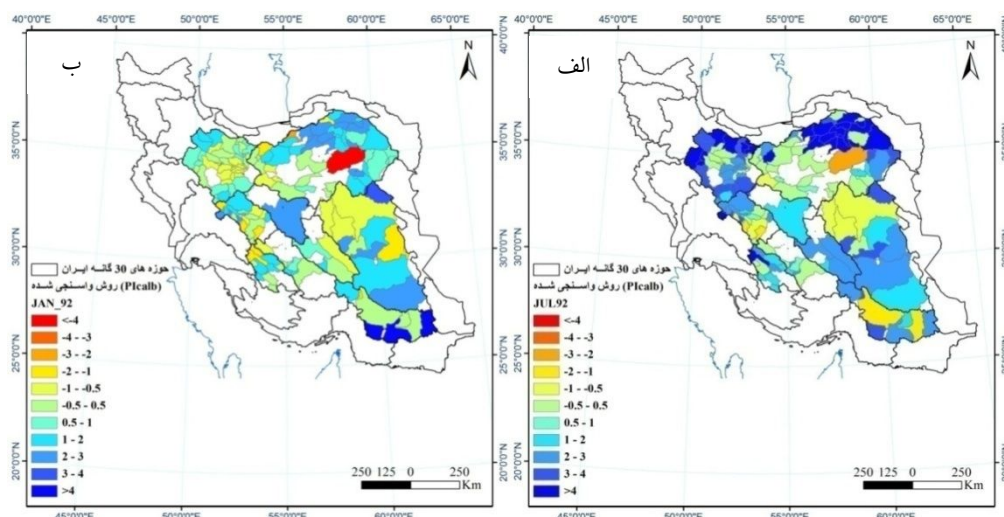
در ادامه نقشه‌های شدت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی در روش مبنا (روش ۳) در مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال‌های دوره آماری (براساس شاخص‌های بارش استاندارد

مدل (روش ۴) عملکردی مشابه با روش ۳ داشته است. با بررسی درصد عدم تطبیق شدت‌ها در شاخص‌های مختلف مشخص است که روش‌های ۲ و ۴ بیشترین تشابه را در برآورد شدت‌ها دارند (نتایج تحقیق دنگوآ و همکاران (۱۴) در رابطه با محاسبه شاخص با استفاده از مدل، نیز به همین شکل به دست آمده است) و بیشترین تضاد در برآورد در روش ۱ دیده می‌شود (لازم است اشاره شود که حالت عادی در اینجا مقادیری بین +۱ و -۱ را شامل می‌شود).

شکل ۴ درصد فراوانی نسبی شدت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی را برای ۹ حوزه ایران مرکزی براساس روش مبنا (روش ۳) در دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۲ نشان می‌دهد. در شکل ۴، ED: مجموع درصد فراوانی نسبی خشکسالی شدید و فوق‌العاده شدید، MDD: خشکسالی متوسط، Nnormal: شرایط طبیعی یا عادی (۱ تا -۱)، MDW: ترسالی متوسط و EW: ترسالی شدید



شکل ۴. شدت‌های مختلف خشکسالی، ترسالی و شرایط طبیعی (عادی) در شاخص واسنجی شده (روش ۳): ایران مرکزی (۲۰۰۲-۱۹۹۰)



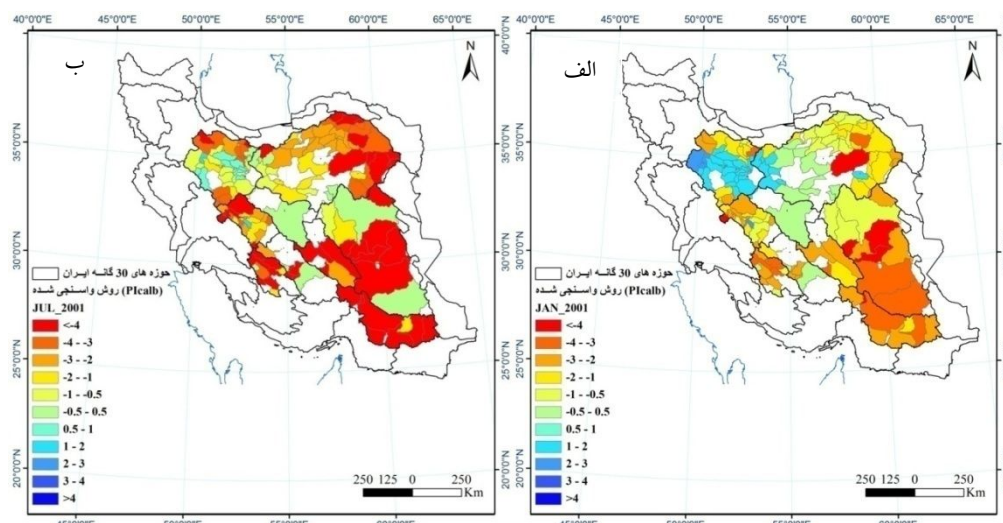
شکل ۵. وضعیت خشکسالی و ترسالی در ایران مرکزی (الف) ژانویه و (ب) جولای (۱۹۹۲)

۲. جولای، ۱۹۹۲: طبق شکل ۵-ب، در جولای ۱۹۹۲ تقریباً در سراسر حوزه ایران مرکزی خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید رخ نداده است، در اکثر زیرحوزه‌ها شرایط ترسالی با شدت‌های مختلف از طبقه در حال توسعه تا بسیار شدید ملاحظه می‌شود، تنها در بخش‌هایی در شمال و شمال شرق طبقات خشکسالی شدید و فوق‌العاده شدید دیده می‌شود.

۳. ژانویه، ۲۰۰۱ (خشک‌ترین سال): در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود در ژانویه سال ۲۰۰۱، ترسالی با شدت کم در

شده و درصد از نرمال بارندگی) ارائه می‌گردد (شکل‌های ۵ و ۶).

۱. ژانویه ۱۹۹۲ (مرطوب‌ترین سال): طبق شکل ۵-الف ملاحظه می‌گردد در سال ۱۹۹۲ در ماه ژانویه (۱) از قسمت‌های غرب به شرق و از جنوب غربی به سمت شمال شرقی، میزان ترسالی کم و خشکسالی زیاد می‌گردد. خشکسالی شدیدی در این ماه در زیرحوزه ای واقع در حوزه آبخیز کویر مرکزی (کد ۴۷) اتفاق افتاده است. ترسالی بسیار شدیدی هم در قسمت‌هایی در جنوب شرقی حوزه ایران مرکزی دیده می‌شود.



شکل ۶. وضعیت خشکسالی و ترسالی در ایران مرکزی (الف) ژانویه و (ب) جولای (۲۰۰۱)

از ضرائب و معادله‌های شدت به دست آمده برای کانزاس غربی و آیوای مرکزی؛ ۲) شاخص با اصلاح ضرائب، P_{leq} : محاسبه شاخص اولیه همراه با استخراج معادله‌های جدید شدت خشکسالی؛ ۳) شاخص واسنجی شده، P_{icalb} : محاسبه شاخص با بومی سازی معادلات شدت (رطوبت و ظرفیت خاک حوزه‌ها از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک، SWAT؛ ۴) شاخص با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک و تبخیر تعرق پتانسیل از مدل SWAT؛ و ۵) شاخص با جایگزینی متغیرهای رطوبت خاک، تبخیر تعرق پتانسیل و رواناب از مدل SWAT. با استفاده از داده‌های مختلفی که هر روش مورد استفاده قرار می‌دهد، ضرائب اقلیمی و معادله‌های شدت شاخص پالم در سطح کل ایران که به ۱۷ حوزه مطالعاتی تبدیل شده بود، مورد واسنجی و مقایسه قرار گرفت. سپس با استفاده از ضرائب اقلیمی و معادله‌های استخراجی برای کشور، در ۱۶۰ زیرحوزه خروجی از مدل SWAT برای ایران مرکزی، مقادیر شاخص محاسبه شد. روش ۳ به دلیل این که حالت تعمیم یافته‌ای از شاخص پالم برای ایران است مبنای مقایسه قرار گرفت.

با استفاده از معادلات تعمیم یافته شاخص پالم، معادله‌های نهایی شدت برای خشکسالی و ترسالی به ترتیب با ضرائب دوگانه (۰/۹۱۲، ۰/۱۳) و (۰/۴۷، ۰/۹۳) در روش ۲؛ (۰/۸۹۲، ۰/۰۰۲) و (۰/۹۴۶، ۰/۰۰۲) در روش ۳؛ (۰/۹۰۹، ۰/۰۱۱) و

بخش‌های زیادی در شمال شرق و غرب اتفاق افتاده است. به طور کلی در ایران مرکزی شرایط خشکسالی نسبت به ترسالی بیشتر به چشم می‌خورد. روند افزایشی خشکسالی از شمال غرب به سمت مرکز و جنوب غرب و همچنین از غرب به شرق دیده بوده است، در مناطق شمالی و مرکزی در کل شرایط طبیعی دیده می‌شود.

۴. جولای، ۲۰۰۱: طبق شکل ۶-ب در جولای ۲۰۰۱ در اکثر زیرحوزه‌های ایران مرکزی شرایط خشکسالی با درجات مختلف دیده می‌شود، بجز موارد اندکی در شمال شرق، مرکز و جنوب غرب، بقیه مناطق تحت تأثیر پدیده خشکسالی قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، به منظور ارزیابی شاخص خشکسالی پالم در حوزه‌های مرکزی ایران، شاخص پالم به پنج روش مورد ارزیابی و واسنجی قرار گرفت. برای انجام کار ابتدا حوزه‌های هیدرولوژیکی ۳۰ گانه ایران، به ۱۷ حوزه بزرگ‌تر تبدیل شده و سپس با میانگین وزنی از داده‌های ۵۰۶ زیرحوزه ایران، متغیرهای ۱۷ حوزه مطالعاتی به دست آمد. روش‌های مورد بررسی عبارتند از: ۱) شاخص اولیه پالم بدون واسنجی، P_{io} : محاسبه شاخص براساس تمامی فرضیات اولیه آن و با استفاده

(۰/۹۴۵، ۰/۰۰۸) در روش ۴؛ و (۰/۸۹۴، ۰/۰۰۹) و (۰/۹۲۲، ۰/۰۰۷) در روش ۵ به دست آمد. نتایج نشان داد، در اکثر زیرحوزه‌های هیدرولوژیکی ایران مرکزی، روش‌های ۲ و ۴، نسبت به روش‌های ۱ و ۵ تطابق بیشتری را با روش مبنا (۳) در برآورد شدت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی دارند. با این حال، با توجه به این که در روش ۴، مقادیر رطوبت خاک از مدل SWAT که به صورت روزانه و با موازنه آبی کامل‌تر به دست آمده بود، جایگزین شد، می‌توان انتظار داشت که این روش (۴) در موارد عدم تطابق آن با روش ۳ هم (۱۰٪ موارد) نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به روش ۳ ارائه کند. در روش ۴ استفاده از این تعداد از داده‌های خروجی مدل، دقت خوبی را برای شرایط مناطق مختلف ایران نشان داده است و کارایی مدل SWAT را در نشان دادن شرایط فیزیکی تأیید می‌کند، نظر به این که هر چه ورودی‌های مدل دقت بالایی داشته باشند خروجی‌های دقیق‌تری را به دست می‌دهد و استفاده از این خروجی‌ها در شاخص پالمر می‌تواند دقت برآورد شدت‌های خشکسالی و ترسالی را افزایش دهد. در روش ۲ که از داده‌های رطوبت اولیه مدل SWAT و ظرفیت خاک مطابق با فرضیات پالمر استفاده شد مشخص شد که اگر فرضیات اولیه پالمر را مد نظر قرار دهیم ولی ضرائب و معادله‌های شدت را برای منطقه واسنجی کنیم تقریباً به شرایط واقعی منطقه خواهیم رسید. همچنین بررسی نتایج نشان داد که در بیشتر زیرحوزه‌های ایران مرکزی، در سال‌های تر (برای مثال ۱۹۹۲) و در سال‌های خشک (برای مثال ۲۰۰۱) روش‌های ۱ و ۵، شرایط ترسالی و خشکسالی را با شدت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده‌اند. در مورد روش ۱ چون شاخص براساس ظرفیت خاک ۸ اینچ و ضرائب معادله استخراجی پالمر برای کانزاس غربی و آیوای مرکزی است و این شرایط با شرایط ایران تفاوت زیادی دارد بنابراین بیشترین تفاوت در این روش دیده شد. در رابطه با تفاوت روش ۴ با ۵ نیز می‌توان گفت که چون شاخص پالمر رواناب را طبق فرضیات خود در نظر می‌گیرد بنابراین رواناب شبیه‌سازی شده از مدل SWAT می‌تواند با فرضیات پالمر

توافق چندان خوبی نداشته باشد.

روش‌های مورد ارزیابی بویژه روش‌های ۲، ۳ و ۴ به خوبی توانستند شدیدترین ترسالی (۱۹۹۲) و شدیدترین خشکسالی (۲۰۰۱) را در طول دوره مطالعه در منطقه مورد بررسی نشان دهند؛ با توجه به این که روش پالمر به صورت بازگشتی عمل می‌نماید و نیز توانایی تشخیص آغاز و خاتمه خشکسالی را دارد، می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های ساده‌تر نظیر SPI، PNPI در برآورد خشکسالی داشته باشد. برخی از مزایای این پژوهش موارد ذیل می‌باشد:

۱- نتایج حاصل از این تحقیق زمینه‌ای را برای مطالعه تأثیر تغییرات اقلیم بر موضوعات منابع آب و خشکسالی‌هایی با توالی مختلف را در آینده فراهم می‌نماید، ۲- برای مدیران این امکان را فراهم می‌کند که در زیرحوزه‌ها و حوزه‌های مختلف به محاسبه شاخص پالمر بپردازند و نتایج آن را در سیاست‌گذاری‌های منابع آب و غیره اعمال کنند، ۳- به دلیل استفاده از داده‌های رطوبت خاک در شاخص با ظرفیت، رطوبت خاک، تبخیر تعرق پتانسیل از مدل SWAT برای کل دوره آماری، واسنجی ضرائب اقلیمی و معادله‌های شدت نتیجه عملکرد خوب این شاخص، می‌توان اطمینان خوبی از چنین مدل‌های هیدرولوژیکی داشت و کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی در ارزیابی وضعیت خشکسالی مورد تأیید قرار می‌گیرد، ۴- باتوجه به اینکه یکی از ورودی‌های مهم شاخص پالمر رطوبت خاک است، اگر بتوان با استفاده از واسنجی‌های مدل SWAT داده‌های رطوبت خاک با دقت کافی تولید کرد، این امر سبب افزایش دقت ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص پالمر خواهد شد، و نظر به این که شاخص پالمر براساس بیلان آب در خاک طراحی شده است می‌تواند کاربرد زیادی در بحث‌های مربوط به کشاورزی داشته باشد. در پایان پیشنهاداتی ارائه می‌گردد:

۱. در این تحقیق به جای استفاده از داده‌های رطوبت واقعی (مشاهداتی) از داده‌های رطوبت شبیه‌سازی شده مدل استفاده شد؛ اما باتوجه به این که در مدل SWAT خروجی‌های رواناب

در این تحقیق کارایی مدل خوب تشخیص داده شد، پیشنهاد می‌گردد مدل‌های برازش منطقه‌ای این مدل‌ها در مقیاس‌های مکانی ریزتر ایجاد و داده‌های خروجی آنها در محاسبه شاخص‌های مختلف خشکسالی مدنظر قرار گیرند، ۳- سایر مدل‌های هیدرولوژیکی نیز مورد استفاده قرار بگیرند و خروجی‌های آنها با مدل SWAT مقایسه و بهترین مدل برای مرتبط شدن با شاخص‌های خشکسالی از جمله پالمر انتخاب گردد.

و عملکرد محصول واسنجی و صحت‌سنجی شدند و کارایی مدل نیز خوب تشخیص داده شد سایر خروجی‌ها مثل فروشت به آب زیرزمینی و رطوبت خاک نیز دقت قابل قبولی پیدا کردند؛ از طرف دیگر به دلیل اینکه بیلان آبی مورد استفاده در روش پالمر براساس رطوبت خاک استوار است پیشنهاد می‌گردد در مناطق مختلف واسنجی و صحت‌سنجی برای این داده‌ها انجام شود که مطمئناً شرایط را نزدیک به واقعیت نشان خواهند داد، ۲. از طرف دیگر، در سال‌های اخیر به دلیل استفاده زیاد از مدل‌های هیدرولوژیکی با اساس فیزیکی در مطالعات، و اینکه

منابع مورد استفاده

۱. آزادی، س. ۱۳۹۲. ارزیابی شاخص خشکسالی پالمر در حوزه‌های ایران مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۲. آسیایی، م. ۱۳۸۵. شاخص‌های خشکسالی، چاپ اول، انتشارات سخن گستر، مشهد.
۳. انصاری، ح.، س. ح. ثنایی نژاد و ک. داوری. ۱۳۸۷. پایش دوره‌های خشک با شاخص شدت خشکسالی پالمر براساس داده‌های رطوبت خاک تخمین زده شده از مدل بیلان آبی: مطالعه موردی استان خراسان، مجله علوم خاک و آب ۲۲(۲).
۴. سلطانی تودشکی، ع. ۱۳۸۶. کمی‌سازی خشکسالی با رویکرد هوا-آب‌شناختی؛ مبانی نظری و کاربرد، پایان‌نامه دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
۵. سلطانی تودشکی، ع.، س. ا. سیپانی. ۱۳۸۸. ارائه یک چارچوب کلی برای فرایند کمی‌سازی شدت اثر خشکسالی و استخراج نمایه، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، اصفهان، ۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۸۸.
۶. شفیعی، م.، ب. قهرمان، ح. انصاری و م. شریفی. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر، مجله مدیریت آب و آبیاری ۱: ۱۳-۱.
۷. مقدم‌نیا، ع.، ع. دستورانی و ا. کهنه. ۱۳۹۰. ارزیابی و مقایسه چند شاخص خشکسالی در منطقه بیرجند، هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۷ و ۸ اردیبهشت ۱۳۹۰.
۸. هزارخوانی، ن. ۱۳۸۹. تعیین مناسب‌ترین روش برآورد رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ایران مرکزی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
9. Akinremi, O. O., S. M. McGinn and A. G. Barr. 1996. Evaluation of the palmer drought index on the Canadian prairies. J. Clim. 9: 897-905.
10. Bhalme, H. N. and D. A. Mooley. 1980. Large-scale droughts/ floods and monsoon circulation. J. Meteorol Soc. Monthly Weather Review 108: 1197-1211.
11. Bogardi, I. I. Matyasovszky, A. Bardossy and L. Duckstein. 1994. A hydroclimatical model of real drought. J. Hydrol. 153: 245-264.
12. Bonsal, B. R., E. E. Wheaton. A. C. Chipanshi. C. Lin. D. J. Sauchyn and L. Wen. 2011. Drought Research in Canada: A Review. J. Atmos-Ocean 49(4): 303-319.
13. Dai, A., K. E. Trenberth and T. Qian. 2004. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. J. Hydrometeorol 5: 1117-1130.

14. Denghua, Y., S. Xiaoliang, Y. Zhiyong, L. Ying, Z. Kai and Y. Yong. 2013. Modified palmer drought severity index based on distributed hydrological simulation. *J. Hydrometeo* 5: 1117-1130.
15. Faramarzi, M. K. C. Abbaspour. R. Schuln and H. Yang. 2009. Modeling blue and green water resources availability in Iran. *J. Hydrol. Process* 23: 486-501.
16. Istvan, J. S., M. Janos and D. Zoltan. 2005. Palmer drought severity index as soil moisture indicator: physical interpretation, statistical behavior and relation to global climate *Physics and Chemistry of the Earth*. 30: 231-243.
17. Karamouz, M., S. Torabi and S. Araghinejad. 2004. Analysis of hydrologic and agricultural droughts in central part of Iran *J. Hydrol. Eng.* 9(5): 402-414.
18. Karnauskas, K. B., A. Ruiz-Barradas. S. Nigam and A. J Busalacchi. 2007. North American Droughts In Era-40 Global And Ncep North American Regional Reanalyses: A Palmer Drought Severity Index Perspective. *J. Clim.* 21: 2102-2118.
19. Kim, T. J., B. Valdes and J. Aparicio. 2002. Frequency and spatial characteristics of in the Conchos River Basin, Mexico. *J. Water* 27(3): 420-430.
20. Kothavala, Z. 1999. The duration and severity of drought over eastern Australia simulated by a coupled ocean-atmosphere GCM with a transient increase in CO₂. *J. Environ. Model. Softw.* 14: 243-252.
21. Lampros, V. and L. Athanasios. 2009. Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly. *Greece Desalination* 237: 3-21.
22. Li, K. and A. E. Makarau. 1994. Drought and desertification: reports to the eleventh session of the commission for climatology. WMO/TD 605, Geneva, Switzerland. pp. 68.
23. Mo, K. C. and M. Chelliah. 2006. The Modified palmer drought severity index based on the NCEP north American regional reanalysis. *J. Appl. Meteorol and Climatol* 45: 1362-1375.
24. Neitsch, S. L., J. G. Aronald. J. R. Kiniry and J. R. Wiliam. 2009. Soil and water assessment tool documentation, user's manual.
25. Palmer, W. C. 1965. Meteorological Drought. Research. Paper No. 45, U. S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
26. Somaru, R., H. P. Borgaonkar. A. A. Munot and A. B. Sikder. 2011. Tree-ring variation in teak *Tectona grandis* from Allapalli, Maharashtra in relation to moisture and Palmer Drought Severity Index. *J. Earth. Syst. Sci.* 120: 713-721.
27. Soltani Tudesghi, A. R., S. A. Sichani, S. M. J. Nazemossadat, M. Karamouz and S. Javanmard. 2008. The scaling technique in palmer drought severity index; generalized calibration and modification. *Pak J Biol Sci.* 11(5): 702-710.
28. Yinpeng, L., Y. Wei, W. Meng and Y. Xiaodong. 2009. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *J. Clim.* 39: 31-46.