



Modification of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) based on Atmosphere-Land Surface Interaction Scheme (ALSIS) in Karkheh River Basin

S. Hejabi¹, P. Irannejad² and J. Bazrafshan^{3*}

Abstract

In this study, the water balance component of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) was replaced by the Atmosphere-Land Surface Interaction Scheme (ALSIS) and the modified Palmer Drought Severity Index (AL-PDSI) was compared with the self-calibrating version of Palmer Drought Severity Index (SC-PDSI). The evaluation of drought indices in Karkheh River basin for the period of 1983-2011 revealed more severe droughts reported for certain duration by the AL-PDSI in comparison with the SC-PDSI. The AL-PDSI could capture seasonal variations in relative frequency of droughts. Moreover, the relative frequency of mild, moderate, and severe droughts for the AL-PDSI were higher compared to SC-PDSI. However, the AL-PDSI and SC-PDSI did not show a remarkable difference in terms of the correlation with vegetation and soil moisture variations. The more physical mechanism of AL-PDSI helps in more comprehensive understanding of drought characteristics and in studying the effects of climate and land use change scenarios on droughts.

Keywords: Palmer Drought Severity Index, Water-Energy Balance Model, Atmosphere-Land Surface Interaction Scheme, Karkheh River Basin.

Received: August 24, 2017

Accepted: March 31, 2018

تعدیل شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) بر مبنای طرحواره برهمکنش جو- سطح خشکی (ALSIS) در حوضه آبریز کرخه

سمیه حجابی^۱، پرویز ایران‌نژاد^۲ و جواد بذرافشان^{۳*}

چکیده

در این مطالعه، طرحواره برهمکنش جو- سطح خشکی (ALSIS) جایگزین مدل ترازمندی آب شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) شد و شاخص شدت خشکسالی پالم تعدیل شده (AL-PDSI) با نسخه خودواستج شاخص شدت خشکسالی پالم (SC-PDSI) مقایسه شد. ارزیابی شاخص‌های خشکسالی برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه آبریز کرخه بیانگر گزارش وقوع خشکسالی‌های شدیدتر به ازای تداوم معین توسط شاخص AL-PDSI در مقایسه با شاخص SC-PDSI است. همچنین، شاخص AL-PDSI توانایی نمایش تغییرات فصلی در درصد فراوانی نسبی رخداد خشکسالی را داشته و درصد فراوانی طبقات خشکسالی خفیف، متوسط و شدید بدست آمده برای شاخص AL-PDSI بیشتر از شاخص SC-PDSI است. با این وجود، از نظر همبستگی با تغییرات پوشش گیاهی و رطوبت خاک تفاوت قابل توجهی در مورد شاخص‌های AL-PDSI و SC-PDSI وجود نداشت.

کلمات کلیدی: شاخص شدت خشکسالی پالم، مدل ترازمندی آب- انرژی، طرحواره برهمکنش جو- سطح خشکی، حوضه آبریز کرخه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۶/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱/۱۱

1- Ph.D. Student of Agrometeorology, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Space Physics, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: jbazr@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار، گروه فیزیک فضا، دانشگاه تهران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

مدل ترازمندی آب PDSI، خاک را به صورت یک ستون دو لایه فرض می‌کند که ظرفیت زراعی لایه سطحی آن ۲۵/۴ میلی‌متر است و ظرفیت زراعی لایه زیرین (یا ناحیه ریشه) توسط تحلیل‌گر تعیین می‌شود. تقاضای تبخیر در PDSI، به طور قراردادی، توسط تبخیر-تعرق پتانسیل مبتنی بر روش تورنت‌وایت (Thorntwaite, 1948) تعیین می‌شود. بارش صرف تغذیه خاک می‌شود، به طوری که ابتدا لایه فوقانی و سپس لایه تحتانی پر می‌شود؛ هنگامی که کل ستون خاک به ظرفیت زراعی رسید و تقاضای تبخیر تأمین شد، رواناب رخ می‌دهد. وقتی بارندگی و رطوبت خاک لایه فوقانی قادر به تأمین تقاضای تبخیری نباشد، خاک در دو مرحله خشک می‌شود: رطوبت در لایه فوقانی با آهنگ پتانسیل تبخیر می‌شود، سپس رطوبت در لایه تحتانی با آهنگی که بستگی به رطوبت خاک در ناحیه ریشه و میزان تأمین نشده تقاضای تبخیر دارد، کاهش می‌یابد (Hobbins et al., 2008).

در کنار نقاط قوت بسیاری که شاخص PDSI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی دارد، نقاط ضعف و محدودیت‌های این شاخص توسط Alley (1984) و Karl and Knight (1985) تشریح شده‌اند. PDSI از مدل ساده شده تبخیر پتانسیل تورنت‌وایت استفاده می‌کند که یکی از محدودیت‌های آن عدم وجود تبخیر در دامی کمتر از صفر درجه است. همچنین، این مدل اثر بسیاری از عوامل (کمبود فشار بخار، سرعت باد، پوشش گیاهی و نوع خاک) در تبخیر را در نظر نمی‌گیرد (Xu et al., 2012) و تنها به تغییرات دما واکنش نشان می‌دهد؛ بنابراین شاخص پالمر مبتنی بر روش تورنت‌وایت به طور نادرستی به گرمایش جهانی دهه‌های اخیر واکنش نشان می‌دهد (Sheffield et al., 2012; Yan et al., 2013). مدل ترازمندی آب پالمر فرض می‌کند که ظرفیت‌های دو لایه خاک، مستقل از تغییرات فصلی یا سالانه پوشش گیاهی و توسعه ریشه است. این تغییرات زمانی در مناطق زراعی اهمیت ویژه‌ای دارد (Alley, 1984). در مدل ترازمندی آب پالمر، اولاً تأثیرات مستقیم تغییر پوشش گیاهی بر مؤلفه‌های ترازمندی آب مثل برگ‌اب و تبخیر-تعرق نادیده گرفته می‌شود و تبخیر-تعرق عمدتاً به‌عنوان تخلیه بارش و رطوبت خاک لحاظ می‌شود. ثانیاً تأثیر تغییر پوشش گیاهی روی جریان جانبی رواناب سطحی و آب زیرزمینی و همچنین نفوذ، که بر میزان رطوبت خاک مؤثر هستند، نادیده گرفته می‌شود (Xu et al., 2012). از طرف دیگر، مدل پالمر فاقد رابطه درست بین تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل است و قادر به لحاظ کردن اثرات مشخصه‌های ریشه، بافت خاک و فیزیولوژی گیاه و شرایط اقلیمی روی تبخیر-تعرق واقعی نیست. محدودیت دیگر مدل پالمر، انتخاب اختیاری مقدار ۲۵/۴ میلی‌متر به‌عنوان ظرفیت رطوبتی لایه سطحی است که تبخیر-تعرق از آن با

به دلیل رشد جمعیت و توسعه بخش کشاورزی، انرژی و صنعت، تقاضای آب به طور گسترده‌ای افزایش یافته است؛ به طوری که هر ساله بخش‌های زیادی از کره زمین با مسأله کمبود آب روبرو هستند. به‌علاوه، عواملی نظیر تغییر اقلیم و آلودگی منابع آب، مسأله کمبود آب را تشدید کرده است. خشکسالی‌ها به‌عنوان یکی از علل مهم کمبود آب، با تأثیر بر منابع آب سطحی و زیرزمینی منجر به کاهش عرضه آب، کاهش کیفیت آب، کاهش بازدهی مراتع، کاهش تولید انرژی برقی، نابودی زیستگاه‌های ساحلی و تعلیق فعالیت‌های گردشگری می‌شوند. بنابراین، بررسی و پایش خشکسالی‌ها اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارد. پایش مؤثر و به‌موقع خشکسالی‌ها می‌تواند به توسعه سامانه‌های پیش‌آگاهی خشکسالی و کاهش هزینه‌های ناشی از خشکسالی کمک کند (Mishra and Singh, 2010).

خشکسالی به‌عنوان یک پدیده فیزیکی، از قوانین عمومی تکامل سامانه‌های جوی و هیدرولوژیکی تبعیت می‌کند، اما به دلیل پیچیدگی زیاد فرآیندهای دخیل در آن، هنوز یک رهیافت دقیق فیزیکی برای آن ارائه نشده است. از پیشگامان توسعه یک رهیافت فیزیکی برای پدیده خشکسالی می‌توان به Palmer (1965) اشاره کرد. از دیدگاه پالمر، خشکسالی یک دوره زمانی چند ماهه یا چند ساله است که طی آن، عرضه رطوبت واقعی در یک مکان معین به‌طور نسبتاً پایداری از عرضه رطوبتی مناسب از نظر اقلیمی برای شرایط موجود (CAFE¹) کمتر شود (Palmer, 1965). بر همین اساس، پالمر با استفاده از متغیرهای بارش، دما و رطوبت قابل دسترس خاک و بر اساس یک مدل ترازمندی آب ساده، برای برآورد عرضه و تقاضای رطوبت یک مدل خاک دو لایه، یک شاخص فیزیکی-آماری به نام شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI²) را فرمول‌بندی کرد. نیاز به متغیرهای ورودی کم، لحاظ کردن همه مؤلفه‌های ترازمندی آب در محاسبات شاخص و قابلیت مقایسه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف از نقاط قوت شاخص PDSI محسوب می‌شوند. در ایران، این شاخص برای بررسی مشخصه‌های مکانی و زمانی خشکسالی (Zoljoodi and Didevarasl, 2013)، توسعه سیستم‌های پایش خشکسالی‌ها (Karamouz et al., 2013)، اثرات خشکسالی بر هیدرولوژی و کشاورزی (Karamouz et al., 2004)، ارزیابی آسیب‌پذیری از خشکسالی (Babaei et al., 2013) و همچنین پیش‌بینی خشکسالی (Karamouz et al., 2009; Arshad et al., 2013) استفاده شده است.

آهنگ پتانسیل رخ می‌دهد. محدودیت دیگر محاسبات ترازمندی آب پالم، مربوط به برآورد رواناب است. به‌طور ظاهری عبارت رواناب پالم، هم شامل تغذیه آب زیرزمینی و هم رواناب سطحی است. مدل پالم سازوکار رواناب مازاد نفوذ را لحاظ نمی‌کند و همچنین، هیچ تأخیر زمانی بین رخداد آب مازاد اشباع و وقوع رواناب در نظر نمی‌گیرد. به‌علاوه، تأثیر ذوب برف و زمین پوشیده از برف و یخ در محاسبات ترازمندی آب پالم در نظر گرفته نشده است. بنابراین، این روش می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای در بخش‌های کوهستانی ایجاد کند (Alley, 1984).

اولین مطالعات انجام‌شده در خصوص تعدیل مدل ترازمندی آب پالم، پیرامون تأثیر تغییر پارامترسازی تبخیر-تعرق پتانسیل بر مؤلفه‌های ترازمندی آب و شاخص PDSI بوده است. برای مثال، Hobbins et al. (2008) بر اساس مدل ترازمندی آب پالم، تأثیر دو پارامترسازی مختلف تبخیر-تعرق پتانسیل (روش تورنت وایت و داده‌های تبخیر از تشت کلاس A) را روی روند بلند مدت شار تبخیر در استرالیا و نیوزیلند بررسی کردند و نشان دادند که در مناطقی که دارای محدودیت انرژی هستند، انتخاب روش پارامترسازی بر روند تبخیر-تعرق واقعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. Horváth et al. (2010) با مقایسه دو رهیافت تورنت وایت و بلانی-کریدل (Blaney and Criddle, 1962) برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در مدل ترازمندی آب پالم نشان دادند که ضرایب همبستگی استاندارد شده بین رطوبت خاک و PDSI در مورد PDSI مبتنی بر رهیافت بلانی-کریدل بیشتر بود. (van der Schrier et al. 2011) حساسیت PDSI به پارامترسازی‌های معادلات تورنت وایت و پنمن-مانتیت (Monteith, 1965) را در مقیاس جهانی بررسی کردند. برآوردهای تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه بر اساس این دو روش، تفاوت زیادی را نشان داد. با این وجود، مقادیر PDSI مبتنی بر این دو برآورد، از نظر همبستگی، میانگین‌های منطقه‌ای، روندها و از نظر شناسایی ماه‌های به‌شدت خشک یا تر، بسیار شبیه بودند. (Qiu 2013) با افزودن یک مدل ساده برف به مدل خود واسنج PDSI، نشان داد که اختلاف بین رطوبت خاک در مدل اصلی و مدل تعدیل‌شده PDSI کم است. همچنین، وارد کردن فرایند برف سبب شد که PDSI، رخدادهای سیلاب بهاره را که ناشی از ذوب برف هستند، بهتر آشکار کند. (Pereira et al. 2007) از مدل ترازمندی آب مفهومی غیرتوزیعی ISAREG³ (Teixeira and Pereira, 1992) برای محاسبه شاخص PDSI تعدیل‌شده استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از محصول زیتون به‌عنوان محصول معرف خشکسالی، سبب می‌شود که مؤلفه‌های ترازمندی آب

به واقعیت نزدیک‌تر باشند. (Yan et al. 2013) بر اساس مدل هیدرولوژیکی توزیعی SWAT⁴ (Arnold et al., 1998)؛ (Arnold and Fohrer, 2005)، شاخص PDSI را در حوضه رودخانه لوانه⁵ در شمال چین تعدیل کردند. نتایج نشان داد که PDSI تعدیل شده قابلیت بیشتری برای آشکارسازی تغییرات خشکسالی منطقه‌ای دارد. همچنین PDSI تعدیل‌شده می‌تواند ناهمگنی مکانی خشکسالی منطقه‌ای را منعکس کرده و سازوکار فیزیکی PDSI را بهبود بخشد. (Xu et al. 2012) از مدل هیدرولوژیکی توزیعی به‌جای مدل ترازمندی آب پالم، برای محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالم فیزیکی (PB-PDSI⁶) استفاده کردند. در مدل مذکور، برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل از یک روش تبخیر تعرق پتانسیل دو منبعی و برای برآورد رواناب از یک مدل رواناب هیبرید استفاده شد. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین PB-PDSI و شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI⁷) نشان داد که PB-PDSI قادر است تأثیر تغییر خشکسالی روی پوشش گیاهی را به‌خوبی آشکار کند. (Zhang et al. 2013) از مدل ظرفیت نفوذ متغیر (VIC⁸) (Liang et al., 1994) به‌جای مدل ترازمندی آب پالم برای محاسبه PDSI استفاده کردند و با اتصال مدل VIC-PDSI با فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS⁹) یک شاخص جدید ارزیابی خشکسالی (DAI¹⁰) ایجاد کردند.

(Ojaghloo Shahabi et al. 2013) با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از سنجنده مادیس مدل رطوبت خاک پالم را برورسانی کردند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک بر اساس نسخه برورسانی‌شده مدل پالم با مقادیر رطوبت خاک استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای بیانگر بهبود ضرایب همبستگی در مقایسه با نتایج حاصل از نسخه بروز رسانی‌نشده مدل پالم در دوره‌های خشک داشت؛ در حالی که در سال‌های تر بهبود قابل توجهی در نتایج مشاهده نشد. (Shahbazi 2014) با مقایسه دو روش تورنت وایت و پنمن-مانتیت در محاسبه شاخص PDSI نشان داد که PDSI مبتنی بر روش پنمن-مانتیت (گیاه مرجع) نتایج تقریباً مشابهی با PDSI مبتنی بر روش تورنت وایت را دارند؛ اما PDSI مبتنی بر روش پنمن-مانتیت (گندم) متفاوت از دو روش قبل بود. (Azadi et al. 2015) از خروجی‌های مدل SWAT برای محاسبه شاخص PDSI در حوزه‌های ایران مرکزی استفاده کردند. نتایج بیانگر این بود که استفاده از متغیرهای رطوبت خاک و تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از مدل SWAT نتایج مطمئن‌تری را ارائه می‌کنند.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بیشتر تلاش‌ها در راستای تعدیل مدل ترازمندی آب پالم، معطوف به تعدیل پارامترسازی‌های تبخیر-تعرق پتانسیل بوده است و وجود تفاوت‌های معنی‌دار در نتایج شاخص پالم اهمیت و ضرورت توجه به مدل‌سازی دقیق‌تر مؤلفه‌های ترازمندی آب مورد نیاز شاخص پالم را برجسته می‌سازد.

در سال‌های اخیر، استفاده از طرحواره‌های سطح خشکی در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی مورد توجه بسیار قرار گرفته است. طرحواره‌های پارامترسازی سطح خشکی یا به بیان ساده‌تر طرحواره‌های سطح خشکی الگوریتمی برای تعیین تبدلات انرژی، جرم و تکانه بین جو و سطح خشکی هستند. این طرحواره‌ها به‌طور کلی از دو بخش ترمودینامیکی برای محاسبه شارهای انرژی سطح (گرمای نهان، گرمای محسوس، گرمای زمین و انرژی ذوب برف) و بخش هیدرودینامیکی برای محاسبه شار آب (تقسیم بارش به تبخیر-تعرق، رواناب و تغییرات رطوبت خاک) تشکیل شده‌اند. چرخه‌های آب و انرژی از طریق شار گرمای نهان (تبخیر-تعرق) با یکدیگر در ارتباط هستند.

Hejabi et al. (2017) با بررسی کاربرد طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (ALSIS¹¹; Irannejad and Shao, 1998) در حوضه آبریز کرخه (دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۲) نشان دادند که طرحواره ALSIS توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان رودخانه، رژیم ماهانه مؤلفه‌های ترازمندی آب، توزیع مکانی میانگین بلندمدت مؤلفه‌ها و رابطه بین آنها دارد و می‌توان از آن در مطالعات مبتنی بر مؤلفه‌های ترازمندی آب، مانند محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، استفاده کرد. در همین راستا، در مطالعه حاضر، طرحواره ALSIS جایگزین مدل ترازمندی آب پالم می‌شود و شاخص‌های PDSI مبتنی بر طرحواره ALSIS و PDSI نسخه اصلی از نظر شناسایی رخداد خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها، رابطه تداوم و شدت خشکسالی‌ها، میزان همبستگی با تغییرات پوشش گیاهی و توانایی نمایش تغییرات رطوبت خاک مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کرخه با مساحتی در حدود ۵۱۶۴۰ کیلومتر مربع در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه بین طول‌های جغرافیایی $36^{\circ}06'$ و $49^{\circ}11'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ}54'$ و $35^{\circ}04'$ شمالی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و مدل رقومی ارتفاع حوضه

آبریز کرخه و تقسیمات استانی درون حوضه را نشان می‌دهد. حدود ۷۰ درصد مساحت حوضه را مناطق کوهستانی و حدود ۳۰ درصد آن را دشت‌ها، که عموماً در بخش‌های جنوبی قرار دارند، می‌پوشانند. کوه الوند در سر حد شمال شرقی حوضه، مرتفع‌ترین قله حوضه و دشت آزادگان پست‌ترین نقطه آن به شمار می‌روند. تمرکز ارتفاعات در نواحی میانی، شرقی و همچنین مناطق شمالی حوضه است و دشت‌های آبرفتی با وسعت قابل ملاحظه در مناطقی نظیر ملایر، نهاوند، کنگاور، سنقر، ماهیدشت و اسلام‌آباد قرار دارند که ارتفاع آنها بیش از ۱۲۰۰ متر است.

۲-۲- طرحواره پارامترسازی سطح خشکی

در این مطالعه از طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (ALSIS) برای برآورد شارهای آب و انرژی استفاده می‌شود. ALSIS یک طرحواره پارامترسازی سطح خشکی است که می‌تواند به صورت تک‌ایستا^{۱۲} و یا جفت شده با مدل جوی برای محاسبه شارهای انرژی، جرم و تکانه به‌کار رود. نسخه تک‌ایستای طرحواره ALSIS در محیط FORTRAN 77 نوشته شده و دارای یک ساختار ماژولی و تعدادی زیربرنامه برای نمایش پارامترسازی‌های گوناگون فرایندهای سطح خشکی است. در ALSIS هر یاخته شبکه به چند موزائیک، که دارای مشخصه‌های گوناگون سطحی از نظر نوع خاک و پوشش گیاهی هستند، تقسیم می‌شود و شارهای سطحی برای واحد سطح هر موزائیک به‌طور جداگانه محاسبه و بر اساس مساحت آنها میانگین‌گیری می‌شوند. به دلیل تفاوت در مشخصه‌های ایروودینامیکی، مقاومت سطحی و پاسخ به ذخایر متفاوت رطوبت خاک، خاک عریان و پوشش گیاهی از نظر تبدلات گرما و رطوبت با جو رفتار بسیار متفاوتی دارند. بنابراین، تبدلات آب و انرژی برای خاک عریان و پوشش گیاهی به‌طور مجزا محاسبه می‌شود. برای سطح پوشیده از گیاه، ALSIS یک لایه کانوپی در نظر می‌گیرد که بخشی از سطح خاک را می‌پوشاند. تبخیر از سطح خاک و بخش مرطوب کانوپی و تعرق از بخش خشک کانوپی به‌طور جداگانه محاسبه شود و میانگین تبادل رطوبت واحد سطح خشکی با جو برای هر موزائیک بدست می‌آید. کانوپی به‌عنوان یک محیط متخلخل نیمه‌شفاف در نظر گرفته می‌شود که تابش خورشید قبل از رسیدن به سطح خاک زیر کانوپی را تضعیف می‌کند. خاک در جهت قائم به چند لایه موازی تقسیم می‌شود که با افزایش عمق، ضخامت لایه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین فرض می‌شود که خاک در جهت قائم ناهمگن است و مشخصه‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن با عمق تغییر می‌کند. روش دارسی-باکینگهام^{۱۳} و قانون فوریه^{۱۴} برای محاسبه انتقال رطوبت و گرما درون خاک به‌کار برده می‌شود.

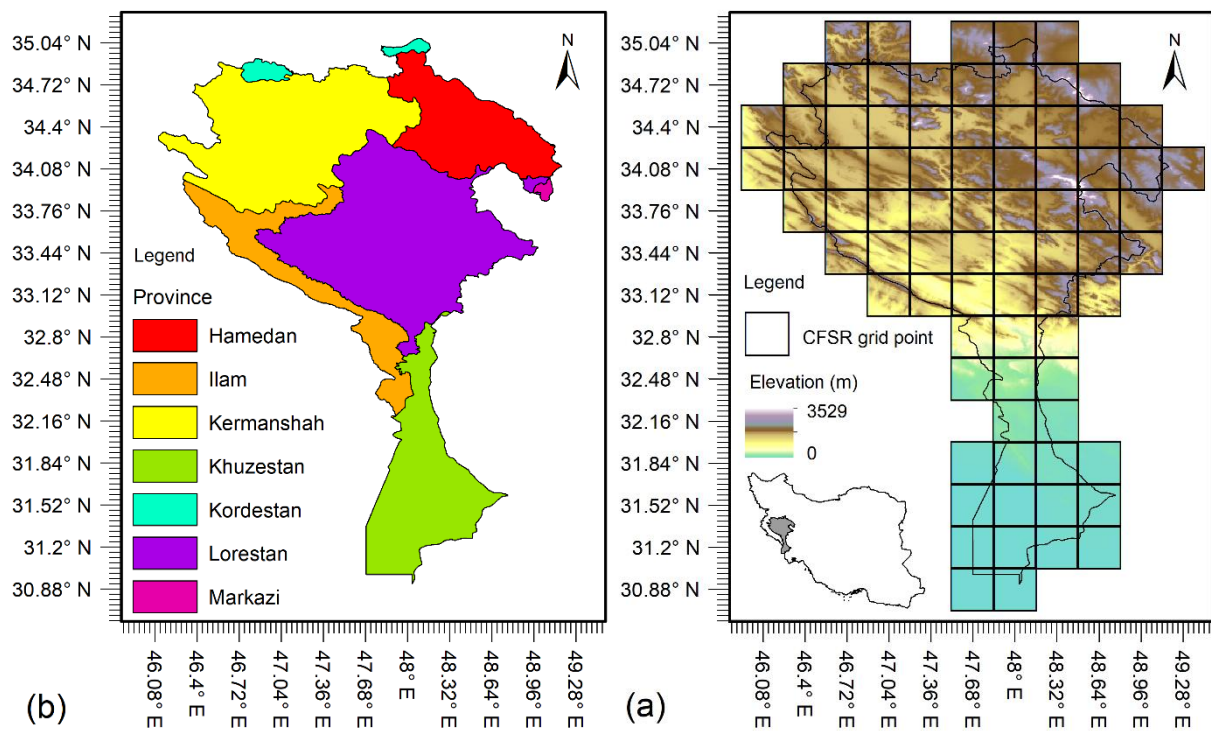


Fig. 1- Geographical location and the map of Digital Elevation Model for Karkheh basin with grid points of CFSR reanalysis data network with resolution of 0.32 degree (a) and provincial divisions in basin (b)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه کرخه به همراه یاخته‌های شبکه داده‌های بازتحلیل CFSR با تفکیک ۰/۳۲ درجه (a) و تقسیمات استانی درون حوضه (b)

توسعه یافت. NCEP در ۳۰ مارس ۲۰۱۱، CFS را به نسخه ۲ (CFSv2) ارتقاء داد. محدوده زمانی این نسخه دوره زمانی ۲۰۱۱ تا زمان حاضر را شامل می‌شود. CFSR به صورت یک سامانه جهانی جفت‌شده جو-اقیانوس-سطح خشکی-یخ دریا و با تفکیک بالا طراحی و اجرا شده است. تفکیک جو جهانی CFSR حدود ۳۸ km (T382) با ۶۴ تراز از سطح زمین تا ۰/۲۶ hPa است و مدل جوی CFSR شامل تغییرات مشاهده شده دی‌اکسیدکربن (CO_2) و همچنین تغییرات هواویزها و سایر گازها و تغییرات خورشیدی است. جزئیات بیشتر در مورد CFSR در Saha et al. (2010) تشریح شده است.

متغیرهای واداشت جوی با تفکیک زمانی یک ساعته و تفکیک مکانی T382 ($\approx 38km$) از پایگاه مراکز ملی اطلاعات محیطی^{۱۷} (<https://www.ncdc.noaa.gov/>) برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۲ بارگیری و برای حوضه کرخه استخراج و تفکیک مکانی یاخته‌های شبکه به ۰/۳۲ در راستای طول و عرض جغرافیایی تغییر یافتند. همچنین درون‌یابی زمانی داده‌ها از تفکیک یک ساعته به ۳۰ دقیقه‌ای

توصیف جزئیات ALSIS در Irannejad and Shao (1998) آمده است.

۳-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد نیاز برای اجرای طرحواره ALSIS شامل متغیرهای واداشت جوی، پوشش گیاهی و خاک هستند. متغیرهای جوی مورد نیاز برای اجرای طرحواره ALSIS شامل دمای هوا (K)، رطوبت ویژه هوا ($kg\ kg^{-1}$)، تابش موج کوتاه و موج بلند رو به پایین ($W\ m^{-2}$)، سرعت باد ($m\ s^{-1}$)، شدت بارش ($mm\ s^{-1}$) و فشار هوا (Pa) است. در این مطالعه از داده‌های جهانی واداشت جوی شبکه‌بندی‌شده پایگاه داده‌های بازتحلیل سامانه پیش‌بینی اقلیم (CFSR¹⁵) مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP¹⁶) به‌عنوان ورودی طرحواره استفاده می‌شود. برای تولید محصولات بازتحلیل CFSR از مدل سامانه پیش‌بینی اقلیم (CFS) استفاده می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن برهمکنش اقیانوس‌ها، خشکی‌ها و جو، داده‌های ساعتی را با تفکیک افقی کمتر از ۰/۵ درجه (تقریباً ۵۶ کیلومتر) برای بسیاری از متغیرها در سراسر زمین عرضه می‌کند. این مدل ابتدا برای یک دوره ۳۱ ساله از ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۹ اجرا شد و سپس محدوده زمانی‌اش تا مارس ۲۰۱۱

انجام شد. شکل ۱ یاخته‌های شبکه داده‌های بازتحلیل CFSR با تفکیک 0.33° را در محدوده حوضه کرخه نشان می‌دهد.

پوشش یاخته توسط هر یک از موزائیک‌های هر یاخته و شیب زمین به‌عنوان پارامترهای سطح خشکی مقداردهی شدند.

پس از تعیین موزائیک‌ها، سری زمانی LAI برای هر موزائیک، از طریق میانگین‌گیری سری‌های زمانی LAI زیریاخته‌های تشکیل‌دهنده آن موزائیک بدست آمد. سپس گام زمانی LAI به 30 دقیقه تغییر و برای هر یک از موزائیک‌ها استخراج شد.

سایر اطلاعات مورد نیاز برای اجرای طرحواره شامل تعداد لایه‌های خاک، ضخامت افق A خاک، فاکتور وزنی تجمیع رواناب، گام زمانی محاسبات، زمان آغاز و پایان، نام فایل داده‌های واداشتی، نام فایل اطلاعات سطح خشکی، نام فایل شاخص سطح برگ، نام فایل خروجی، ارتفاع مرجع داده‌های جوی، زبری سطح خاک، گسیلندگی (جذبندگی) تابش موج بلند برای گیاه و خاک، ضریب خاموشی تابش در پوشش گیاهی، ضریب شار آب (زهکشی) در کف عمیق‌ترین لایه خاک و فاکتور رواناب زیرسطحی می‌باشند که در فایل اطلاعات طرحواره تعریف می‌شوند. به‌علاوه، شش متغیر شامل ارتفاع آب روی کانوبی، ارتفاع برف روی کانوبی، ارتفاع برف روی سطح کانوبی، دمای سطح کانوبی، دمای سطح خاک و پارامتر پایداری مومین-ابوخوف^{۲۳} به‌عنوان متغیرهای آغازگری مقداردهی می‌شوند. از آنجا که شبیه‌سازی‌های مدل، به‌ویژه در لایه‌های عمیق‌تر خاک، به انتخاب شرایط آغازین رطوبت و دمای خاک خیلی حساس است، یک سال قبل از دوره ارزیابی به عنوان دوره گرم شدن مدل لحاظ می‌شود. لذا، سال ۱۹۸۲ به‌عنوان دوره گرم شدن^{۲۴} مدل در نظر گرفته شده است و شاخص PDSI برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ محاسبه می‌شود.

۲-۴- شاخص شدت خشکسالی خودواسنج پالم

در این مطالعه از کد PDSI مبتنی بر الگوریتم نسخه خودواسنج شاخص پالم (Wells et al., 2004) برای محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالم خودواسنج (SC-PDSI²⁵) بر اساس داده‌های واداشت جوی بارش و دمای حاصل از پایگاه داده بازتحلیل CFSR استفاده می‌شود. سپس مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حاصل از اجرای طرحواره سطح خشکی برای محاسبه شاخص PDSI مبتنی بر طرحواره ALSIS (AL-PDSI) استفاده و با شاخص SC-PDSI مقایسه می‌شوند. کد PDSI در محیط ++C نوشته شده است و قادر به محاسبه نسخه اصلی PDSI، نسخه خودواسنج PDSI، PDSI هفتگی و شاخص هفتگی رطوبت محصول (CMI²⁶) است. تفاوت نسخه خودواسنج و نسخه اصلی PDSI در این است که به‌جای ضرایب ثابت پیشنهاد شده توسط Palmer (1965) برای ایالات متحده، ضرایب

در طرحواره ALSIS هر یاخته شبکه بر اساس نوع پوشش سطح خشکی و خاک به تعدادی موزائیک همگن تقسیم می‌شود. برای این منظور، از محصول جهانی طبقه‌بندی پوشش سطح خشکی AVHRR (Hansen et al., 1998) استفاده شد. این محصول که شامل ۱۴ نوع پوشش زمین است، مبتنی بر تحلیل تصاویر ماهواره‌ای AVHRR برای دوره زمانی ۱۹۸۱-۱۹۹۴ بوده و در سه تفکیک مکانی 1° ، 0.8° و 0.1° موجود می‌باشد. پارامترهای پوشش گیاهی مورد نیاز برای اجرای طرحواره ALSIS (ارتفاع گیاه، درصد پوشش زمین توسط گیاه، آلبدو و کمیته مقاومت روزنه‌ای) از پایگاه داده سامانه جهانی گوارد داده‌های خشکی (GLDAS¹⁸) تهیه شد. در مورد شاخص سطح برگ (LAI¹⁹)، از داده‌های جهانی تهیه شده توسط گروه پژوهش اقلیم و پوشش گیاهی^{۲۰} دانشگاه بوستن (Zhu et al., 2013) استفاده شد. این داده‌ها از نسل سوم داده‌های شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) گروه مطالعات مدل‌سازی و نقشه‌برداری جهانی (NDVI3g²¹) مشتق شده‌اند و با تفکیک مکانی 0.83° و تفکیک زمانی ۱۵ روزه برای جولای ۱۹۸۱ تا دسامبر ۲۰۱۱ موجود هستند. تفکیک مکانی داده‌های LAI از 0.83° به 0.8° تغییر یافتند.

برای تهیه نقشه بافت خاک از نسخه ۱/۲ پایگاه داده جهانی هماهنگ خاک (HWSD v1.2²²) استفاده شد (Wieder et al., 2014). این پایگاه داده شامل پارامترهای مختلف خاک از جمله درصد رس، شن و سیلت برای دو افق خاک A (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) و افق B (۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر) است و با تفکیک مکانی 0.5° می‌باشند. پس از تغییر تفکیک مکانی داده‌های خاک از 0.5° به 0.8° ، بافت خاک بر اساس طبقه‌بندی بافت خاک وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) برای هر یک از افق‌های A و B خاک تعیین شد.

از طریق هم‌پوشانی نقشه توزیع جغرافیایی بافت افق A و B خاک و پوشش سطح خشکی، نقشه توزیع جغرافیایی ترکیب‌های بافت خاک-پوشش خشکی بدست آمد. برای تعیین موزائیک‌های هر یاخته، زیر یاخته‌های دارای کد ترکیب مشابه به‌عنوان یک موزائیک در نظر گرفته شدند. علاوه بر تعیین تعداد موزائیک‌ها، درصد پوشش یاخته توسط هر موزائیک نیز محاسبه شد. نقشه شیب زمین با استفاده از نقشه توپوگرافی (شکل ۱) برای تفکیک مکانی 0.8° تهیه شد و میانگین شیب برای موزائیک‌های هر یک از یاخته‌ها محاسبه شد. در گام بعد، تعداد موزائیک‌های هر یاخته، کد بافت خاک، کد پوشش زمین، درصد

۳- نتایج و تحلیل نتایج

شکل ۲ سری زمانی میانگین ماهانه شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI را برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۳ در حوضه کرخه نشان می‌دهد. دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۳ دامنه وسیعی از شرایط رطوبتی را داشته است، به طوری که شاهد سه دوره خشکسالی با شدت‌های مختلف در سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۸۹ (خفیف)، ۲۰۰۷-۱۹۹۹ (متوسط تا شدید) و ۲۰۱۱-۲۰۰۸ (متوسط تا شدید) هستیم. به علاوه، یک دوره ترسالی بلندمدت و متوسط تا شدید قبل از دوره خشکسالی دوم مشاهده می‌شود. مقایسه سری‌های زمانی SC-PDSI و AL-PDSI نشان می‌دهد که دو شاخص از نظر شناسایی رخداد خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها رفتار مشابهی دارند و علی‌رغم تفاوت اندک سری‌های زمانی، SC-PDSI نوسانات زمانی بیشتری را به‌ویژه در مقادیر حدی و SC-PDSI پاسخ هموارتری را به تغییرات زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نشان می‌دهد. به علاوه، تفاوت SC-PDSI و AL-PDSI در رخدادهای خشکسالی بارزتر از رخدادهای ترسالی است. در واقع، در شرایط هواشناسی یکسان، AL-PDSI مقادیر منفی‌تری را نسبت به SC-PDSI بدست می‌آورد.

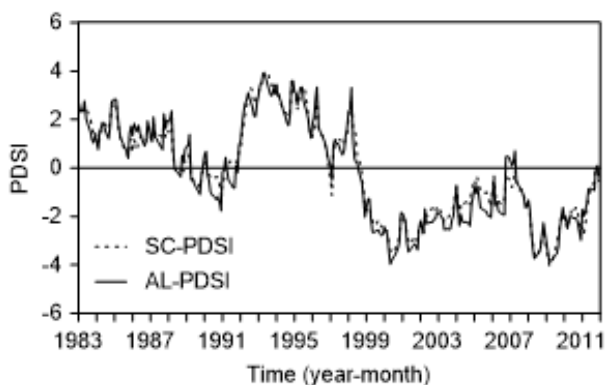


Fig. 2- Time series of monthly average of SC-PDSI (dashed line) and AL-PDSI (solid line) for the period 1983-2011 in Karkheh basin

شکل ۲- سری زمانی میانگین ماهانه شاخص SC-PDSI (خط چین) و AL-PDSI (خط ممتد) برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۳ در حوضه کرخه

شکل ۳ رابطه تداوم و شدت خشکسالی در مورد شاخص SC-PDSI و AL-PDSI را در حوضه کرخه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، شیب خط برازش یافته بر نقاط برای AL-PDSI بیشتر از SC-PDSI است که حاکی از گزارش وقوع خشکسالی‌های شدیدتر به ازای تداوم معین توسط شاخص AL-PDSI در مقایسه با SC-PDSI است. این تفاوت در معادلات سبب می‌شود که ارزیابی ریسک خشکسالی که بر مبنای مشخصه‌های تداوم و شدت خشکسالی انجام می‌شود، به نتایج

مورد نیاز شاخص بر اساس شرایط اقلیمی واستجی می‌شوند. ورودی‌های کد شامل داده‌های دما و بارش ماهانه، میانگین بلندمدت دمای ماهانه، عرض جغرافیایی و ظرفیت نگهداشت آب خاک است. در مورد شاخص AL-PDSI، کد شاخص PDSI به نحوی تعدیل شد که مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حاصل از اجرای طرحواره شامل مقادیر ماهانه واقعی و پتانسیل تبخیر-تعرق، تغذیه، رواناب و تلفات جایگزین مقادیر متناظر آنها در مدل خود واسنج پالمر شود. جدول ۱ طبقه‌بندی شاخص PDSI را نشان می‌دهد.

Table 1- PDSI classification (Palmer, 1965)
جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص PDSI (پالمر، ۱۹۶۵)

PDSI	Class
4 < PDSI	Extremely Wet
3 < PDSI ≤ 4	Severely Wet
2 < PDSI ≤ 3	Moderately Wet
1 < PDSI ≤ 2	Slightly Wet
0.5 < PDSI ≤ 1	Incipient Wet
-0.5 ≤ PDSI ≤ 0.5	Near Normal
-1 ≤ PDSI < -0.5	Incipient Dry
-2 ≤ PDSI < -1	Mild Drought
-3 ≤ PDSI < -2	Moderate Drought
-4 ≤ PDSI < -3	Severe Drought
PDSI < -4	Extreme Drought

در ارزیابی شاخص AL-PDSI علاوه بر مقایسه آن با SC-PDSI از نظر شناسایی رخداد خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها و رابطه تداوم و شدت خشکسالی‌ها، میزان همبستگی با تغییرات پوشش گیاهی و توانایی نمایش تغییرات رطوبت خاک مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مورد پوشش گیاهی، داده‌های نسل سوم شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI3g) گروه مطالعات مدل‌سازی و نقشه‌برداری جهانی استفاده می‌شوند. به دلیل نبود داده‌های مشاهداتی بلندمدت رطوبت خاک، از داده‌های رطوبت خاک نسخه دوم پایگاه داده سامانه جهانی گوارد داده‌های خشکی (GLDAS v.2; Rodell et al., 2004) استفاده می‌شود. این داده‌ها مربوط به لایه یک متری فوقانی خاک بوده و دارای تفکیک مکانی 0.25° هستند و دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۹۸۴ را پوشش می‌دهند. لازم به ذکر است که محاسبات رطوبت خاک در طرحواره ALSIS برای پنج لایه خاک انجام می‌شود که شامل اعماق صفر تا ۵۰ میلی‌متر، ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر، ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و ۱۰۰۰ تا ۱۷۵۰ میلی‌متر است. رطوبت لحاظ شده برای مقایسه با داده‌های رطوبت خاک GLDAS، رطوبت لایه یک متری فوقانی خاک است.

بنابراین، تغییرات فصلی قابل ملاحظه‌تری در فراوانی رخداد خشکسالی توسط AL-PDSI آشکار شده است. تحلیل همبستگی بین شاخص PDSI و شاخص NDVI برای فصل رشد از طریق مقایسه سری‌های زمانی ماهانه PDSI (SC-PDSI و AL-PDSI) و NDVI هر یک از یاخته‌های سطح حوضه کرخه برای ماه‌های آوریل تا سپتامبر بررسی شد. شکل ۵ توزیع مکانی ضریب همبستگی شاخص NDVI و شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI برای ماه‌های آوریل تا سپتامبر برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ نشان می‌دهد.

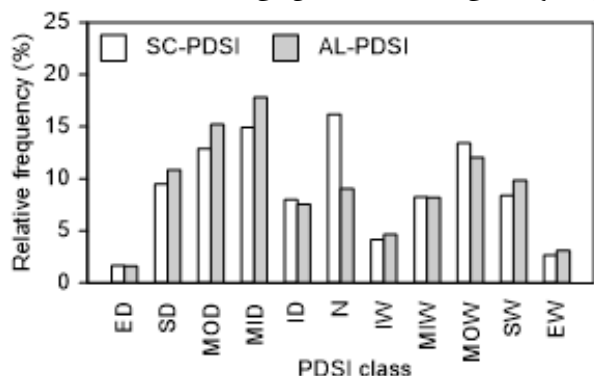


Fig. 4- Relative frequency (percent) of index classes for SC-PDSI (white color) and AL-PDSI (dark color) for the period 1983-2011 in Karkheh basin
 شکل ۴- فراوانی نسبی (درصد) طبقات شاخص SC-PDSI (سفید رنگ) و AL-PDSI (تیره رنگ) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه

Table 2- relative frequency (percent) of drought occurrence based on SC-PDSI and AL-PDSI in Karkheh basin for different seasons (DJF: December- January- February; MAM: March- April- May; JJA: June- July- August; SON: September- October- November)

جدول ۲- فراوانی نسبی (%) رخداد خشکسالی مبتنی بر SC-PDSI و AL-PDSI در حوضه کرخه در فصل‌های مختلف سال (DJF: دسامبر- ژانویه- فوریه؛ MAM: مارس- آوریل- مه؛ JJA: ژوئن- ژوئیه- اوت؛ SON: سپتامبر- اکتبر- نوامبر)

PDSI	Season			
	DJF	MAM	JJA	SON
SC-PDSI	43.97	47.32	46.89	49.69
AL-PDSI	46.73	57.21	60.02	48.28

با توجه به شکل ۵، توزیع زمانی و مکانی ضرایب همبستگی هر دو شاخص SC-PDSI و AL-PDSI با NDVI بسیار متغیر است اما در عین حال، تفاوت کمی بین همبستگی‌های به‌دست آمده بین SC-PDSI و NDVI با همبستگی‌های بین AL-PDSI و NDVI وجود دارد.

متفاوتی برای تداوم یا شدت معین خشکسالی منجر شود (Shahbazi et al., 2015).

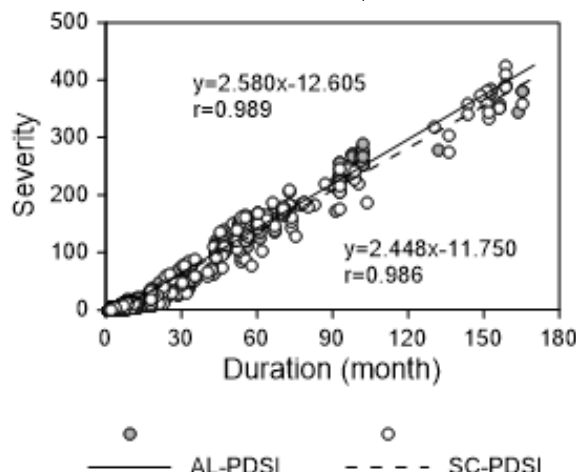


Fig. 3- Relation of drought duration and severity for SC-PDSI (dashed line and light points) and AL-PDSI (solid line and dark points) for the period 1983-2011 in Karkheh basin

شکل ۳- رابطه تداوم و شدت خشکسالی در مورد شاخص SC-PDSI (خط چین و نقاط روشن) و AL-PDSI (خط ممتد و نقاط تیره) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه

توزیع درصد فراوانی نسبی طبقات شاخص SC-PDSI و AL-PDSI در شکل ۴ نشان داده شده است. درصد فراوانی طبقات خشکسالی خفیف، متوسط و شدید بدست آمده برای شاخص AL-PDSI بیشتر از SC-PDSI است. اختلاف درصد فراوانی طبقات خشکسالی شدید، متوسط و خفیف مبتنی بر AL-PDSI نسبت به SC-PDSI، به ترتیب برابر ۱/۳۶، ۲/۳۱ و ۲/۸۹ درصد در کل حوضه کرخه است. به‌طور کلی، فراوانی رخداد خشکسالی مبتنی بر AL-PDSI در حوضه کرخه ۶/۰۹ درصد بیشتر از SC-PDSI است.

جدول ۲ فراوانی نسبی رخداد خشکسالی مبتنی بر SC-PDSI و AL-PDSI را در فصل‌های مختلف سال در حوضه کرخه نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ تغییرات فصلی قابل ملاحظه‌ای در فراوانی نسبی رخداد خشکسالی مبتنی بر شاخص AL-PDSI در مقایسه با SC-PDSI وجود دارد. فراوانی نسبی رخداد خشکسالی مبتنی بر SC-PDSI در فصول مختلف تقریباً نامتغیر است. این امر ناشی از عدم توانایی SC-PDSI در لحاظ کردن تأثیر تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر ترازمندی آب است. تبخیر-تعرق در دوره رشد پوشش گیاهی (ژوئن-سپتامبر) شدیدتر از سایر ماه‌ها است و این مسأله توسط طرحواره سطح زمین در نظر گرفته شده است.

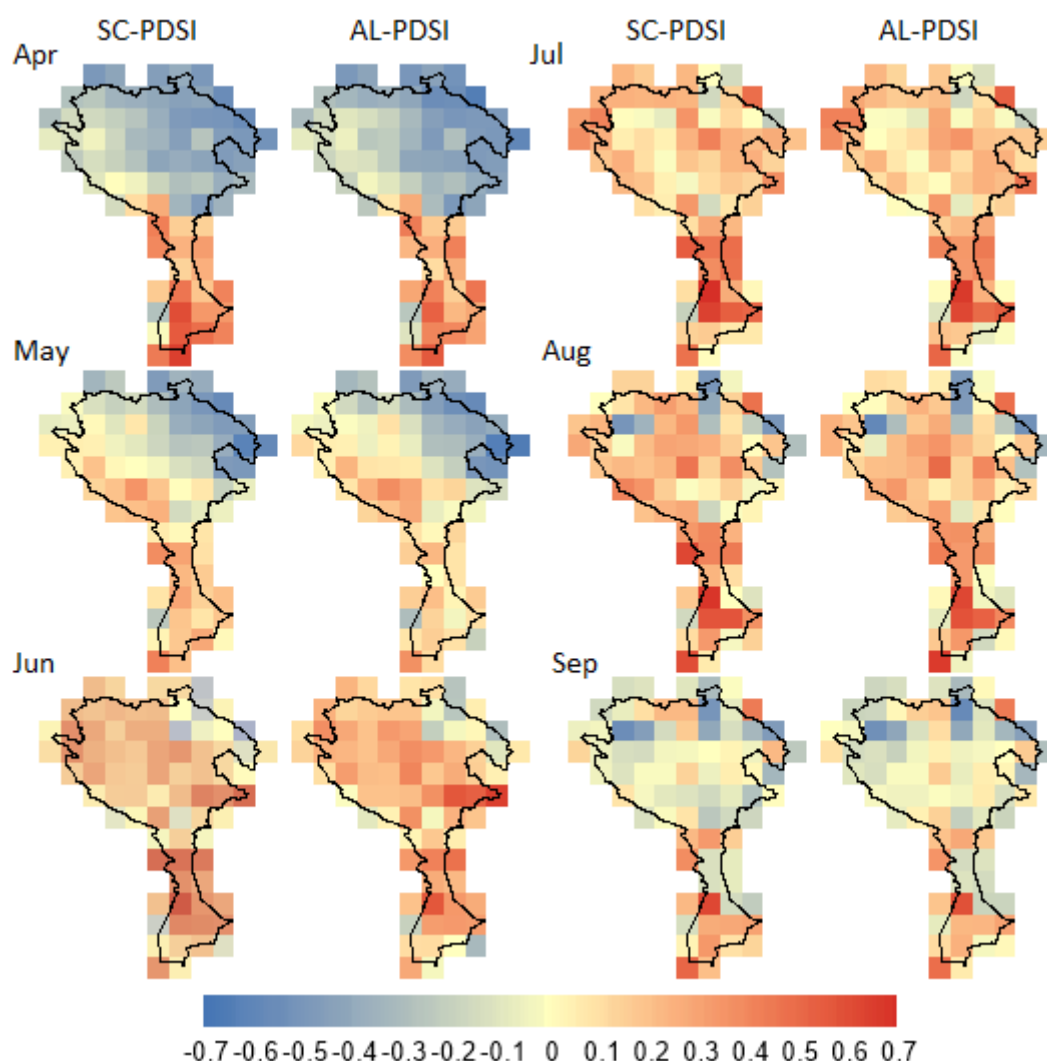


Fig. 5- Spatial distribution of correlation coefficient of NDVI with SC-PDSI and AL-PDSI for April-September for the period 1983-2011

شکل ۵- توزیع مکانی ضریب همبستگی شاخص NDVI و شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI برای ماه‌های آوریل تا سپتامبر ۱۹۸۳-۲۰۱۱ (Apr-Sep) برای دوره زمانی

شکل ۶ تغییرات سالانه شاخص NDVI و ضریب همبستگی NDVI و شاخص SC-PDSI و AL-PDSI را برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه نشان می‌دهد. الگوی فصلی NDVI تک‌نمایی است و بیشینه آن در ماه مه مشاهده می‌شود. مقایسه ضرایب همبستگی NDVI و PDSI با چرخه فنولوژیکی NDVI نشان می‌دهد که رابطه بین وضعیت پوشش گیاهی و موجودی آب به‌طور قابل توجهی در ماه‌های مختلف سال و دوره‌های فنولوژیکی مختلف چرخه رشد پوشش گیاهی متغیر است. بیشترین ضریب همبستگی بین PDSI و NDVI در ژوئن-ژوئیه مشاهده می‌شود نه در ماه مه که پوشش گیاهی بیشترین NDVI را دارد. این نشان می‌دهد که در حوضه کرخه، حساس‌ترین دوره پوشش گیاهی به کمبود آب ماه‌های ژوئن-ژوئیه

دلیل این تفاوت اندک را می‌توان به شباهت رفتار کلی سری‌های زمانی SC-PDSI و AL-PDSI ربط داد. ضریب همبستگی PDSI و NDVI در ابتدا و انتهای فصل رشد بسیار ضعیف است. علت وجود همبستگی‌های قوی منفی در ماه‌های آوریل و مه در بخش کوهستانی حوضه ناشی از عامل دما است. در سال‌های سرد، به دلیل کاهش تبخیر، رطوبت خاک بیشتر است اما پوشش گیاهی کمتر است، لذا با افزایش PDSI شاهد کاهش NDVI هستیم. بیشترین واکنش پوشش گیاهی به موجودی رطوبت طی ماه‌های ژوئن تا اوت است. پس از آن تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی سریعاً کاهش یافته است.

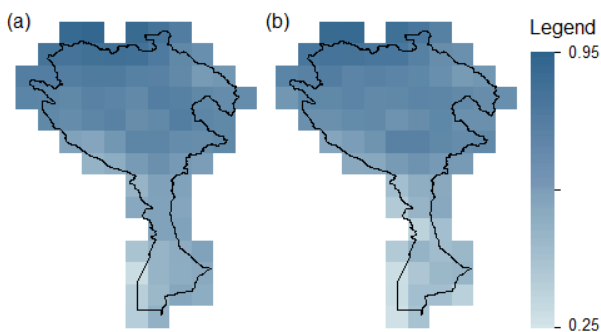


Fig. 7- Spatial distribution of correlation coefficient of annual soil moisture with annual average of a) SC-PDSI and b) AL-PDSI for the period 1983-2011
 شکل ۷- توزیع مکانی ضریب همبستگی رطوبت خاک سالانه و میانگین سالانه شاخص‌های (a) SC-PDSI و (b) AL-PDSI برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱

بررسی نمودار سری زمانی میانگین سالانه شاخص SC-PDSI و AL-PDSI و رطوبت خاک استاندارد شده برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه (شکل ۸) نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی PDSI نمایش مناسبی از تغییرات زمانی رطوبت خاک سالانه را فراهم می‌سازد و شاخص SC-PDSI با اختلاف کمی از AL-PDSI همبستگی بیشتری با تغییرات رطوبت خاک نشان می‌دهد. از آنجایی که داده‌های رطوبت خاک مورد استفاده، از پایگاه داده سامانه جهانی گوارد داده‌های خشکی (GLDAS v.2) گرفته شده‌اند و مبتنی بر مدل هستند، نتیجه‌گیری قطعی در مورد برتری عملکرد هر یک از شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI در نمایش تغییرات رطوبت خاک ممکن نبوده و تنها می‌توان به‌طور کلی توانایی هر دو آنها را تأیید کرد.

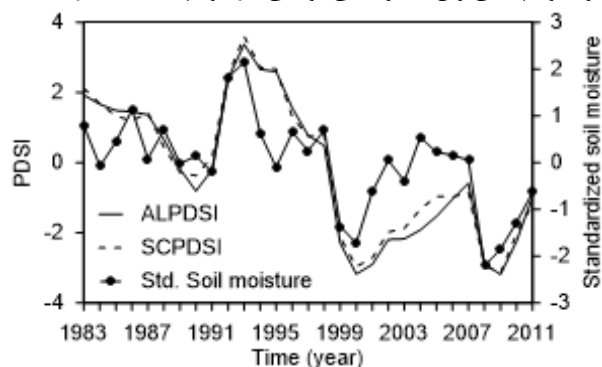


Fig. 8- Time series of annual average of SC-PDSI (dashed line), AL-PDSI (solid line) and standardized soil moisture (solid line with dot) for the period 1983-2011 in Karkheh basin

شکل ۸- سری زمانی میانگین سالانه شاخص SC-PDSI (خط چین)، AL-PDSI (خط ممتد) و رطوبت خاک استاندارد شده (نقطه خط) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه

است. حساس‌ترین دوره به کمبود آب به‌عنوان دوره‌ای تعریف می‌شود که گیاهان بیشترین اثر مفید را از موجودی آب می‌گیرند و خشکسالی بیشترین تأثیر را بر کاهش عملکرد گیاه دارد (Salter and Goode, 1967; Ji and Peters, 2003).

شاخص PDSI به‌عنوان شاخص خوبی از موجودی رطوبت خاک در مقیاس زمانی سالانه و در مقیاس‌های مکانی بزرگ شناخته شده است (Dai, 2011; Dai et al., 2004; Hobbins et al., 2008). با این وجود، Dai et al. (2004) اظهار داشتند که چون مدل ترازمندی آب پالمر فرایند برف و سایر فرایندهای مؤثر بر رطوبت خاک را لحاظ نمی‌کند، نباید به‌عنوان سنجه مستقیم موجودی رطوبت خاک در نظر گرفته شود. با هدف مقایسه عملکرد دو شاخص SC-PDSI و AL-PDSI در نمایش تغییرات زمانی رطوبت خاک، الگوی مکانی ضریب همبستگی SC-PDSI و AL-PDSI با رطوبت خاک در مقیاس زمانی سالانه و همچنین سری‌های زمانی مربوط به شاخص‌های خشکسالی و رطوبت خاک استاندارد شده مقایسه شدند. شکل ۷ توزیع مکانی ضریب همبستگی رطوبت خاک سالانه و شاخص‌های سالانه SC-PDSI و AL-PDSI را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، تفاوت قابل توجهی از نظر همبستگی با رطوبت خاک در مورد شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI وجود ندارد.

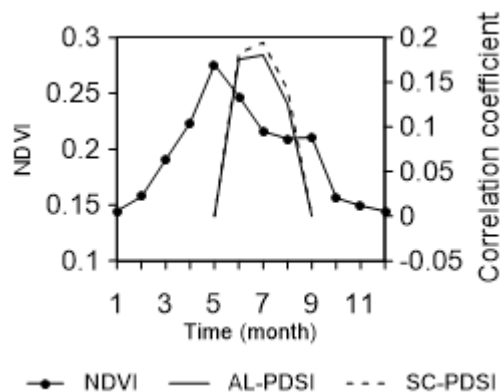


Fig. 6- Regime of annual variation of NDVI (solid line with dot) as well as correlation coefficient of NDVI with SC-PDSI (dashed line) and AL-PDSI (solid line) for the period 1983-2011 in Karkheh basin

شکل ۶- رژیم تغییرات سالانه شاخص NDVI (نقطه خط) و ضریب همبستگی NDVI و شاخص SC-PDSI (خط چین) و AL-PDSI (خط ممتد) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه

کرخه نشان می‌دهند. به علاوه، دو شاخص تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر توزیع مکانی روند ندارند. فرم $dP \neq 0$ که تنها تغییرات بارش در آن لحاظ شده است، تفاوت‌هایی را با فرم اولیه از نظر میزان روند شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI و تعداد یاخته‌های دارای روند معنی‌دار نشان می‌دهد (شکل ۱۰-b و ۱۰-e). کاهش شدت روند در مورد SC-PDSI بیشتر از AL-PDSI است که تا حد زیادی ناشی از حساسیت زیاد مدل تخبیر-تعرق پتانسیل SC-PDSI به تغییرات دما است. در زیرحوضه‌های کشکان و کرخه جنوبی (به ترتیب در مرکز و جنوب حوضه کرخه)، تعداد یاخته‌های دارای روند معنی‌دار در مورد AL-PDSI بیشتر از SC-PDSI است. از آنجایی که در فرم $dP \neq 0$ فقط تغییرات بارش لحاظ شده است، و از طرفی با توجه به شکل ۹ در زیرحوضه کشکان روند معنی‌داری در بارش وجود ندارد، می‌توان نتیجه گرفت که روند SC-PDSI در فرم اولیه ناشی از روند دمای هوا بوده است. در فرم $dT \neq 0$ روند معنی‌دار شاخص SC-PDSI همه یاخته‌های حوضه را شامل شده است (شکل ۱۰-c). در حالی که پاسخ AL-PDSI به فرض $dT \neq 0$ توزیع مکانی یکنواختی نداشته و در برخی یاخته‌ها با افزایش روند شاخص و در برخی یاخته‌ها با کاهش روند AL-PDSI همراه بوده است (شکل ۱۰-f). این امر ناشی از برهمکنش متفاوت متغیرهای واداشت جوی بر اساس طرحواره سطح خشکی در نقاط مختلف حوضه است.

شکل ۱۱ سری زمانی میانگین ماهانه شاخص SC-PDSI و AL-PDSI برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ را در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی (فرم اولیه) و فرم $dP \neq 0$ در حوضه کرخه نشان می‌دهد.

شکل ۹ توزیع مکانی روند خطی بارش و دمای هوای سالانه را برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه نشان می‌دهد. برای بررسی روند، از آزمون ناپارامتری من-کندال در سطح معناداری ۵ درصد استفاده شده است (Mann, 1945; Kendall, 1975). با توجه به شکل، نیمه شمالی حوضه کرخه دارای روندهای کاهشی معنی‌دار در بارش سالانه و روندهای افزایشی معنی‌دار در دمای هوا است. روند بارش و دما در نیمه جنوبی حوضه به‌طور کلی معنی‌دار نیست. برای برآورد تأثیر مستقیم گرمایش جهانی بر روند PDSI، دو فرم دیگر از PDSI محاسبه شد. در فرم اول، غیر از متغیر بارش، به‌جای داده‌های واداشتی، از مقادیر رژیم بلندمدت اقلیمی متغیرهای واداشتی برای هر یاخته استفاده شد. این حالت را با $dP \neq 0$ نشان می‌دهیم چرا که در این حالت روند بارش صفر نیست. در فرم دوم، غیر از متغیر دمای هوا، از مقادیر رژیم بلندمدت اقلیمی سایر متغیرهای واداشتی برای هر یاخته استفاده شد. این حالت را با $dT \neq 0$ نشان می‌دهیم چرا که در این حالت روند دمای هوا صفر نیست. این رهیافت علی‌رغم آگاهی از این که در دنیای واقعی، تغییرات بارش و سایر میدان‌های هواشناسی در پیوند با تغییرات دما هستند، انجام شد. لذا هدف از این تحلیل، اساساً نمایش تأثیر مستقیم گرمایش جهانی اخیر روی PDSI به دلیل تأثیر آن بر تخبیر-تعرق پتانسیل است.

شکل ۱۰ توزیع مکانی روند خطی سالانه شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI را برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی، مورد $dP \neq 0$ و مورد $dT \neq 0$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰-a و ۱۰-d شاخص‌های SC-PDSI و AL-PDSI، علی‌رغم عدم وجود روند بارش و دما در یاخته‌های نیمه جنوبی حوضه، روندهای کاهشی معنی‌داری را تقریباً در همه یاخته‌های سطح حوضه

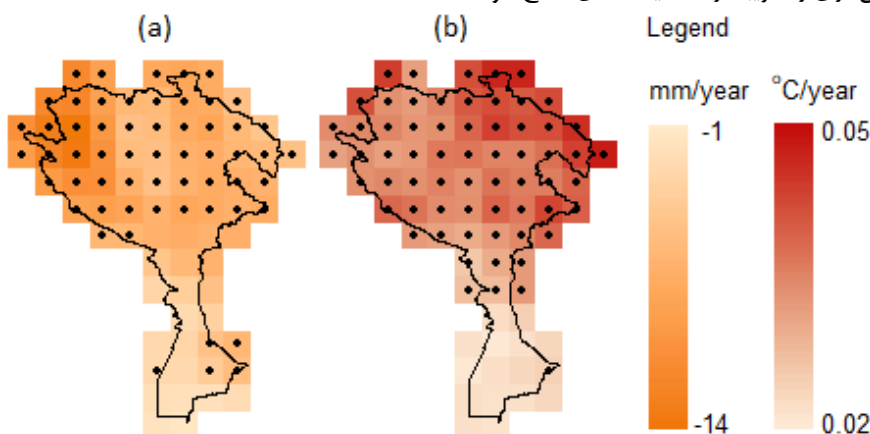


Fig. 9- Spatial distribution of linear trend of annual precipitation (a) and temperature (b) for the period 1983-2011 in Karkheh basin. The significant trends at the 0.05 level are indicated by black dots.

شکل ۹- توزیع مکانی روند خطی سالانه بارش (a) و دمای هوا (b) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حوضه کرخه. روندهای معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۵ درصد با نقاط سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند.

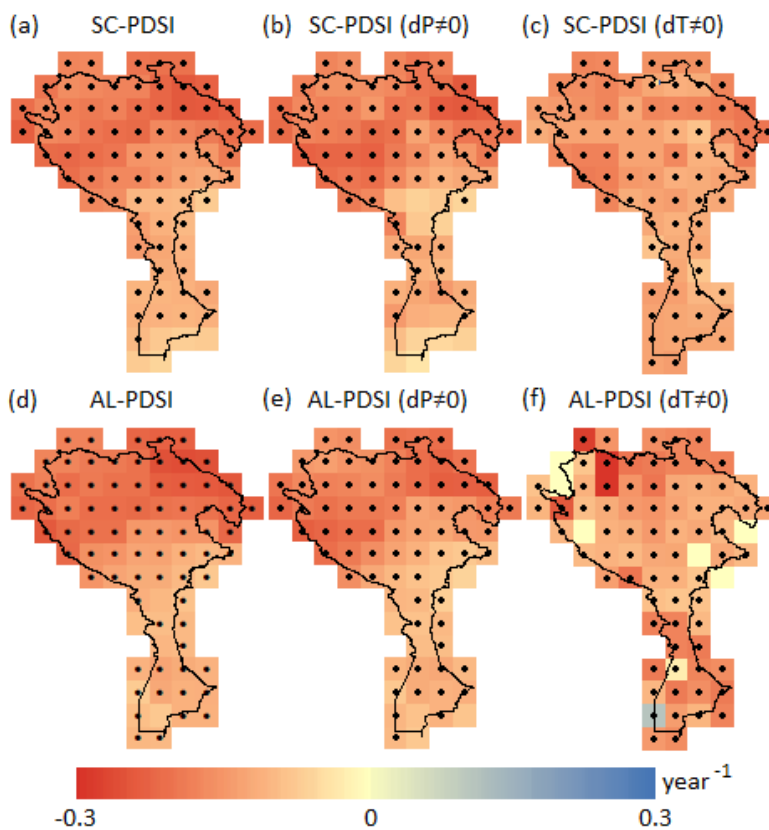


Fig. 10- Spatial distribution of annual linear trend of SC-PDSI (a-c) and AL-PDSI (d-f) for the period 1983-2011 for the case of using all forcing data (left column), case $dP \neq 0$ (middle column) and case $dT \neq 0$ (right column). The significant trends at the 0.05 level are indicated by black dots.

شکل ۱۰- توزیع مکانی روند خطی سالانه شاخص SC-PDSI (a-c) و AL-PDSI (d-f) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی (ستون چپ)، مورد $dP \neq 0$ (ستون وسط) و مورد $dT \neq 0$ (ستون راست). روندهای معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۵ درصد با نقاط سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود که در فرم $dP \neq 0$ که تغییرات دما صفر لحاظ می‌شود، SC-PDSI به سمت مقادیر مثبت حرکت می‌کند. علت این امر، وابستگی تبخیر-تعرق پتانسیل SC-PDSI به دما است که در فرم $dP \neq 0$ اثر دما بر تبخیر-تعرق پتانسیل و در نتیجه شاخص SC-PDSI تخفیف می‌یابد. شکل ۱۲ سری زمانی میانگین ماهانه شاخص SC-PDSI و AL-PDSI را برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی (فرم اولیه) و فرم $dT \neq 0$ در حوضه کرخه نشان می‌دهد. نمودارهای سری زمانی شاخص SC-PDSI و AL-PDSI در فرم $dT \neq 0$ نسبت به فرم $dP \neq 0$ تفاوت‌های بیشتری را نسبت به یکدیگر و نسبت به فرم اولیه نشان می‌دهند. این امر ناشی از پاسخ متفاوت مدل‌های ترازمندی آب SC-PDSI و AL-PDSI به تغییرات دما و همچنین بیانگر حساسیت بیشتر شاخص‌ها به تغییرات دما در مقایسه با تغییرات بارش است. لذا تحلیل ریسک خشکسالی مبتنی بر SC-PDSI و AL-PDSI برای سناریوهای تغییر اقلیم احتمالاً می‌تواند به نتایج کاملاً متفاوتی منجر شود.

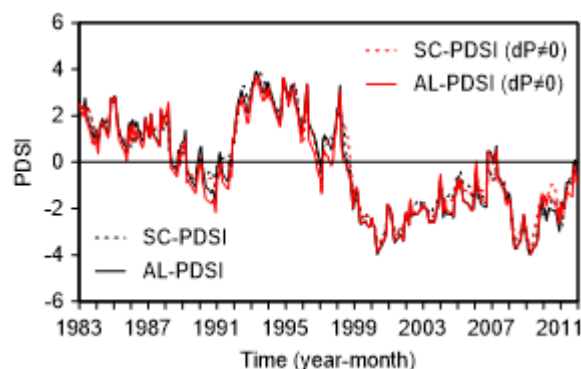


Fig. 11- Time series of monthly average of SC-PDSI (dashed line) and AL-PDSI (solid line) for the period 1983-2011 for the case of using all forcing data (black) and case $dP \neq 0$ (red) in Karkheh basin. شکل ۱۱- سری زمانی میانگین ماهانه شاخص SC-PDSI (خط چین) و AL-PDSI (خط ممتد) برای دوره زمانی ۱۹۸۳-۲۰۱۱ در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی (سیاه رنگ) و مورد $dP \neq 0$ (قرمز رنگ) در حوضه کرخه

مقایسه سری‌های زمانی SC-PDSI و AL-PDSI نشان داد که دو شاخص از نظر شناسایی رخداد خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها رفتار مشابهی را نشان می‌دهند و علی‌رغم تفاوت اندک سری‌های زمانی، AL-PDSI نوسانات زمانی بیشتری را به‌ویژه در مقادیر حدی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که SC-PDSI پاسخ هموارتری را به تغییرات زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نشان می‌دهد. به‌علاوه، تفاوت SC-PDSI و AL-PDSI در رخدادهای خشکسالی بارزتر از رخدادهای ترسالی است. Zhang et al. (2013) نیز نشان دادند که PDSI تعدیل‌شده طرح جامعی از جنبه‌های مختلف خشکسالی شامل تداوم، شدت، فراوانی وقوع و توزیع مکانی آن فراهم می‌سازد. بررسی رابطه تداوم و شدت خشکسالی در مورد شاخص SC-PDSI و AL-PDSI حاکی از گزارش وقوع خشکسالی‌های شدیدتر به ازای تداوم معین توسط شاخص AL-PDSI در مقایسه با SC-PDSI است. این تفاوت سبب می‌شود که ارزیابی ریسک خشکسالی که بر مبنای مشخصه‌های تداوم و شدت خشکسالی انجام می‌شود، به نتایج متفاوتی برای تداوم یا شدت معین خشکسالی منجر شود (Shahbazi et al., 2015). توزیع درصد فراوانی نسبی طبقات شاخص SC-PDSI و AL-PDSI نشان داد که درصد فراوانی طبقات خشکسالی خفیف، متوسط و شدید بدست آمده برای شاخص AL-PDSI بیشتر از SC-PDSI است. تغییرات فصلی قابل ملاحظه‌ای در فراوانی نسبی رخداد خشکسالی مبتنی بر شاخص AL-PDSI در مقایسه با SC-PDSI مشاهده شد؛ در حالی که فراوانی نسبی رخداد خشکسالی مبتنی بر SC-PDSI در فصول مختلف تقریباً نامتغیر بود. این امر ناشی از عدم توانایی SC-PDSI در لحاظ کردن تأثیرات تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر ترازمندی آب است. تبخیر-تعرق در دوره رشد پوشش گیاهی (ژوئن-سپتامبر) شدیدتر از سایر ماه‌ها است و این مسئله توسط طرحواره سطح زمین در نظر گرفته شده است. بنابراین، تغییرات فصلی قابل ملاحظه‌تری در فراوانی رخداد خشکسالی توسط AL-PDSI آشکار شده است. Xu et al. (2012) نیز تغییرات فصلی قابل توجهی را در فراوانی نسبی رخداد خشکسالی بر مبنای PDSI تعدیل شده در مقایسه با PDSI تعدیل نشده نشان دادند. توزیع زمانی و مکانی ضریب همبستگی PDSI و NDVI بسیار متغیر بوده اما SC-PDSI و AL-PDSI تفاوت کمی را نشان دادند. ضریب همبستگی PDSI و NDVI در ابتدا و انتهای فصل رشد بسیار ضعیف بوده و بیشترین واکنش پوشش گیاهی به موجودی رطوبت طی ماه‌های ژوئن تا اوت است. مطابق Xu et al. (2012)، تأثیر خشکسالی روی پوشش گیاهی به دو عامل بستگی دارد. اولین عامل محیط رشد گیاه است. در مناطقی که بارش زیاد است و تقاضای تبخیر کم است، واکنش به خشکسالی کم است. عامل دوم مشخصه‌های فیزیولوژیکی پوشش گیاهی است. ریشه‌های کم‌عمق‌تر توانایی کمی

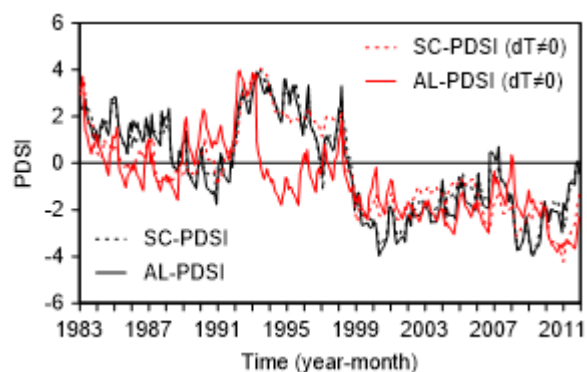


Fig. 12- Time series of monthly average of SC-PDSI (dashed line) and AL-PDSI (solid line) for the period 1983-2011 for the case of using all forcing data (black) and case $dT \neq 0$ (red) in Karkheh basin
 شکل ۱۲- سری زمانی میانگین ماهانه شاخص SC-PDSI (خط چین) و AL-PDSI (خط ممتد) برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۳ در حالت استفاده از همه داده‌های واداشتی (سیاه رنگ) و مورد $dT \neq 0$ (قرمز رنگ) در حوضه کرخه

۴- خلاصه و جمع‌بندی

با هدف بهبود برآورد مؤلفه‌های ترازمندی آب مورد نیاز برای محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، تأثیر حاصل از جایگزین کردن طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (ALSIS) به جای مدل ترازمندی آب پالم در حوضه آبریز کرخه مورد بررسی قرار گرفت. Hejabi et al. (2017) نشان دادند که طرحواره ALSIS توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی رژیم ماهانه مؤلفه‌های ترازمندی آب داشته و می‌توان از آن در مطالعات مبتنی بر مؤلفه‌های ترازمندی آب، مانند محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، استفاده کرد. در این مطالعه، مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حاصل از اجرای طرحواره ALSIS برای محاسبه شاخص تعدیل شده PDSI (AL-PDSI) در حوضه کرخه استفاده شدند. به‌علاوه، شاخص PDSI بر اساس نسخه اصلی مدل ترازمندی آب پالم و الگوریتم شاخص شدت خشکسالی خودواستج پالم (SC-PDSI) محاسبه شد. در مقایسه با مطالعاتی که تنها اثر بهبود یک یا دو مؤلفه هیدرولوژیکی را بر شاخص PDSI بررسی کرده بودند (برای مثال، Ojaghloo Shahabi et al., 2013; Shahbazi et al., 2015) ترکیب طرحواره ALSIS و PDSI تأثیر متقابل همه مؤلفه‌های هیدرولوژیکی را روی خشکسالی لحاظ می‌کند. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات Xu et al. (2012)، Zhang et al. (2013) و Yan et al. (2013) که از مدل‌های هیدرولوژیکی برای برآورد مؤلفه‌های ترازمندی آب استفاده کردند، نشان می‌دهد که استفاده از طرحواره ALSIS نیز می‌تواند سبب بهبود سازوکار فیزیکی PDSI و در نتیجه توسعه دامنه کاربرد آن شود.

20. Climate and Vegetation Research Group
21. Global Inventory Modeling and Mapping Studies
22. Harmonized World Soil Database
23. Monin-Obukhov Stability Parameter
24. Warm-Up Period
25. Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index
26. Weekly Crop Moisture Index

۵- مراجع

- Alley WM (1984) The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23(7):1100-1109
- Arnold JG, Fohrer N (1998) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19(3):563-572
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89
- Arshad S, Morid S, Mobasheri MR, Alikhani MA, Arshad S (2013) Monitoring and forecasting drought impact on dryland farming areas. *International Journal of Climatology* 33:2068-2081
- Azadi S, Soltani Kopaei S, Faramarzi M, Soltani Tudeshki A, Pourmanafi S (2015) Evaluation of Palmer drought severity index in central Iran. *Journal of Water and Soil Science* 19(72):305-319 (In Persian)
- Babaei H, Araghinejad S, Hoorfar A (2013) Developing a new method for spatial assessment of drought vulnerability (case study: Zayandeh Rood river basin in Iran). *Water and Environment Journal* 27:50-57
- Blaney HF, Criddle WD (1962) Determining consumptive use and irrigation water requirements. US Department of Agriculture
- Dai A (2011) Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900-2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116:D12115
- Dai A, Trenberth KE, Qian T (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
- Hansen M, DeFries R, Townshend JR, Sohlberg R (1998) UMD global land cover classification, 8 kilometers, 1.0. Department of Geography, University of Maryland, College Park, Maryland
- Hejabi S, Bazrafshan J, Irannejad P, Araghinejad S, Ghader S (2017) Application of Atmosphere-Land

در جذب آب دارند. بنابراین، به بارش حساس تر هستند و رشد آنها به خشکسالی واکنش بیشتری نشان می‌دهد. مقایسه ضرایب همبستگی NDVI و PDSI با چرخه فنولوژیکی NDVI نشان داد که رابطه بین وضعیت پوشش گیاهی و موجودی آب به طور قابل توجهی در ماه‌های مختلف سال و دوره‌های فنولوژیکی مختلف چرخه رشد پوشش گیاهی متغیر است. بیشترین ضریب همبستگی بین PDSI و NDVI در ژوئن-ژوئیه مشاهده شد نه در ماه مه که پوشش گیاهی بیشترین NDVI را دارد. این نشان می‌دهد که در حوضه کرخه، حساس‌ترین دوره پوشش گیاهی به کمبود آب ماه‌های ژوئن-ژوئیه است. از نظر همبستگی با رطوبت خاک تفاوت قابل توجهی در مورد شاخص‌های PDSI و SC-PDSI وجود نداشت. شاخص خشکسالی PDSI نمایش مناسبی از تغییرات زمانی رطوبت خاک سالانه را فراهم ساخته و شاخص SC-PDSI با اختلاف کمی از AL-PDSI همبستگی بیشتری با تغییرات رطوبت خاک نشان داد. برای برآورد تأثیر مستقیم گرمایش جهانی بر روند PDSI، دو فرم دیگر از PDSI به نام $dP \neq 0$ و $dT \neq 0$ بررسی شد. سری زمانی شاخص SC-PDSI و AL-PDSI در فرم $dT \neq 0$ نسبت به فرم $dP \neq 0$ تفاوت‌های بیشتری را نسبت به یکدیگر و نسبت به فرم اولیه نشان دادند. در تأیید نتایج Dai (2011)، با توجه به حساسیت زیاد شاخص‌ها به تغییرات دما، تحلیل ریسک خشکسالی مبتنی بر AL-PDSI و SC-PDSI برای سناریوهای تغییر اقلیم می‌تواند به نتایج کاملاً متفاوتی منجر شود. سازوکار فیزیکی تر PDSI تعدیل شده زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و پویایی پوشش گیاهی را روی روند و مشخصه‌های خشکسالی در پژوهش‌های آبی فراهم می‌سازد.

پی‌نوشت‌ها

1. Climatically Appropriate For Existing Conditions
2. Palmer Drought Severity Index
3. Irrigation Scheduling Simulation Model
4. Soil and Water Assessment Tool
5. Luanhe
6. Physically Based Palmer Drought Severity Index
7. Normalized Difference Vegetation Index
8. Variable Infiltration Capacity
9. Geographic Information System
10. Drought Assessment Index
11. Atmosphere-Land-Surface Interaction Scheme
12. Stand-Alone
13. Darcy-Buckingham
14. Fourier's Law
15. Climate Forecast System Reanalysis
16. National Centers for Environmental Prediction
17. National Centers for Environmental Information
18. Global Land Data Assimilation System
19. Leaf Area Index

- Monteith J (1965) Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19:205-234
- Ojaghloo Shahabi S, Vazifedoust M, Ashrafzadeh A, Pirmoradian N, Keshavar M (2013) Assimilation of evapotranspiration maps derived from Modis satellite data into the Palmer distributed soil moisture model. *Journal of Agricultural Meteorology* 1(1):49-61 (In Persian)
- Palmer WC (1965) Meteorological drought. US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, DC, USA
- Pereira LS, Rosa RD, Paulo AA (2007) Testing a modification of the Palmer drought severity index for Mediterranean environments. *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*, Springer, pp.149-167
- Pereira LS, Teodoro P, Rodrigues P, Teixeira J (2003) Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. *Tools for drought mitigation in Mediterranean regions*, Springer, pp.161-180
- Qiu S (2013) Improving the Palmer drought severity index by incorporating snow and frozen ground. The University of North Dakota
- Rodell M, Houser PR, Jambor U, Gottschalck J, Mitchell K, Meng CJ, Arsenault K, Cosgrove B, Radakovich J, Bosilovich M, Entin JK, Walker JP, Lohmann D, Toll D (2004) The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85:381
- Saha S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D (2010) The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(8):1015
- Salter PJ, Goode JE (1967) Crop responses to water at different stages of growth. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK
- Shahbazi S (2014) Analysis and regional monitoring of droughts from agrometeorological point of view using Palmer index in the west of Iran. Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran (In Persian)
- Shahbazi S, Bazrafshan J, Irannejad P, Sohrabi T (2015) Palmer Drought Severity Index's calibration under the climatic conditions of arid and semiarid regions of the West and South West of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(5):23-44 (In Persian)
- Sheffield J, Wood EF, Roderick ML (2012) Little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491(7424):435-438
- Surface Interaction Scheme (ALSIS) in simulating the streamflow with emphasis on the spatial heterogeneity of land surface in sub-grid scale (Case study: Karkheh river basin). *Journal of Agricultural Meteorology* (Accepted for publication in the next issue) (In Persian)
- Hobbins MT, Dai A, Roderick ML, Farquhar GD (2008) Revisiting the parameterization of potential evaporation as a driver of long-term water balance trends. *Geophysical Research Letters* 35(12)
- Horváth S, Szép IJ, Makra L, Mika J, Pajtók-Tari I, Utasi Z (2010) Effect of evapotranspiration parameterization on the Palmer drought severity index. *Physics and Chemistry of the Earth* 35(1):11-18
- Irannejad P, Shao Y (1998) Description and validation of the atmosphere-land-surface interaction scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. *Global and Planetary Change* 19:87-114
- Ji L, Peters AJ (2003) Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment* 87:85-98
- Karamouz M, Nazif S, Ahmadi A (2013) Development of integrated drought evaluation and monitoring system: Case study of Aharchay River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering* 18:897-910
- Karamouz M, Rasouli K, Nazif S (2009) Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *Journal of Hydrologic Engineering* 14:617-627
- Karamouz M, Torabi S, Araghinejad S (2004) Analysis of hydrologic and agricultural droughts in central part of Iran. *Journal of Hydrologic Engineering* 9:402-414
- Karl T, Knight RW (1985) Atlas of monthly Palmer hydrological drought indices (1931-1983) for the contiguous United States. National Climatic Data Center
- Kendall SM (1975) Rank Correlation Methods. Griffin, Oxford, England
- Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, Burges SJ (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 99(7):14415-14428
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13(3):245-259
- Mishra AK, Singh VP (2010) A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1):202-216

- Yan D, Shi X, Yang Z, Li Y, Zhao K, Yuan Y (2013) Modified Palmer drought severity index based on distributed hydrological simulation. *Mathematical Problems in Engineering* 2013
- Zhang B, Wu P, Zhao X, Wang Y, Gao X, Cao X (2013) A drought hazard assessment index based on the VIC-PDSI model and its application on the Loess Plateau, China. *Theoretical and Applied Climatology* 114(1):125-138
- Zhu Z, Bi J, Pan Y, Ganguly S, Anav A, Xu L, Samanta A, Piao S, Nemani RR, Myneni RB (2013) Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing* 5(2):927-948
- Zoljoodi M, Didevarasl A (2013) Evaluation of spatial-temporal variability of drought events in Iran using Palmer drought severity index and its principal factors (through 1951-2005). *Atmospheric and Climate Sciences* 3(2):193-207
- Teixeira J, Pereira L (1992) ISAREG, an irrigation scheduling model. *International Commission on Irrigation & Drainage Bulletin* 41(2):29-48
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geography Review* 38(1):55-94
- van der Schrier G, Jones P, Briffa K (2011) The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116(D3)
- Wells N, Goddard S, Hayes MJ (2004) A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate* 17:2335-2351
- Wieder W, Boehnert J, Bonan G, Langseth M (2014) RegridDED harmonized world soil database v1. 2. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>], Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA
- Xu J, Ren LL, Ruan XH, Liu XF, Yuan F (2012) Development of a physically based PDSI and its application for assessing the vegetation response to drought in northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D8)