



کاربرد آنالیز همبستگی موجک در بررسی همبستگی داده‌های سری زمانی رطوبت خاک و شاخص شدت خشکسالی پالم

مهدی رحمتی^{۱*}، یانیس گروح^۲، الکساندر گراف^۳، توماس پوتز^۴ و هری وریکین^۲
^۱ استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه
^۲ موسسه اگروسفر، مرکز تحقیقات یولیش، یولیش، آلمان

چکیده

خشکسالی از جمله مخاطرات طبیعی است که می‌تواند جنبه‌های مختلفی از جامعه انسانی را تحت تاثیر قرار دهد. شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) از جمله شاخص‌های شناخته شده برای پایش خشکسالی در یک منطقه است. از طرفی، محتوای آب خاک (SWC) یکی از مهمترین عوامل کلیدی است که شدت خشکسالی که گیاهان با آن مواجه می‌شوند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا در این تحقیق، همبستگی بین شاخص PDSI و SWC با استفاده از تکنیک آنالیز همبستگی موجک بررسی شد تا ضمن بررسی همبستگی آنها در دامنه‌های زمانی و فرکانس مختلف، وجود یا عدم وجود تاخیر فاز در بین آنها نیز بررسی شود. برای این کار از داده‌های سری زمانی SWC و PDSI در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ ثبت شده در ایستگاه Selhausen آلمان استفاده شد. نتایج نشان داد که بالاترین همبستگی ($R^2 = 0/8$) موجود بین SWC و PDSI در دامنه فرکانس فصلی به دست آمده که به صورت مثبت و بدون تاخیر با یکدیگر مرتبط بودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تکنیک ارزیابی همبستگی موجک به خوبی قادر به بررسی شدت و ضعف همبستگی بین شاخص‌های SWC و PDSI در تمامی دامنه‌های زمانی و فرکانس و همچنین وجود یا عدم وجود تاخیر فاز بین آنها می‌باشد. لذا توصیه می‌شود در تحقیقات آتی به جای بررسی همبستگی ساده بین داده‌های سری زمانی، از تکنیک آنالیز همبستگی موجک برای این منظور استفاده شود.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، شاخص خشکسالی پالم، همبستگی پیرسون، تبدیل موجک

مقدمه

خشکسالی یک تهدید طبیعی و مخرب است که بر عناصر سیاسی، اجتماعی و اقتصادی جامعه تأثیر می‌گذارد (Wilhite and Buchanan- ۲۰۰۵؛ Chen و همکاران ۲۰۱۲). خشکسالی یک پدیده آب و هوایی برگشت پذیر است و یکی از پیچیده‌ترین و کمتر شناخته شده‌ترین خطرات مربوط به آب و هوا می‌باشد (Wu and Chen ۲۰۱۳). با توجه به گزارش Rossato و همکاران (۲۰۱۷)، یک دوره خشک طولانی مدت که منجر به کمبود آب در خاک شود به عنوان دوره خشکسالی یاد می‌شود. خشکسالی معمولاً با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و داده‌های اندازه‌گیری شده بارش، دما و تبخیر و تعرق بررسی و ارزیابی می‌شود. با این حال، اکثر کشورهای در حال توسعه در اکثر مناطق با مشکل عدم ثبت اطلاعات زمین به دلیل کمبود ایستگاه‌های آب و هوا مواجه هستند. اطلاعات موجود همچنین میانگین بلندمدت منطقه را بیان می‌کند که منجر به پایش خشکسالی در مقیاس زمانی بزرگتر می‌شود که نمی‌تواند به اندازه کافی دقیق باشد. شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) (Palmer ۱۹۶۵) یکی از شاخص‌های کلاسیک و شناخته شده برای پایش خشکسالی است که در ایالات متحده و سایر کشورها استفاده می‌شود (Tatli and Türkeş ۲۰۱۱، Byun and Wilhite ۱۹۹۹). در واقع PDSI شاخص الگوریتم رطوبت خاک است که از داده‌های سری زمانی میانگین ماهانه یا هفتگی درجه حرارت، کل بارندگی، رطوبت خاک و تبخیر تعرق بالقوه برای محاسبه شاخص خشکسالی استفاده می‌کند (Palmer ۱۹۶۵). به عبارت دیگر، الگوریتم PDSI خاک را به لایه‌های سطح و زیر سطحی تقسیم می‌کند که به ترتیب ۲۵ و ۷۵ درصد از ظرفیت آب موجود در خاک را نشان می‌دهند. این الگوریتم فرض می‌کند که تبخیر آب لایه زیر سطحی تنها زمانی شروع می‌شود که کل آب لایه سطحی تبخیر شده باشد. بنابراین، Palmer (۱۹۶۵) پیشنهاد کرد که بارش‌های مشاهده شده در یک ماه را با بارش مورد انتظار برای یک دوره مشابه مقایسه کنید تا ابعاد خشکی ماهانه را محاسبه کنید.

* ایمیل نویسنده مسئول: mehdirmti@gmail.com



در میان متغیرهای مختلف هیدرولوژیکی، محتوای آب خاک (SWC) یکی از عوامل کلیدی برای کنترل اثرات خشکسالی بر روی گیاهان (Rossato و همکاران ۲۰۱۷) و شدت آن (Drisy و همکاران ۲۰۱۸) می‌باشد. در واقع، SWC یکی از مهمترین اجزای معادله بیلان آب خاک در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی است (Rahmati و همکاران ۲۰۱۵، Davenport و همکاران ۲۰۰۵) و یک پارامتر حیاتی برای اندازه‌گیری اجزای دیگر معادله بیلان آب خاک از جمله نفوذ، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی می‌باشد (Davenport و همکاران ۲۰۰۵). Sridhar و همکاران (۲۰۰۸) با توسعه شاخص رطوبت خاک (SMI) تأثیر محتوای آب خاک بر شدت خشکسالی را مورد بررسی قرار داد. نتایج آنها نشان داد که تأثیر محتوای آب خاک بر خشکسالی بسیار زیاد است. اخیراً، گزارش Rossato و همکاران (۲۰۱۷) ارتباطات بین محتوای آب خاک و شاخص PDSI را به منظور بررسی تأثیر محتوای آب خاک بر خشکسالی را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج آنها نشان داد که PDSI به طور مستقیم با الگوهای آب و هوایی بارش و محتوای آب خاک در هر مقیاس فضایی و زمانی همبستگی دارد. با این وجود، در اکثر تحقیقات انجام شده در گذشته اکثراً از تجزیه و تحلیل همبستگی معمولی و رگرسیونی برای بررسی روابط بین رطوبت خاک و شاخص‌های مختلف خشکسالی استفاده شده است که قادر به ارائه اطلاعات کافی برای تحلیل تأخیر فازی بین دو سری داده و همچنین همبستگی آنها در فرکانس‌های مختلف نمی‌باشند. برخلاف همبستگی عادی و تحلیل رگرسیون، هر دو پارامتر شدت و تأخیر در همبستگی بین دو مجموعه داده‌های سری زمانی با استفاده از تحلیل همبستگی موجک برای هر نقطه در دامنه زمان و فرکانس قابل اندازه‌گیری است (Graf و همکاران ۲۰۱۴). لذا، پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه بین SWC و شاخص خشکسالی PDSI با استفاده از داده‌های SWC اندازه‌گیری شده با TDR انجام شد. در این راستا، تبدیل موجک پیوسته برای بررسی همبستگی بین SWC و PDSI به جای استفاده از تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون معمولی مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

برای انجام تحقیق حاضر از داده‌های سری زمانی سایت آزمایشگاهی Selhausen ($50^{\circ}52'7''N$, $6^{\circ}26'58''E$) واقع در آلمان استفاده شد. سه ایستگاه لایسیمتر برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی (AET) و SWC در ایستگاه Selhausen در ارتفاع ۱۰۴ متر نصب شده است که به طور گسترده به عنوان چمنزار با ۳ تا ۴ برداشت در هر فصل مدیریت می‌شوند. تمام لایسیمترهای نصب شده دارای ۱ متر مربع سطح مقطع و ۱/۵ متر عمق می‌باشند. داده‌های سری زمانی در ایستگاه Selhausen از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۸/۱۲/۳۱ در مجموع به تعداد ۱۴۶۲ روز بر اساس فراهم بودن داده‌های SWC محدود شده است. مقادیر SWC لایسیمترها در سه عمق مختلف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر با استفاده از TDR با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شده است و در نهایت به صورت میانگین برای مقادیر میانگین روزانه محاسبه شده‌اند. داده‌های هواشناسی ساعتی شامل دما و سرعت باد در ارتفاع ۲ متر و همچنین رطوبت نسبی، فشار هوا، تابش خورشید و بارش بود که در ایستگاه هواشناسی منطقه اندازه‌گیری شده بود. در نهایت، ابزار PDSI ارائه شده توسط Jacobi و همکاران (۲۰۱۳) و اصلاح شده توسط Ficklin و همکاران (۲۰۱۵) برای محاسبه شاخص ماهانه PDSI با استفاده از روش Thornthwaite and Mather (۱۹۵۵) برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل مورد استفاده قرار گرفت. تبدیل پیوسته همبستگی موجک (Si) (۲۰۰۸) برای اندازه‌گیری شدت و تأخیر همبستگی بین SWC و شاخص PDSI برای هر نقطه در دامنه زمان و فرکانس استفاده شد. بسته نرم افزاری شرح داده شده در Grinsted و همکاران (۲۰۰۴) برای انجام تجزیه و تحلیل همبستگی موجک مورد استفاده قرار گرفت. موجک پیوسته مدول غیر متعامد Morlet بر اساس توصیه‌های صورت گرفته در تحقیقات قبلی (Grinsted و همکاران ۲۰۰۴، Graf و همکاران ۲۰۱۴) به عنوان تابع مادر موجک استفاده شد.

نتایج و بحث

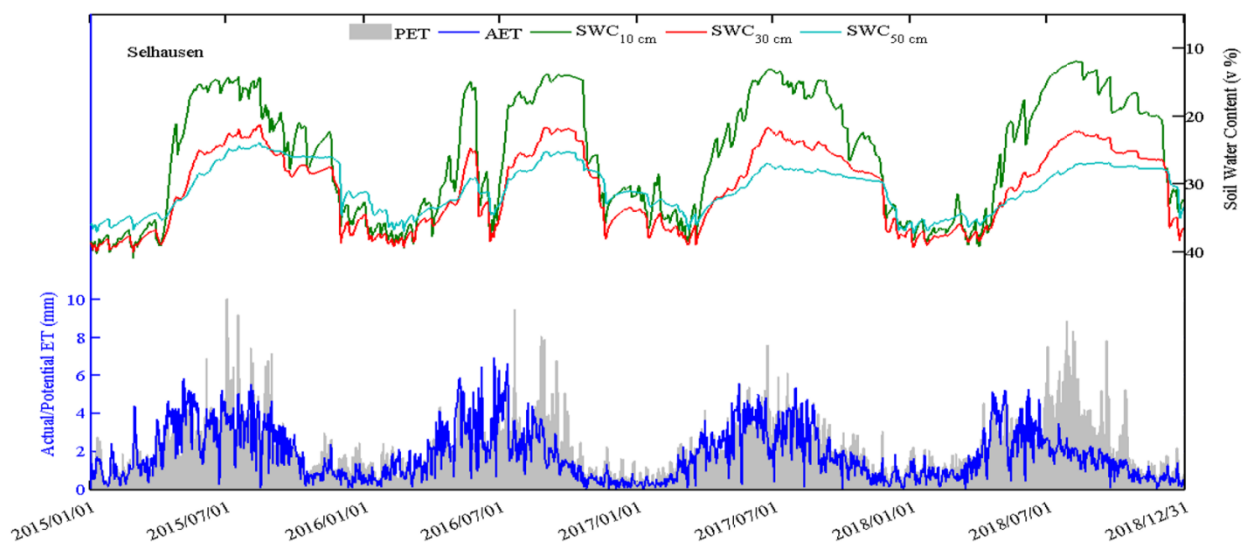
شکل ۱ داده‌های سری زمانی PET، AET و SWC را در عمق‌های مختلف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر برای ایستگاه Selhausen نشان می‌دهد. از آنجایی که مقادیر AET و SWC در ایستگاه Selhausen در ۳ لایسیمتر اندازه‌گیری شد است، متوسط آنها برای ایجاد یک دید کلی از ایستگاه در آنالیزها استفاده شد. ارتباط نزدیکی بین مقادیر AET و PET به غیر از تابستان و زمستان سال ۲۰۱۸ وجود دارد که نشان‌دهنده این است که مقادیر AET پایین در تابستان ۲۰۱۸ عمدتاً در اثر محدودیت آب بوده و به محدودیت انرژی ارتباطی ندارد. این نتیجه با توجه به مقادیر پایین آب خاک در این دوره تایید می‌شود. شکل ۲ همچنین نشان می‌دهد که SWC خاک سطح (۱۰ سانتی متر) حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات فصلی شرایط آب و هوایی را در مقایسه با دو عمق دیگر (۳۰ و ۵۰ سانتی متر) نشان می‌دهد.

به منظور بررسی شدت خشکسالی در ایستگاه مورد مطالعه، شاخص PDSI نیز محاسبه شد (شکل ۲). نتایج PDSI نیز نشان می‌دهد که کمترین مقدار PDSI برای سال ۲۰۱۸ با مقدار PDSI پایین تر از ۲- به دست آمده است. با توجه به شاخص PDSI،

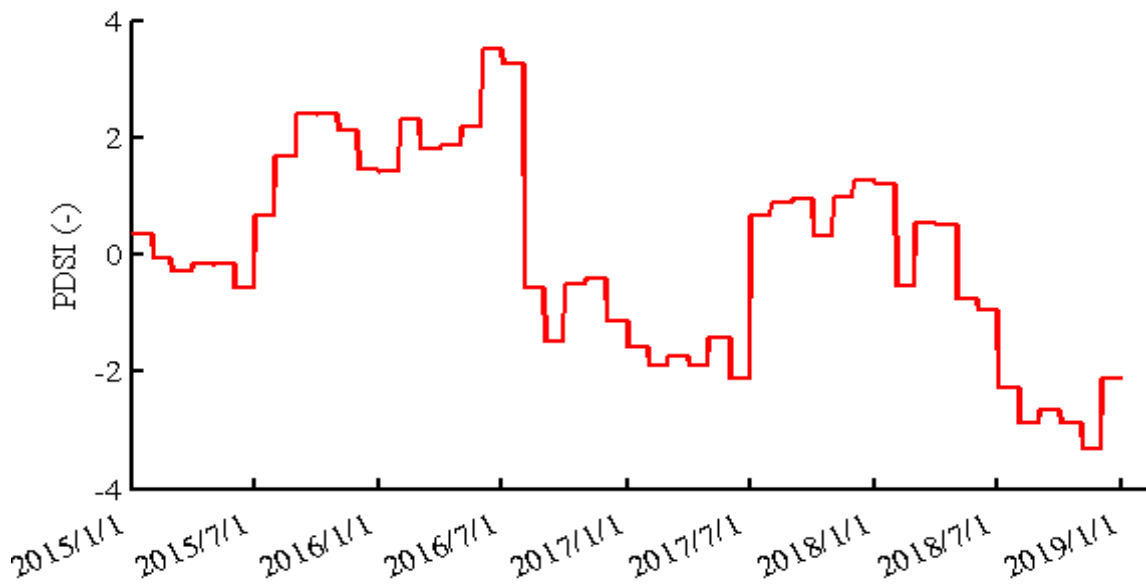
مقادیر PDSI پایین تر نشان دهنده بیشتر بودن شدت خشکسالی است که گیاهان تجربه می کنند. نتایج نشان می دهد که ماه جولای ($PDSI = -2/29$) و نوامبر ($PDSI = -3/31$) ۲۰۱۸ خشک ترین ماه در ایستگاه Selhausen از سال ۲۰۱۵ می باشد.

همبستگی بین متوسط محتوای رطوبت خاک در سه عمق و شاخص PDSI در کل دامنه زمانی و فرکانس در شکل ۳ گزارش شده است. همچنین متوسط همبستگی و تاخیر زمانی موجود بین متوسط محتوای رطوبت خاک در سه عمق و شاخص PDSI تمامی زمانها و فرکانسها در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، بالاترین همبستگی موجود بین SWC و PDSI اغلب در دامنه فرکانسی ۳ تا ۴ ماه اتفاق می افتد که نشان دهنده تغییرات آنها در دامنه فصلی می باشد. این مورد به خوبی در شکل ۴-C نیز نمایش داده شده است به طوری که بالاترین همبستگی بین SWC و PDSI (با مقدار R^2 برابر ۰/۸) در دامنه فرکانسی ۱۲۸ روز به دست آمده است. این مورد به خوبی با فرضیات به کار رفته در الگوریتم PDSI همسو می باشد. زیرا در محاسبه شاخص PDSI عقیده بر این است که میزان کل بارش مورد نیاز برای تحت تاثیر قرار نگرفتن یک منطقه از خشکسالی در یک دوره زمانی خاص به شرایط آب و هوایی ماههای گذشته و همچنین ماه جاری بستگی دارد (Rossato و همکاران ۲۰۱۷). جهت فلش های راست گرا در این محدوده نشان دهنده عدم وجود تاخیر فاز در بین دو پارامتر فوق می باشد که نشان می دهد تغییرات هر دو متغیر به صورت همزمان اتفاق می افتد. مورد اخیر نیز در شکل ۴-D به خوبی نشان می دهد که تا فرکانس های زمانی حدود ۲۰۰ روز، میزان تاخیر فاز موجود در بین SWC و PDSI تقریباً صفر می باشد. شکل ۴-A نیز نشان می دهد که متوسط همبستگی بین شاخص SWC و PDSI در دامنه های فرکانس مختلف که برای روزهای مختلف انجام تحقیق به دست آمده است بین ۰/۶ تا حدود ۰/۲ در نوسان است. بالاترین مقدار همبستگی بین دو پارامتر فوق در اواخر سال ۲۰۱۸ مشاهده شده است که به صورت مثبت گزارش شده است به طوری که با کاهش رطوبت خاک، مقادیر پایینی برای شاخص PDSI حاصل شده است که نشان دهنده شدیدتر شدن خشکسالی در منطقه برای روزهای فوق است. شکل ۴-B نیز متوسط تاخیر فازهای موجود بین SWC و PDSI حاصل از تمامی دامنه های فرکانسی برای تمامی روزها را نشان می دهد. تاخیرهای زمانی منفی نشان دهنده این است که تغییرات شاخص SWC با یک تاخیر فاز برابر با تعداد روزهای گزارش شده در پشت سر شاخص PDSI اتفاق می افتد در حالی که تاخیرهای مثبت نشان دهنده رخ داد تغییرات PDSI در پشت سر تغییرات SWC می باشد.

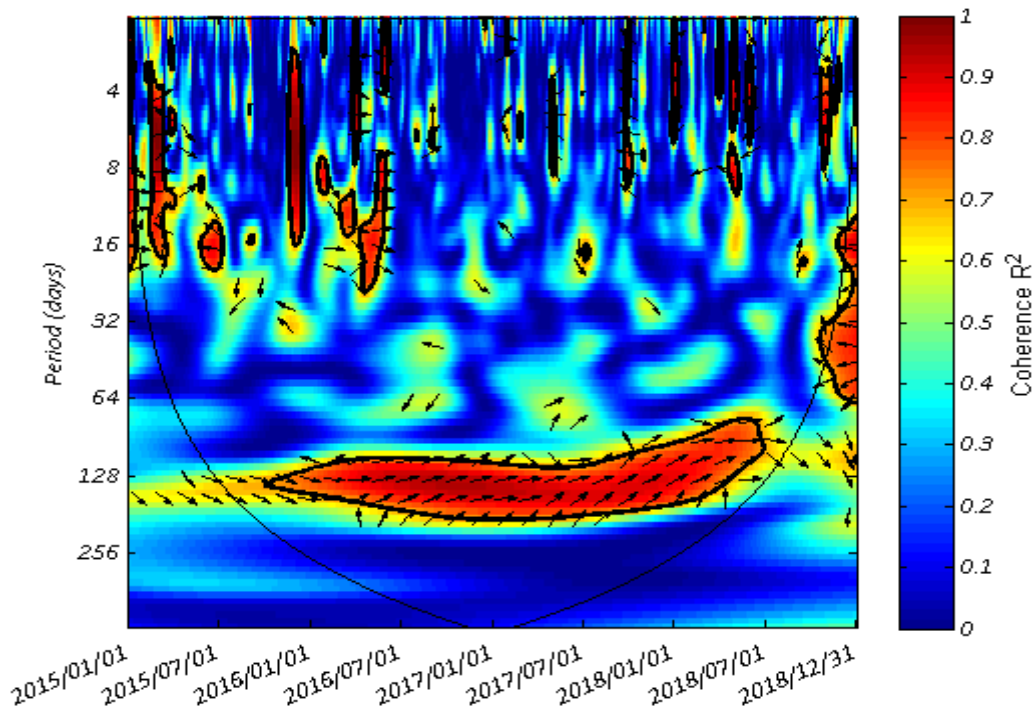
همبستگی مثبت و بالای بین SWC و PDSI توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است. به عنوان مثال، Rossato و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی همبستگی عادی بین SWC و PDSI برای کل قلمرو برزیل در طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۵ نشان داد که همبستگی مثبت و معنی داری بین آنها وجود دارد. نتایج مشابهی نیز توسط Dai و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی ارتباط SWC و PDSI برای دوره طولانی تر بین سال های ۱۸۷۰-۲۰۰۲ در مقیاس جهانی به دست آمد.



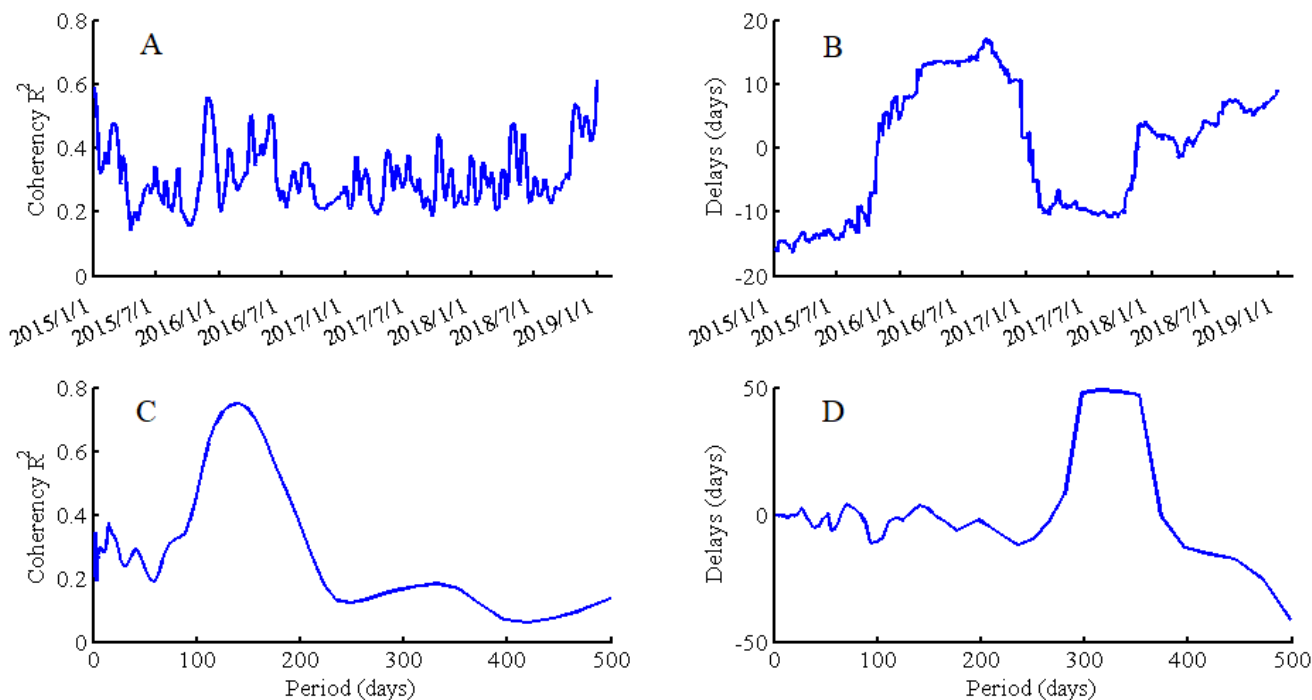
شکل ۱- داده های روزانه مربوط به تبخیر تعرق واقعی (AET) و پتانسیل (PET) و محتوای آب خاک (SWC) در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر در ایستگاه مورد



شکل ۲- داده های روزانه مربوط به تبخیر تعرق واقعی (AET) و پتانسیل (PET) و محتوای آب خاک (SWC) در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر در ایستگاه مورد مطالعه



شکل ۳- همبستگی بین متوسط محتوای رطوبت خاک در سه عمق و شاخص PDSI در کل دامنه زمانی و فرکانس



شکل ۴- متوسط همبستگی و تاخیر زمانی موجود متوسط محتوای رطوبت خاک در سه عمق و شاخص PDSI تمامی زمان‌ها و فرکانس‌ها. A و B: به ترتیب بیانگر متوسط همبستگی و تاخیر موجود بین متوسط محتوای رطوبت خاک و شاخص PDSI در تمامی روزهای آزمایش، C و D: به ترتیب بیانگر متوسط همبستگی و تاخیر موجود بین متوسط محتوای رطوبت خاک و شاخص PDSI در فرکانس‌های زمانی آنالیز شده

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که همبستگی نسبتاً پایینی بین متوسط محتوای رطوبت خاک در سه عمق و شاخص PDSI در تمامی زمان‌ها و فرکانس‌ها به استثنای دامنه فرکانسی فصلی وجود دارد. به طوری کلی متوسط همبستگی بین شاخص SWC و PDSI حاصل شده از تمامی فرکانس‌ها برای کل روزهای دوره در محدوده ۰/۲ تا ۰/۶ می‌باشد. این در حالی است که همبستگی بین این دو پارامتر در دامنه فرکانسی فصلی در حدود ۰/۸ می‌باشد. این همبستگی مثبت و بدون تاخیر فاز در محدوده فرکانسی فصلی نشان می‌دهد که وقوع خشکسالی‌های فصلی متأثر از متوسط رطوبت خاک در این فرکانس می‌باشد. این مورد به خوبی در محدود زمانی سال ۲۰۱۸ قابل مشاهده است که وقوع خشکالی شدید در این منطقه با کمترین مقادیر رطوبت خاک مصادف شده است. از مزیت‌های استفاده از آنالیز همبستگی مویک برای ارزیابی همبستگی بین دو پارامتر، امکان بررسی این همبستگی‌ها در دامنه‌های زمانی یا فرکانسی مختلف و همچنین امکان بررسی تاخیرهای فاز بین پارامترهای فوق می‌باشد. لذا توصیه می‌شود در تحقیقات آتی از این تکنیک برای بررسی همبستگی بین دیگر داده‌های سری زمانی استفاده شود.



منابع

- Byun, H.-R., Wilhite, D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9): 2747-2756.
- Chen, G. et al., 2012. Drought in the Southern United States over the 20th century: variability and its impacts on terrestrial ecosystem productivity and carbon storage. *Climatic change*, 114(2): 379-397.
- Dai, A., Trenberth, K.E., 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(6): 1117-1130.
- Davenport, I.J., Fernández-Gálvez, J., Gurney, R.J., 2005. A sensitivity analysis of soil moisture retrieval from the tau-omega microwave emission model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6): 1304-1316.
- Drisya, J., D, S.K., Roshni, T., 2018. Chapter 27 - Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Drought Estimation Using a Distributed Hydrological Model. In: Samui, P., Kim, D., Ghosh, C. (Eds.), *Integrating Disaster Science and Management*. Elsevier, pp. 451-460. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0
- Ficklin, D.L., Letsinger, S.L., Gholizadeh, H., Maxwell, J.T., 2015. Incorporation of the Penman–Monteith potential evapotranspiration method into a Palmer Drought Severity Index tool. *Computers & geosciences*, 85: 136-141.
- Graf, A. et al., 2014. Spatiotemporal relations between water budget components and soil water content in a forested tributary catchment. *Water resources research*, 50(6): 4837-4857.
- Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6): 561-566.
- Jacobi, J., Perrone, D., Duncan, L.L., Hornberger, G., 2013. A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, 49(9): 6086-6089.
- Palmer, W., 1965. Meteorological drought, Research Paper No. 45: US Weather Bureau. Office of Climatology, US Weather Bureau, Washington DC.
- Rahmati, M. et al., 2015. Soil moisture derivation using triangle method in the lighvan watershed, north western Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(1): 167-178.
- Rossato, L., Marengo, J.A., Angelis, C.F.d., Pires, L.B.M., Mendiondo, E.M., 2017. Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. *RBRH*, 22.
- Si, B.C., 2008. Spatial scaling analyses of soil physical properties: A review of spectral and wavelet methods. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 547-562.
- Sridhar, V., Hubbard, K.G., You, J., Hunt, E.D., 2008. Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity-area-duration assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4): 660-676.
- Tatli, H., Türkeş, M., 2011. Empirical orthogonal function analysis of the Palmer drought indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7): 981-991.
- Thornthwaite, C., Mather, J., 1955. *The water balance*. Centerton, New Jersey, Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. Publications in climatology, 8(1).
- Wilhite, D.A., Buchanan-Smith, M., 2005. Drought as hazard: understanding the natural and social context. *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*: 3-29.
- Wu, C., Chen, J.M., 2013. Diverse responses of vegetation production to interannual summer drought in North America. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 1-6.



16th Iranian Soil Science Congress

University of Zanjan, Iran, August 27-29, 2019



Topic for submission: Soil and Climate Change

Usage of wavelet coherency analysis in the study of correlations between time series data of soil water content and Palmer drought severity index

Rahmati^{*1}, M., Groh², J., Graf², A., Pütz², T., and Vereecken², H.

¹ Assistant Prof, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran

² Agrosphere Institute, Forschungszentrum Julich, Julich, Germany

Abstract

Drought is a natural hazard that can affect various aspects of human society. Palmer Drought Severity Index (PDSI) is one of the well-known indicators for drought monitoring in a specific region. On the other hand, soil water content (SWC) is one of the most important factors affecting the severity of drought that plants face. Therefore, in this research, the correlation between PDSI and SWC was investigated using wavelet coherency analysis. In addition, the correlation between them at time and frequency domains and existence or absence of phase lag between them were also investigated. To do this, the times series data (201-2018) of SWC and PDSI obtained at the Selhausen station in Germany were used. The results showed that the highest coherency ($R^2 = 0.8$) between SWC and PDSI was obtained in the seasonal frequency domain showing positive correlation between them without any phase lag. The results of this study indicate that the wavelet coherency analysis can well examine the intensity and weakness of the correlations between SWC and PDSI indices in all time and frequency domains, as well as the presence or absence of phase lag between them. Therefore, it is recommended to use the wavelet coherency analysis instead of an ordinary correlation between time series data in future research.

Keywords: Soil water content, Palmer drought index, Pearson correlation, Wavelet transform

* Corresponding author, Email: mehdirmti@gmail.com