

Investigation of super-drought and its relationship with vegetation cover in Khuzestan province

Seyedeh Fatemeh Arab¹ and Javad Bazrafshan^{2*} 

1- MSc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2*- Corresponding author, Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: jbazr@ut.ac.ir

Received: 04/04/2025

Revised: 05/17/2025

Accepted: 05/27/2025

Published: 08/22/2025

Abstract

Background and Objectives

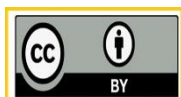
Drought is typically defined as a temporary deficit in water resources compared to normal regional conditions. This slow-onset phenomenon occurs across all climate zones but demonstrates complex structures and region-specific impacts. Extreme droughts are characterized by their severity, falling into severe or very severe categories. In drought research based on conventional indices, identifying extreme droughts requires analysis across different time scales. The concept of super-drought expands this framework by accounting for drought occurrences across multiple time scales, thereby offering a broader perspective beyond extreme droughts. Detecting super-droughts involves the statistical integration of drought signals across various time scales. International studies on super-droughts, initiated nearly a decade ago, have greatly enhanced our understanding of drought dynamics. This phenomenon is critical because it reflects the prolonged influence of droughts on regional water and ecological systems. Accordingly, this study aims to investigate the potential occurrence of super-droughts, examine their characteristics, and assess their effects on vegetation, using Khuzestan Province as the case study area.

Methodology

This research utilizes daily meteorological data—including precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, and sunshine hours—from five synoptic stations in Khuzestan Province (Ahvaz, Bandar Mahshahr, Masjed Soleyman, Safiabad Dezful, and Bostan) covering the period 1990–2019. Additionally, NDVI data derived from the MODIS satellite (Terra sensor, product MOD13A3, spatial resolution of 1 km²) spanning 2000–2019 were analyzed.

For each station, an 81-pixel region (9×9 grid) was selected, and the median NDVI value was calculated monthly to serve as the vegetation index. After performing quality control and gap filling, the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) was computed across five time scales: 3, 6, 12, 24, and 48 months. Subsequently, the Composite Drought Index (CDI) was derived using the Vine copulas technique, which captures the complex dependence structure among the indices. The statistical relationship between CDI and NDVI was then modeled for each station.

Results



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijdr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

The findings revealed that the Vine copulas method effectively assessed dependence across the five SPEI time scales. The resulting CDI enabled the identification of super-drought events within the study area. While some stations experienced overlapping drought periods, no single dry spell was common to all five stations. For instance, the most intense drought episodes occurred at Masjed Soleyman in December 2001, and at Ahvaz, Bandar Mahshahr, and Safiabad Dezful in various other years. Furthermore, the regression relationship between CDI and NDVI was positive and significant at all stations during most months of the year, with the strongest correlations observed at Safiabad Dezful, from February to April ($r > 0.7$). At Bostan station, NDVI and CDI exhibited a positive and significant correlation in nearly all months. However, at Safiabad Dezful, during the two warm months of the year, a significant negative correlation between NDVI and CDI was detected.

Conclusion

The results demonstrated that Vine copula functions are highly effective in analyzing the dependence among the five SPEI time scales. By calculating the composite CDI index, super-droughts were successfully identified in the selected stations of the study area. However, no common super-drought event was detected across all five weather stations. For example, the most severe super-droughts were recorded at Masjed Soleyman in December 2001 and at Ahvaz, Bandar Mahshahr, and Safiabad Dezful during different years. Moreover, the regression relationship between CDI and NDVI was positive and significant at all stations in most months, with the highest correlations observed at Safiabad Dezful, from February to April ($r > 0.7$). At Bostan station, NDVI and CDI displayed a consistently positive and significant correlation throughout nearly the entire year. In contrast, at Safiabad Dezful, a significant negative correlation between NDVI and CDI occurred during two of the warmest months of the year.

Keywords: Khuzestan, Super-drought, standardized precipitation-evapotranspiration index, time scale, vegetation.

بررسی ابرخشکسالی و رابطه آن با پوشش گیاهی در استان خوزستان

سیده فاطمه عرب^۱ و جواد بذرافشان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

پست الکترونیک: jbazr@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

چکیده

سابقه و هدف

خشکسالی، به طور کلی، به صورت یک دوره زمانی کمبود موقتی منابع آبی نسبت به شرایط نرمال در یک منطقه معین تعریف می‌شود. این پدیده به کندی آغاز می‌شود و در همه رژیم‌های اقلیمی اتفاق می‌افتد، اما ساختار و اثرهای پیچیده‌ای دارد که به طور قابل توجهی از یک منطقه به منطقه دیگر فرق می‌کند. خشکسالی‌های فرین، خشکسالی‌هایی هستند که در طبقات شدید یا بسیار شدید خشکسالی دسته‌بندی می‌شوند. در مطالعات خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مرسوم، شناسایی خشکسالی‌های فرین وابسته به مقیاس زمانی است. ابرخشکسالی، بر وقوع خشکسالی‌های فرین در مقیاس‌های مختلف زمانی دلالت دارد و مفهومی فراتر از خشکسالی فرین ارائه می‌دهد. به این معنا که در شناسایی ابرخشکسالی‌ها، به کمک روش‌های آماری اقدام به تلفیق خشکسالی‌ها در چندین مقیاس زمانی خواهد شد. مطالعات انجام‌شده در زمینه ابرخشکسالی‌ها در دنیا تقریباً از یک دهه قبل آغاز شده و پنجره جدیدی در دانش خشکسالی گشوده است. انتظار می‌رود ابرخشکسالی‌ها اثرهای بلندمدت خشکسالی بر منابع آبی و پوشش گیاهی در یک منطقه را نشان دهند. بنابراین، هدف از این تحقیق، بررسی امکان وقوع ابرخشکسالی‌ها و تحلیل مشخصات آنها و ارزیابی تأثیر آنها بر پوشش گیاهی است و برای این منظور، استان خوزستان به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب گردید.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از داده‌های هواشناسی شامل بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس روزانه مربوط به پنج ایستگاه سینوپتیک استان خوزستان (اهواز، بندرماهشهر، مسجد سلیمان، صفی‌آباد دزفول و بستان) برای دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۹ و داده‌های شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) ماهواره MODIS مربوط به سنجنده Terra و محصول MOD13A3 با اندازه پیکسل ۱ کیلومتر مربع مربوط به دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ استفاده گردید. محدوده‌ای شامل ۸۱ پیکسل (۹ در ۹) در اطراف هر ایستگاه انتخاب شد و میان NDVI در هر ماه به عنوان شاخص NDVI آن ماه در نظر گرفته شد. پس از کنترل کیفی و تکمیل خلأهای آماری، شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد (SPEI) در پنج مقیاس زمانی پایه شامل ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه شد. سپس، شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) با اعمال تابع همبند واین (Vine) روی پنج مقیاس زمانی SPEI محاسبه گردید. برای محاسبه CDI از روش D-Vine استفاده شد که توان مدل‌سازی ساختار پیچیده خشکسالی بر مبنای وابستگی متغیرهای حاشیه‌ای را دارد. در نهایت نیز رابطه رگرسیونی بین CDI و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) در ایستگاه‌های منتخب تعیین گردید.

نتایج

نتایج نشان داد که توابع همبند واین (Vine) توانمندی مناسبی در تحلیل وابستگی پنج مقیاس زمانی SPEI دارند. با محاسبه شاخص ترکیبی CDI، ابرخشکسالی‌ها در ایستگاه‌های منتخب منطقه مطالعاتی شناسایی شدند. دوره‌های ابرخشک شناسایی شده در برخی ایستگاه‌ها شباهت بیشتری با یکدیگر داشتند، اما هیچ ابرخشکسالی مشترکی در پنج ایستگاه هواشناسی شناسایی نشد. به عنوان نمونه،

شدیدترین ابرخشکسالی‌ها، در ایستگاه مسجد سلیمان در دسامبر ۲۰۰۱ و در ایستگاه‌های اهواز، بندرماهشهر و صفی‌آباد دزفول در سال‌های مختلف ثبت گردید. علاوه بر این، رابطه رگرسیونی بین CDI و NDVI در تمامی ایستگاه‌ها در اغلب ماه‌های مختلف سال مثبت و معنی‌دار بود و این همبستگی‌ها در ایستگاه صفی‌آباد دزفول در ماه‌های فوریه تا آوریل بالاتر از دیگر ایستگاه‌هاست ($r > 0.7$). در ایستگاه بستان تقریباً در همه ماه‌های سال همبستگی مثبت و معنی‌دار بین NDVI و CDI وجود داشت. البته تنها در ایستگاه صفی‌آباد دزفول در دو ماه گرم سال، همبستگی منفی معنی‌دار بین NDVI و CDI وجود داشت.

نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داد که تابع همبند و این با تلفیق اطلاعات SPEI در پنج مقیاس زمانی و با در نظر گرفتن پیچیدگی وابستگی مقیاس‌های زمانی، توانسته است پدیده ابرخشکسالی را در ایستگاه‌های منتخب طی دوره آماری ۳۰ ساله شناسایی نماید. این در حالی است که بدون استفاده از تابع همبند و فقط با مقایسه عینی مقادیر SPEI در پنج مقیاس زمانی پایه، تعداد محدودی ابرخشکسالی و حتی در ایستگاه بستان هیچ ابرخشکسالی شناسایی نشد. شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) همبستگی بالایی با NDVI داشته، بنابراین کارایی مناسبی در شناسایی وقوع دوره‌های خشک پوشش گیاهی دارد. در بیشتر ماه‌های سال، با افزایش شدت خشکسالی از سبزی‌نگی پوشش (مقدار NDVI) کاسته می‌شود که دلیل آن تنش کم‌آبی است. در معدودی از ماه‌ها (ماه‌های گرم) با تشدید خشکسالی به میزان سبزی‌نگی پوشش اضافه می‌شد. در این مناطق تنش حرارتی باعث تضعیف پوشش گیاهی می‌شود. با توجه به تأثیرپذیری CDI از مقیاس‌های زمانی SPEI و آستانه وقوع خشکسالی فرین، لازم است حساسیت CDI به دو عامل مذکور در مطالعات بعدی مورد توجه محققان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ابرخشکسالی، پوشش گیاهی، خوزستان، شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد، مقیاس زمانی.

مقدمه

خشکسالی به دلیل اثرهای بلندمدت و گسترده بر کشاورزی، بوم‌سامانه‌ها، اقتصاد و جامعه بشری، یکی از خسارت‌بارترین خطرات طبیعی در سراسر جهان محسوب می‌شود. دهه‌های اخیر شاهد افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌های فاجعه‌بار در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران بوده است (Ault, 2020; Van Loon, 2015). خشکسالی به‌طور کلی، به‌صورت یک دوره زمانی کمبود موقتی منابع آبی نسبت به شرایط نرمال در یک منطقه معین تعریف می‌شود. این پدیده به‌کندی آغاز می‌شود و در همه رژیم‌های اقلیمی اتفاق می‌افتد، اما ساختار و اثرهای پیچیده‌ای دارد که به‌طور قابل توجهی از یک منطقه به منطقه دیگر فرق می‌کند (AghaKouchak et al., 2021). ساختار خشکسالی شامل مشخصاتی از قبیل شروع، پایان، فراوانی و سختی است. خشکسالی‌ها در طی زمان تکامل یافته و با دارا بودن سرشت منطقه‌ای، ممکن است گستره وسیعی را تحت

تأثیر قرار دهند (Haile et al., 2020). انواع خشکسالی‌ها در چهار طبقه هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی-اجتماعی قرار می‌گیرند. خشکسالی هواشناسی در ساده‌ترین شکل، کمبود بارش نسبت به شرایط میانگین درازمدت آن تعریف می‌شود. خشکسالی کشاورزی، کمبود رطوبت خاک و افت عملکرد محصول را بررسی می‌کند. خشکسالی هیدرولوژی به کمبود منابع آبهای سطحی (جریان رودخانه، دریاچه و مخزن) و زیرسطحی (تراز آب زیرزمینی) مربوط می‌شود. نوع اقتصادی-اجتماعی خشکسالی نیز به کمبود عرضه محصولات و کالاهای اقتصادی در مقایسه با تقاضا می‌پردازد (Mishra and Singh, 2011).

شاخص‌های خشکسالی ابزار مناسبی برای پایش و پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی‌ها در یک منطقه به‌شمار می‌روند. این شاخص‌ها از جنبه‌های مختلفی مورد دسته‌بندی و مقایسه قرار گرفته و ممکن است کاربرد عمومی یا تخصصی داشته باشند. از یک دیدگاه، شاخص‌های خشکسالی ممکن

چندمتغیره و داده‌های سنجش از دور (بارش، رطوبت خاک، دمای سطح زمین و شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی) شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) را ارائه کردند. همبستگی بین CDI با SPEI بیشتر از هریک از شاخص‌های منفرد سنجش از دور با SPEI بود. به‌ویژه، مشخص شد که CDI در مقیاس ۹ ماهه معیار مناسبی برای شناسایی خشکسالی کشاورزی است. همزمان، روش‌های غیرخطی مانند توابع همبند برای ساخت شاخص‌های ترکیبی خشکسالی مورد استفاده قرار گرفتند که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. [Hao و AghaKouchak \(۲۰۱۳\)](#) با استفاده از توابع همبند، شاخص خشکسالی استاندارد چندمتغیره (MSDI) را برای پایش یکپارچه خشکسالی‌های هواشناسی (مبتنی بر شاخص بارش استاندارد، (SPI) و کشاورزی (مبتنی بر شاخص رطوبت خاک استاندارد، (SSI) ارائه کردند. با استفاده از تابع همبند، شاخص کمبود توأم (JDI) را برای پایش خشکسالی هواشناسی (SPI) و آبشناسی (SDI) (هر دو در مقیاس‌های زمانی ۱-۱۲ ماه) ارائه کردند. [Ma و همکاران \(۲۰۱۵\)](#) با استفاده از تابع همبند، شاخص کمبود توأم مبتنی بر شاخص پالمر (SPDI-JDI) را در مقیاس‌های زمانی چندگانه پیشنهاد نمود. [Mirabbasi و همکاران \(۲۰۱۳\)](#) با استفاده از شاخص کمبود توأم مبتنی بر SPI در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ماه، اقدام به پایش خشکسالی‌های هواشناسی در شمال غرب ایران کردند. [Bazrafshan و همکاران \(۲۰۱۵\)](#) عملکرد شاخص‌های ترکیبی MSPI و JDI را از نظر آشکارسازی وقوع خشکسالی‌های شدید و فرین در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب ایران ارزیابی نمودند و نتیجه گرفتند که JDI تجربی توانایی آشکارسازی خشکسالی‌های فرین در همه ایستگاه‌ها و خشکسالی‌های شدید در یک‌سوم ایستگاه‌ها را ندارد.

مفهوم نظری ابرخشکسالی (Super-drought) نزدیک به یک دهه قبل توسط [Wang و همکاران \(۲۰۱۶\)](#) معرفی گردید اما در سال ۲۰۲۲ جنبه عملیاتی پیدا کرد ([Wang et al., 2022](#)). بنابراین موضوعی کاملاً نوپاست. قبل از تعریف ابرخشکسالی، لازم است خشکسالی فرین یا استثنایی تعریف

است یک یا چند متغیره باشند. از شاخص‌های یک‌متغیره خشکسالی می‌توان به شاخص بارش استاندارد (SPI) [McKee و همکاران \(۱۹۹۳\)](#) و از شاخص‌های چندمتغیره به شاخص بارش-تبخیرتغرق استاندارد (SPEI) [Vicente-Serrano و همکاران \(۲۰۱۰\)](#) اشاره کرد. از دیدگاه دیگر، شاخص‌های خشکسالی ممکن است منفرد یا ترکیبی باشند. شاخص‌های منفرد تنها از یک شاخص خشکسالی و شاخص‌های ترکیبی از مجموعه‌ای از شاخص‌های منفرد استفاده می‌کنند. به عبارت دیگر، با استفاده از شاخص‌های منفرد می‌توان فقط یک نوع خشکسالی را مطالعه کرد ولی به کمک شاخص‌های ترکیبی، اثرهای ترکیبی دو یا چند نوع خشکسالی بررسی می‌شود.

برای ترکیب شاخص‌های خشکسالی از تکنیک‌های مختلف آماری استفاده می‌شود که در دو گروه خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. مطالعات زیادی با استفاده از روش‌های خطی اقدام به ترکیب شاخص‌های خشکسالی نموده‌اند که برخی از آنها تشریح می‌شود. [Keyantash و Dracup \(۲۰۰۴\)](#) برای پایش همه فرم‌های فیزیکی خشکسالی شامل هواشناسی، آبشناسی و کشاورزی، با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شاخص خشکسالی یکپارچه (ADI) را ارائه کردند. [Bazrafshan و همکاران \(۲۰۱۴\)](#) با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شاخص بارش استاندارد چندمتغیره (MSPI) را ارائه نمودند. شاخص مذکور با ادغام شاخص بارش استاندارد در مقیاس‌های زمانی چندگانه و با هدف پایش یکپارچه خشکسالی‌ها در منابع آبی مختلف ارائه شد. [Cheraghalizadeh و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) با استفاده از روش تابع همبند اقدام به پایش یکپارچه خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناسی در حوزه آبریز کسلیان (مازندران) نمودند. برای این منظور، از شاخص SPI و SPEI برای پایش خشکسالی هواشناسی و از شاخص SDI برای پایش خشکسالی آبشناسی استفاده شد. نتایج نشان داد که در دوره‌های خشک ممتد، شاخص ترکیبی یک ماه زودتر از شاخص‌های منفرد وضعیت خشکسالی را اعلام می‌کند. [Liu و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) با استفاده از رگرسیون خطی

ابرخشکسالی نشان‌دهنده کمبود آب مرکب در تمام بخش‌های منابع آبی است. با این حال، روش ارائه شده برای پایش ابرخشکسالی بیشتر جنبه کیفی داشته و در ارزیابی بزرگی و ترسیم الگوی فضایی خشکسالی‌های فرین چندان قابل استفاده نبود. برای حل این مشکل، Wang و همکاران (۲۰۲۲) تکنیک تابع همبند را برای شناسایی و ارزیابی ابرخشکسالی‌ها معرفی نمودند.

هدف از این تحقیق، شناسایی رویدادهای ابرخشکسالی در استان خوزستان و ارزیابی تأثیر آنها بر پوشش گیاهی استان است. برای این منظور، یک شاخص ترکیبی ابرخشکسالی مبتنی بر SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از تکنیک توابع همبند ارائه می‌شود. توابع همبند به‌طور وسیعی در ساخت شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در ایران و به‌ویژه در استان خوزستان Mohammadi و همکاران (۲۰۲۳) مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، به دلیل افزایش تعداد متغیرهای اولیه، از فرم‌های چندمتغیره و پیچیده‌تر تابع همبند استفاده خواهد شد. در بخش‌های بعدی، ابتدا داده‌ها و روش‌های مورد استفاده تشریح می‌شوند، سپس نتایج به‌دست آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در پایان، نتایج جمع‌بندی و مورد بحث قرار می‌گیرند و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

بیان ریاضی مفهوم ابرخشکسالی

از نظر فیزیکی، ابرخشکسالی را می‌توان به عنوان کمبود آب مرکب در تمام بخش‌های منابع آب قابل استفاده در نظر گرفت که انتظار می‌رود خسارت‌های ناشی از یک رویداد در مقیاس زمانی را تقویت کند (Wang et al., 2016; Wang et al., 2023). شکل ۱ به‌طور شماتیک، مفهوم ابرخشکسالی را نشان می‌دهد. شرایط خشکسالی برای ماه مورد نظر (ماه n - ماه $n-1$) نه تنها به پیشامد ماه جاری بلکه به پیشامد ماه‌های قبل ($n-2, n-1, \dots$) تا یک مقیاس زمانی خاص بستگی دارد. مقیاس زمانی به تعداد ماه‌هایی اشاره دارد که تا پایان ماه جاری ادامه دارد. از آنجایی که

گردد. از نظر آماری، به رویدادی فرین گفته می‌شود که اندازه آن بالاتر یا پایین‌تر از یک صدک معین باشد. برای مثال، رویداد فرین پایین، رویدادی است که اندازه آن از صدک پنجم داده‌ها کمتر باشد. یا رویداد فرین بالا، رویدادی است که اندازه آن از صدک نود و پنجم داده‌ها بزرگتر باشد (Klein Tank and Zwiers, 2009). شاخص‌های خشکسالی در واقع، کمیت‌هایی استاندارد و بدون بعد هستند و خشکسالی فرین در مقیاس زمانی معین به‌صورت توالی از مقادیر شاخص خشکسالی زیر آستانه $-1/5$ (صدک پنجم داده‌ها) یا -2 (صدک اول داده‌ها) تعریف می‌شود. این تعریف از خشکسالی فرین ماهیت تک‌مقیاسی دارد، یعنی فقط می‌تواند خشکسالی‌های استثنایی را در یک مقیاس زمانی معین استخراج کند. حال آنکه خشکسالی‌ها ماهیت چند مقیاسی دارند و می‌توانند در مقیاس‌های مختلف زمانی اعم از کوتاه، متوسط و بلندمدت اتفاق بیفتند. به‌طور خاص، ماهیت چندمقیاسی خشکسالی به این اشاره دارد که پاسخ منابع آب قابل‌دسترس از جمله رطوبت خاک، آب‌های زیرزمینی، برف، جریان رودخانه و ذخیره مخازن به کمبود آب به‌طور قابل توجهی متفاوت است و وابسته به مقیاس زمانی است (Vicente-Serrano et al., 2012). بنابراین، در حالی که مثلاً وقتی جریان رودخانه شرایط خشکسالی فرین را تجربه می‌کند، ممکن است سایر سیستم‌های موجود در همان منطقه (به عنوان مثال، محصولات کشاورزی) شرایط نرمال یا حتی مرطوب داشته باشند (Vicente-Serrano et al., 2010). سئوالی که ایجاد می‌شود این است که اگر در آن واحد، خشکسالی فرین در همه مقیاس‌های زمانی مشاهده شود، چنین خشکسالی‌ای چه تفاوتی با مشاهده خشکسالی فرین در یک مقیاس زمانی معین دارد. برای حل این مشکل، اولین بار Wang و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی رفتار یکپارچه خشکسالی مبتنی بر شاخص SPEI (و با در نظر گرفتن مقادیر SPEI کمتر از $-1/5$) در مقیاس‌های زمانی مختلف در جنوب غربی چین، مفهوم ابرخشکسالی را ارائه کردند. از دیدگاه آنان، ابرخشکسالی به وقوع همزمان خشکسالی‌های فرین در مقیاس‌های زمانی متعدد اشاره دارد. اهمیت فیزیکی

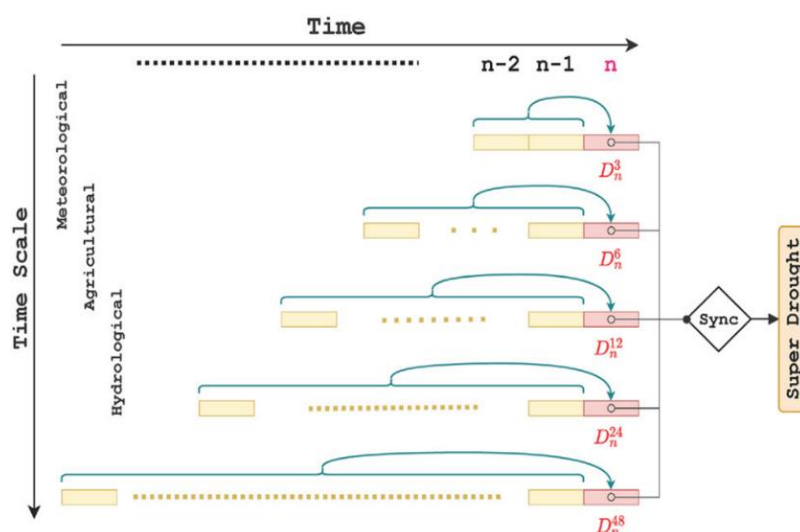
fillGap() بسته نرم افزاری hyfo در محیط R انجام شد. علاوه بر داده های هواشناسی، برای انجام این مطالعه از داده های شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) ماهواره MODIS مربوط به سنجنده Terra و محصول MOD13A3 با اندازه پیکسل ۱ کیلومتر مربع استفاده شد. داده های سنجنش از دور در بازه های زمانی ۱۶ روزه برداشت شده و دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ را پوشش می دهند. برای هر ایستگاه، ۸۱ پیکسل در اطراف ایستگاه در نظر گرفته شد و متوسط همه پیکسل ها برای هر ماه محاسبه شد. انتخاب محدوده ۹ در ۹ کیلومتر مربعی پیرامون هر ایستگاه با این هدف انجام شده است که داده های NDVI معرف بهتری از منطقه مطالعاتی باشد (Bazrafshan et al., 2022; Rahimzadeh Bajgiran et al., 2008). برای دانلود تصاویر ماهواره ای از تابع mt_batch_subset() از بسته نرم افزاری MODISTools در محیط R استفاده شد.

منطقه مطالعاتی، استان خوزستان، از دو بخش کاملاً متفاوت، جلگه ای و کوهستانی تشکیل شده است. در مناطق کوهستانی و مرتفع، تابستان های معتدل و زمستان های سرد و در نواحی کوهپایه ای، آب و هوای نیمه بیابانی و در نواحی پست جلگه ای، هرچه به سمت جنوب و جنوب غربی پیش می رویم خصوصیات آب و هوا از نیمه بیابانی به بیابانی کناره ای تبدیل می شود. عمدتاً زمستان های این ناحیه، کوتاه و معتدل و تابستان ها طولانی و گرم است. در همه ایستگاه ها، تقریباً در ماه های جون تا سپتامبر یک دوره خشک چهار ماهه داریم و بارندگی عمدتاً متمرکز بر ماه های اکتبر تا می است. نرمال سالانه بارش در ایستگاه های مسجد سلیمان و صفی آباد دزفول بیشتر از دیگر ایستگاه هاست. ایستگاه های مسجد سلیمان و اهواز گرمترین نرمال دمایی را در ماه جولای با مقدار ۳۸/۵ درجه سلسیوس تجربه می کنند.

خشکسالی در مقیاس های زمانی مختلف اثرهای متنوعی از جمله هواشناسی دارد، از نظر کشاورزی و آبشناسی، کمبود یا مازاد آب تجمعی را می توان در ماه های مختلف محاسبه کرد. در اینجا، توجه به این نکته مهم است که مقیاس زمانی، طول دوره خشکسالی را اندازه گیری نمی کند، بلکه به عنوان یک طرح تجمیع برای تعیین کمیت حالت خشک و مرطوب در یک نقطه از زمان عمل می کند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در طی یک دوره n ماهه، امکان تجربه شرایط خشک در یک یا چند مقیاس زمانی و شرایط مرطوب در مقیاس های زمانی دیگر وجود دارد. اگر مقیاس زمانی تحلیل خشکسالی را بیانگر ارزیابی نوع خاصی از خشکسالی در نظر بگیریم، مفهوم ابرخشکسالی به وقوع همزمان خشکسالی های فرین در مقیاس های زمانی متعدد اشاره دارد.

داده های مورد نیاز و منطقه مطالعاتی

در این تحقیق از پنج ایستگاه هواشناسی همدید استان خوزستان (اهواز، بندرماهشهر، مسجد سلیمان، صفی آباد دزفول و بستان) استفاده گردید (شکل ۲). داده های مورد استفاده شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. این داده ها دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ را پوشش می دهند. قبل از استفاده عملیاتی از این داده ها، کنترل های کیفی لازم از نظر درصد خلأهای آماری در هریک از ایستگاه ها انجام شد. برای تکمیل خلأهای آماری از روش تحلیل همبستگی با ایستگاه های مجاور استفاده گردید. ایستگاه هایی که همبستگی بالا و معنی دار با ایستگاه مینا داشتند در پرکردن خلأهای آماری با روش رگرسیون چندمتغیره مورد استفاده قرار گرفتند. کل فرایند شناسایی و تکمیل داده های مفقود با استفاده از تابع

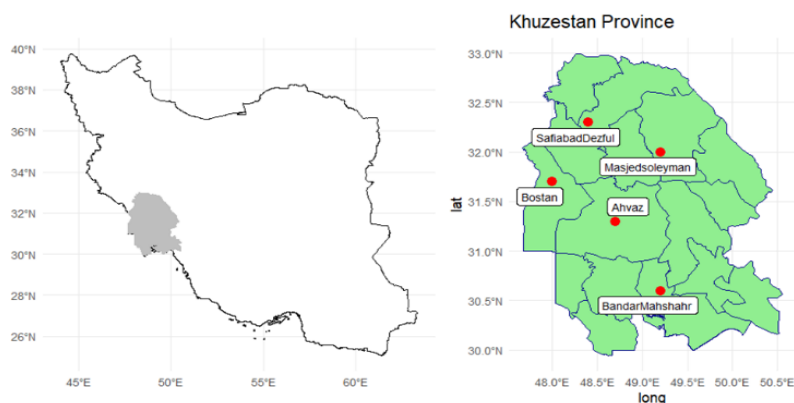


شکل ۱- نمودار شماتیک مفهوم ابرخشکسالی

پیکان افقی در قسمت بالا نشان‌دهنده تکامل زمانی؛ پیکان قائم در سمت چپ، مقیاس زمانی از کوتاه‌مدت تا بلندمدت را نشان می‌دهد. ماه مورد بررسی در شکل بالا با رنگ قرمز مشخص شده است و ماه‌های قبل تا یک مقیاس زمانی خاص به صورت بلوک‌ها و نقاط زرد رنگ مشخص شده‌اند. نقاط نشان‌دهنده ماه‌های حذف شده است. شش مقیاس زمانی شامل ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه با Dn^3 ، Dn^6 ، Dn^{12} ، Dn^{24} و Dn^{48} نشان‌دهنده موازنه آب تجمعی در مقیاس زمانی مربوط است (Wang et al., 2016).

Figure 1- Schematic diagram of the concept of super-drought.

The horizontal arrow at the top indicates the time evolution; the vertical arrow on the left indicates the time scale from short to long term. The month under consideration in the figure above is marked in red, and the months before a specific time scale are marked as yellow blocks and dots. Dots indicate omitted months. The six timescales include 3, 6, 12, 24 and 48 months with Dn^{24} , Dn^{12} , Dn^6 , Dn^3 and Dn^{48} indicating the cumulative water balance at the corresponding time scale (Wang et al., 2016).



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Figure 2- Location of the studied weather stations.

شاخص خشکسالی ترکیبی و آشکارسازی ابرخشکسالی‌ها.

پایش ابرخشکسالی‌ها

آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها
در مرحله اول، اختلاف بارش (P) و تبخیر تعرق پتانسیل (PET)، یعنی بیلان آب اقلیمی D، در مقیاس‌های زمانی

برای آشکارسازی ابرخشکسالی‌ها در یک نقطه و در هریک از ماه‌های سال، روش سه‌مرحله‌ای Wang و همکاران (۲۰۲۳) تشریح می‌شود: الف) آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها، ب) ساخت تابع همبند، ج) استخراج

متعدد محاسبه می‌شود.

گرفت. در پایان این مرحله، توزیع احتمال تجربی D برای هریک از مقیاس‌های زمانی پنجگانه محاسبه می‌شود.

$$u_{ij} = \frac{R_{ij}}{n+1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که u_{ij} احتمال حاشیه‌ای داده i ام از متغیر j ام است.

۲-۳-۲ ساخت تابع همبند

فرم کلی تابع همبند تجربی j - بعدی به شرح زیر است.

$$C_u(u_1, u_2, \dots, u_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I\left(\frac{R_{i1}}{n+1} \leq u_1, \frac{R_{i2}}{n+1} \leq u_2, \dots, \frac{R_{ij}}{n+1} \leq u_j\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

به ازای $i=j=1,2,3,\dots,n$ است. پس از تعیین تابع همبند، نوبت

به محاسبه تابع کنдал (K_C) یا تابع همبند تجمعی می‌رسد.

$$K_C(C_{u(t)}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(C_{u(i)} \leq C_{u(t)}) \quad , for \quad t = 1,2,3, \dots, \quad \text{رابطه (۴)}$$

توصیف وابستگی‌های پیچیده بین متغیرهای چندگانه محسوب می‌شود. فرایند برازش مدل درختی D -Vine بر متغیرهای حاشیه‌ای شامل سه مرحله اساسی است: الف) انتخاب ساختار D -Vine که مبتنی بر شناسایی و اتصال جفت‌هایی با بیشترین وابستگی در درخت اولیه است. ب) انتخاب خانواده همبند دو متغیره: تعیین خانواده آماری مناسب و تخمین پارامترهای مرتبط برای هر جفت متغیر حاشیه‌ای. ج) آزمون نیکویی برازش: ارزیابی دقت مدل ساخته شده است. در مرحله نخست، انتخاب ساختار D -Vine بهینه مستلزم بررسی همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه است. برای این منظور، از ضریب همبستگی رتبه‌ای کنдал تجربی (τ) بین تمامی جفت متغیرها استفاده می‌شود که به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$\tau = \frac{C-D}{C+D} = \frac{C-D}{n(n-1)/2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن j مقیاس زمانی، i شمارنده مقیاس و n شماره ماه در توالی زمانی است. با توجه به مطالعه [McKee](#) و همکاران (۱۹۹۳) پنج مقیاس زمانی شامل ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه متناظر با پنج منبع آبی جهان مورد استفاده قرار

که در آن n ، تعداد داده‌ها، R_{ij} رتبه داده مشاهده شده i -ام در مقیاس j -ام داده‌ها و u_j احتمال حاشیه‌ای مقیاس j -ام

که در آن $I(A)$ متغیر نشانگر عبارت منطقی A است، به‌طوری‌که اگر شرط عبارت منطقی درست باشد عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر به آن تعلق می‌گیرد.

برای تعیین تابع همبند مناسب قابل برازش بر پنج متغیر SPEI-3، SPEI-6، SPEI-12، SPEI-24، SPEI-48 از بسته نرم‌افزاری VineCopula در محیط نرم‌افزار R استفاده شد ([Nagler et al., 2024](#)). بسته VineCopula در R ابزاری قدرتمند برای تحلیل وابستگی‌های غیرخطی و پیچیده بین متغیرهای تصادفی است. این بسته به محققان و تحلیل‌گران داده کمک می‌کند تا با استفاده از مدل‌های واین، وابستگی‌های آماری را به‌طور دقیق‌تری بررسی کنند و نتایج معتبرتری بدست آورند. تابع همبند واین مبتنی بر مدل‌سازی سلسله‌مراتبی درختی متشکل از توابع همبند دو متغیره شرطی است. این پژوهش از ساختار انعطاف‌پذیر درختی موسوم به D -Vine بهره می‌گیرد که ابزاری گرافیکی و قدرتمند برای

۲-۳-۳- استخراج شاخص خشکسالی ترکیبی و آشکارسازی ابرخشکسالی‌ها
شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) به صورت معکوس نرمال استاندارد تابع کندال (رابطه ۴) تعریف شده است.

$$CDI = \phi^{-1}(K_C(C_u)) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن ϕ^{-1} ، معکوس توزیع نرمال؛ K_C ، تابع توزیع تجربی؛ C_u ، تابع همبند است. این الگوریتم استانداردسازی باعث می‌شود که CDI از توزیع نرمال استاندارد پیروی کند. در مقایسه با SPEI، CDI شرایط کلی خشکسالی منعکس شده از مؤلفه‌های چند مقیاسی را دربر می‌گیرد. CDI منفی نشان‌دهنده وضعیت کلی خشکسالی است، در حالی که CDI مثبت نشان‌دهنده شرایط کلی ترسالی است. CDI نزدیک به صفر به شرایط کلی نرمال اشاره دارد. طبق مطالعه [Wang](#) و همکاران (۲۰۲۳) ۱/۵- یا ۲- یا مقادیر دیگر را به عنوان آستانه برای شناسایی رویدادهای ابرخشکسالی تعیین می‌کنیم.

تحلیل همبستگی پیرسون و معادله رگرسیون برای بررسی رابطه همبستگی شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) با شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) در هریک از ماه‌های سال، از ضریب همبستگی خطی پیرسون (r) استفاده گردید.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

رابطه معکوس بین متغیرهاست. معنی‌داری آماری r به کمک آزمون ضریب همبستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد تعیین می‌شود.

که C و D به ترتیب تعداد جفت مشاهدات هماهنگ و ناهماهنگ دو متغیر X و Y هستند. دو جفت مشاهده (x_i, y_i) و (x_j, y_j) هماهنگ هستند، اگر $x_i < x_j$ و $y_i < y_j$ یا $x_i > x_j$ و $y_i > y_j$. در غیر این صورت ناهماهنگ تعریف می‌شوند. مقدار ضریب همبستگی تاو-کندال بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند.

پس از انتخاب ترتیب مناسب ورود متغیرها در فرایند سلسله مراتبی ادغام متغیرها، نوبت به شناسایی نوع تابع همبند دو متغیره مناسب و برآورد پارامترهای مربوط می‌رسد. تابع همبند مناسب و پارامترهای آن از بین مدل‌های ارائه شده در کتابخانه بسته نرم‌افزاری vineCopula (شامل هفده تابع همبند) و براساس تخمین حداکثر درست‌نمایی (MLE) و معیار اطلاعات آکائیک (AIC) طبق معادلات زیر تعیین می‌شوند ([Akaike, 1998](#)).

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \sum_{i=1}^n \ln(c(u_{i1}, u_{i2} | \theta)) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$AIC = -2 \sum_{i=1}^n \ln(c(u_{i1}, u_{i2}) | \hat{\theta}) + 2k \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن $\{(u_{i1}, u_{i2}), i = 1, \dots, n\}$ توزیع حاشیه‌ای مشاهدات، c، تابع چگالی همبند و k تعداد پارامترهای مدل است. هرچه مقدار AIC کمتر باشد، مدل بهتر است. به این ترتیب، تابع همبند مناسب که بهترین برازش را بر داده‌های مشاهداتی دارد، دارای کمترین مقدار AIC خواهد بود.

$$\text{رابطه (۹)}$$

که x و y به ترتیب متغیر مستقل (در اینجا، CDI) و وابسته (در اینجا، NDVI) هستند؛ $\mathcal{X}$ و $\mathcal{Y}$ به ترتیب میانگین‌های متغیرهای x و y هستند؛ i شماره داده‌ها و n طول سری داده‌هاست. مقدار r بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند. مقادیر مثبت r دال بر رابطه مستقیم و مقادیر منفی بیانگر

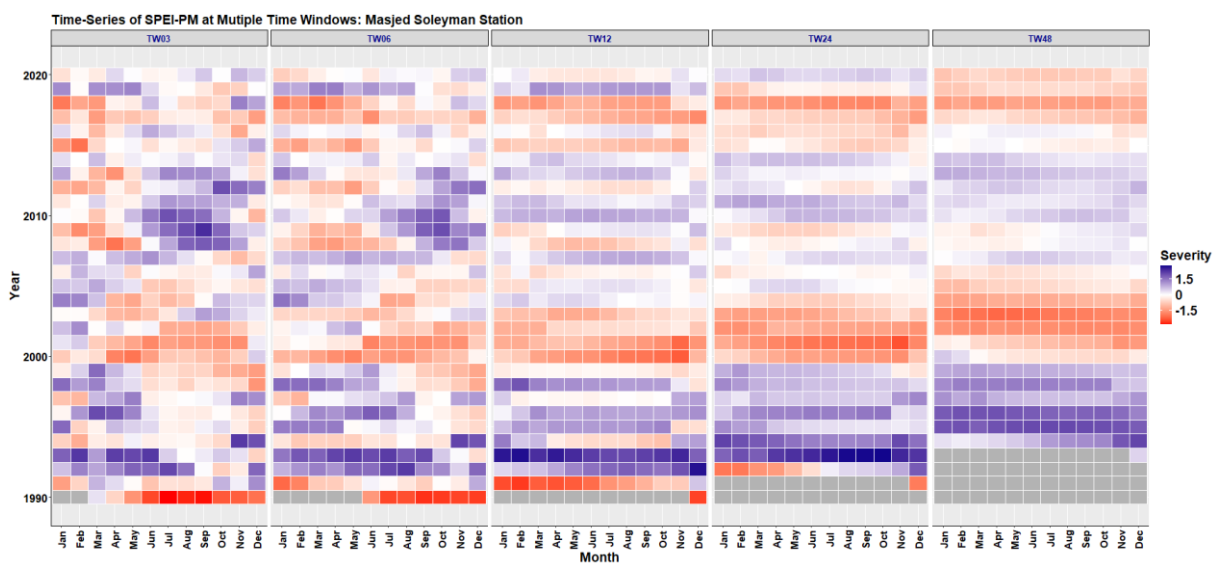
نتایج

بررسی عینی ابرخشکسالی در سری‌های زمانی SPEI

در مقیاس‌های زمانی مختلف

قبل از پایش ابرخشکسالی‌ها، لازم است شاخص خشکسالی SPEI در پنج مقیاس زمانی پایه ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه شود. نتایج محاسبه به عنوان نمونه برای ایستگاه مسجد سلیمان در شکل ۳ ارائه شده است (برای جلوگیری از تطویل مقاله، نمودار سایر ایستگاه‌ها نشان داده نشده است). رنگ قرمز در نمودار مذکور، بیانگر خشکسالی شدید و رنگ آبی مبین ترسالی شدید است. با توجه به شکل مذکور، ملاحظه می‌شود که در مقیاس زمانی ۳ ماهه، دوره‌های خشک و تر چندان مشخص نبوده و با افزایش مقیاس زمانی از ۳ به ۴۸ ماه، دوره‌های خشک و تر بخوبی متمایز می‌شوند. خشکسالی‌های شدید ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ بخوبی در مقیاس ۴۸ ماهه نمایان شده‌اند. در ایستگاه‌های منتخب، مواقعی که هر پنج مقیاس زمانی، خشکسالی شدید را

پایش کرده‌اند در جدول ۲ آورده شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد که تنها ابرخشکسالی اتفاق افتاده در ایستگاه مسجد سلیمان، ماه دسامبر ۲۰۰۱ است. به عبارت دیگر، در ماه دسامبر ۲۰۰۱ ابرخشکسالی اتفاق افتاده است که هر پنج مقیاس زمانی مورد نظر (۳ تا ۴۸ ماهه) شرایط خشکسالی شدید را گزارش کرده و کل سیستم از ۴۸ ماه قبل تا دسامبر ۲۰۰۱ در وضعیت خشکسالی بوده است. در سایر ایستگاه‌ها، اهواز سال ۲۰۰۰، بندرماهشهر سال ۱۹۹۴ و صفی‌آباد دزفول سال ۲۰۱۸ ابرخشکسالی اتفاق افتاده است. در ایستگاه بستان هیچ ابرخشکسالی در دوره مطالعاتی اتفاق نیفتاده است. باید توجه داشت که ابرخشکسالی‌های منعکس‌شده بر مبنای بررسی مستقل و عینی طبقات شدت خشکسالی در پنج مقیاس زمانی SPEI است و وابستگی بین مقیاس‌های زمانی در استخراج ابرخشکسالی‌ها در نظر گرفته نشده است. تحلیل وابستگی بین پنج مقیاس زمانی نیازمند کاربرد مدل همبند است که در ادامه، نتایج حاصل از آن ارائه می‌شود.



شکل ۳- شاخص خشکسالی بارش-تبخیرترعرق استاندارد در مقیاس‌های مختلف زمانی در ایستگاه مسجد سلیمان

Figure 3- Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index for different time scales at Masjed Soleyman station.

چگونگی ترکیب متغیرها یا تعیین ساختار همبند بهینه است. برای این منظور، کد برنامه مناسب برای تعیین ساختار بهینه

برازش تابع همبند چندمتغیره و تعیین مدل همبند مناسب مسئله اصلی و مهم در برازش توابع همبند Vine

برای هریک از ایستگاه‌های مطالعاتی با استفاده از معیار اطلاعات آکائیک (AIC) تهیه گردید. به عنوان نمونه، برای ایستگاه مسجد سلیمان در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول مذکور نتیجه ترکیب متغیرها و تشکیل درخت متغیرها در حالت ۲، ۳، ۴ و ۵ متغیره آورده شده است. به علاوه، برای هر ترکیب از متغیرها، بهترین تابع همبند و ضریب همبستگی کندال در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور مشاهده می‌شود که نوع تابع همبند مناسب برای هریک از درخت‌ها و ترکیبات درون آنها متفاوت است و با حرکت از درخت ۱ به ۴ همبستگی کندال کاهش می‌یابد. همبستگی‌ها در زوج متغیرهای درخت ۱ بالا است (بیشترین همبستگی بین SPEI در گره ۱ با ۲ (متناظر با مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماه) و گره ۴ با ۵ (متناظر با مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماه) است) و در دیگر درخت‌ها نزدیک به صفر است. شکل ۴-d نیز نتایج ذکر شده را در ایستگاه مسجد سلیمان تأیید می‌کند. ملاحظه می‌شود که متغیرهای درخت ۱ قویترین همبستگی فضایی را دارند (خطوط هم مقدار دوکی شکل یا بیضوی کشیده هستند) و با حرکت به درخت‌های ۳ و ۴ توزیع فضایی به فرم دایره نزدیک شده و همبستگی تضعیف می‌شود. در سایر ایستگاه‌ها نیز تجسم فضایی توزیع همبند دو متغیره بین مقیاس‌های زمانی SPEI همانند ایستگاه مسجد سلیمان است. برای درک بهتر شکل ۴، جزئیات بیشتری را بر مبنای شکل مربوط به

ایستگاه مسجد سلیمان داده می‌شود. با توجه به شکل ۴-d، ردیف اول شامل چهار باکس است که توزیع همبند بین دودوی مقیاس‌های زمانی SPEI را نشان می‌دهد. اعداد ۱ تا ۵ به ترتیب، معرف مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه هستند. فرم توزیع همبند بین مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه بیانگر آن است که همبستگی در دنباله چپ و راست توزیع بالا است و به سمت وسط داده‌ها کاهش می‌یابد. همبستگی بین مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه بیضوی است و با افزایش مقدار SPEI در مقیاس ۶ ماهه، مقدار آن در مقیاس ۱۲ ماهه نیز افزایش می‌یابد. همبستگی کمتری در امتداد قطر کوچک بیضی وجود دارد. در مورد همبستگی بین مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه، مقدار همبستگی در دم چپ توزیع بزرگتر از دم راست توزیع است. بعکس، توزیع داده‌های مقیاس‌های ۲۴ در مقابل ۴۸ ماه حکایت از کاهش همبستگی در دو طرف توزیع و افزایش همبستگی بخش‌های میانی توزیع دارد. در ردیف دوم هریک از نمودارها سه باکس وجود دارد. اولین باکس توزیع شرطی مقیاس‌های ۳ و ۱۲ ماهه را بازای مقیاس ۶ ماهه، دومین باکس توزیع شرطی مقیاس‌های ۲۴ و ۶ ماهه را بازای ۱۲ ماهه ارائه می‌دهد (و تا آخر). ردیف سوم نمودارها نیز توزیع شرطی دو مقیاس زمانی را روی دو مقیاس زمانی دیگر و ردیف چهارم توزیع شرطی دو مقیاس زمانی را روی سه مقیاس زمانی دیگر نشان می‌دهد.

جدول ۱- ابرخشکسالی‌های اتفاق افتاده در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی بر مبنای مقایسه سری‌های SPEI در پنج مقیاس زمانی

Table 1- Super-droughts that occurred at the stations in the study area based on the SPEIs at five time scales.

Station	Year	Month	SPEI-3	SPEI-6	SPEI-12	SPEI-24	SPEI-48
Ahvaz	2000	5	-2.28	-1.74	-2.10	-2.05	-1.64
	2000	6	-1.94	-2.10	-2.11	-2.01	-1.66
	1994	7	-1.75	-1.82	-2.12	-1.75	-2.13
	1994	8	-1.86	-1.85	-2.17	-1.84	-2.14
	1994	9	-1.56	-1.72	-2.15	-1.80	-2.09
Bandar Mahshahr	1994	10	-1.61	-1.75	-2.18	-1.80	-2.06
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
Bostan	2001	11	-1.62	-1.59	-2.12	-2.36	-1.56
	2018	1	-1.50	-2.04	-2.32	-1.76	-1.50
	2018	3	-1.53	-1.73	-2.29	-1.80	-1.57
	2018	6	-1.52	-1.67	-1.95	-1.90	-1.60
	2018	7	-1.98	-1.73	-1.87	-1.97	-1.62
	2018	8	-2.03	-1.88	-1.82	-2.02	-1.64
	2018	9	-1.98	-1.89	-1.85	-2.06	-1.66
	2018	10	-1.73	-1.95	-1.77	-2.06	-1.65

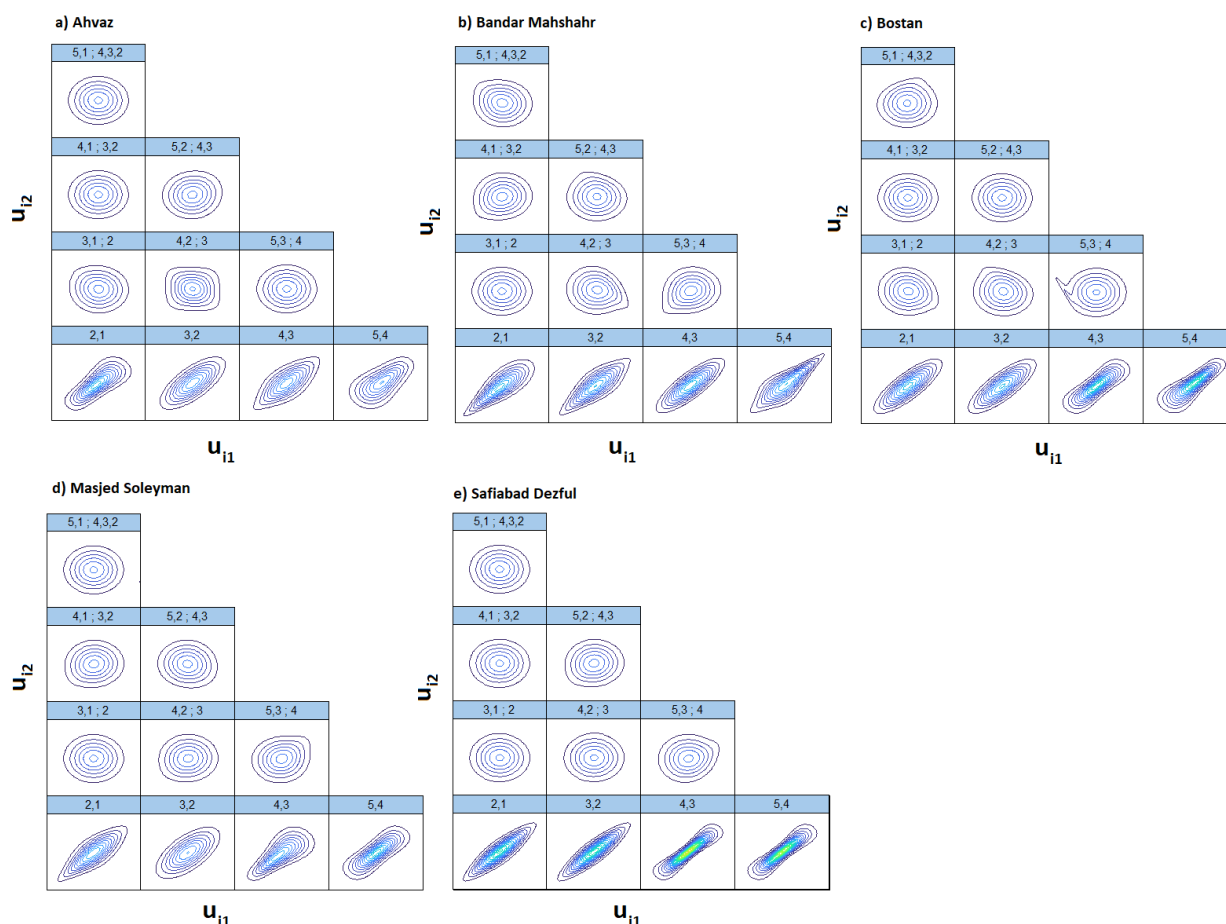
جدول ۲- ساختار بهینه تابع همبند چندمتغیره (D-Vine) در ایستگاه مسجد سلیمان

Table 2- Optimal structure of multivariate copula functions (D-Vine) at Masjed Soleyman station.

Tree	Nodes*	Copula**	Parameter 1	Parameter 2	Kendall's Correlation
1	1,2	SBB1	0.34	1.85	0.54
	2,3	N	0.64	0	0.44
	3,4	SBB8	3.18	0.94	0.49
	4,5	F	7.06	0	0.56
2	3,1;2	I	—	—	0
	4,2;3	SJ	1.07	0	0.04
	5,3;4	J	1.18	0	0.09
3	4,1;3,2	SJ	1.08	0	0.04
	4,3;5,2	C90	-0.1	0	-0.05
4	5,1;4,3,2	Tawn270	-20	0.01	0

* Nodes 1, 2, 3, 4, and 5 represent the SPEI at the scales 3, 6, 12, 24, and 48 month, respectively.

** The abbreviate names of the copula functions used in VineCopula R package.



شکل ۴- تجسم فضایی توابع همبند درختی شاخص‌های SPEI در ایستگاه‌های منتخب (u_{i1} : تابع همبند حاشیه‌ای SPEI در مقیاس ۱ و u_{i2} : تابع احتمال حاشیه‌ای SPEI در مقیاس ۲) (اعداد ۱ و ۲ می‌توانند هریک از مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه باشند).

Figure 4- Spatial visualization of tree copula functions of SPEI indices at the selected stations (u_{i1} and u_{i2} are the marginal functions of SPEI at the scales 1 and 2, respectively) (Scales 1 and 2 may be each one of the timescales 3, 6, 12, 24, and 48 months).

شاخص خشکسالی ترکیبی و ابرخشکسالی‌ها

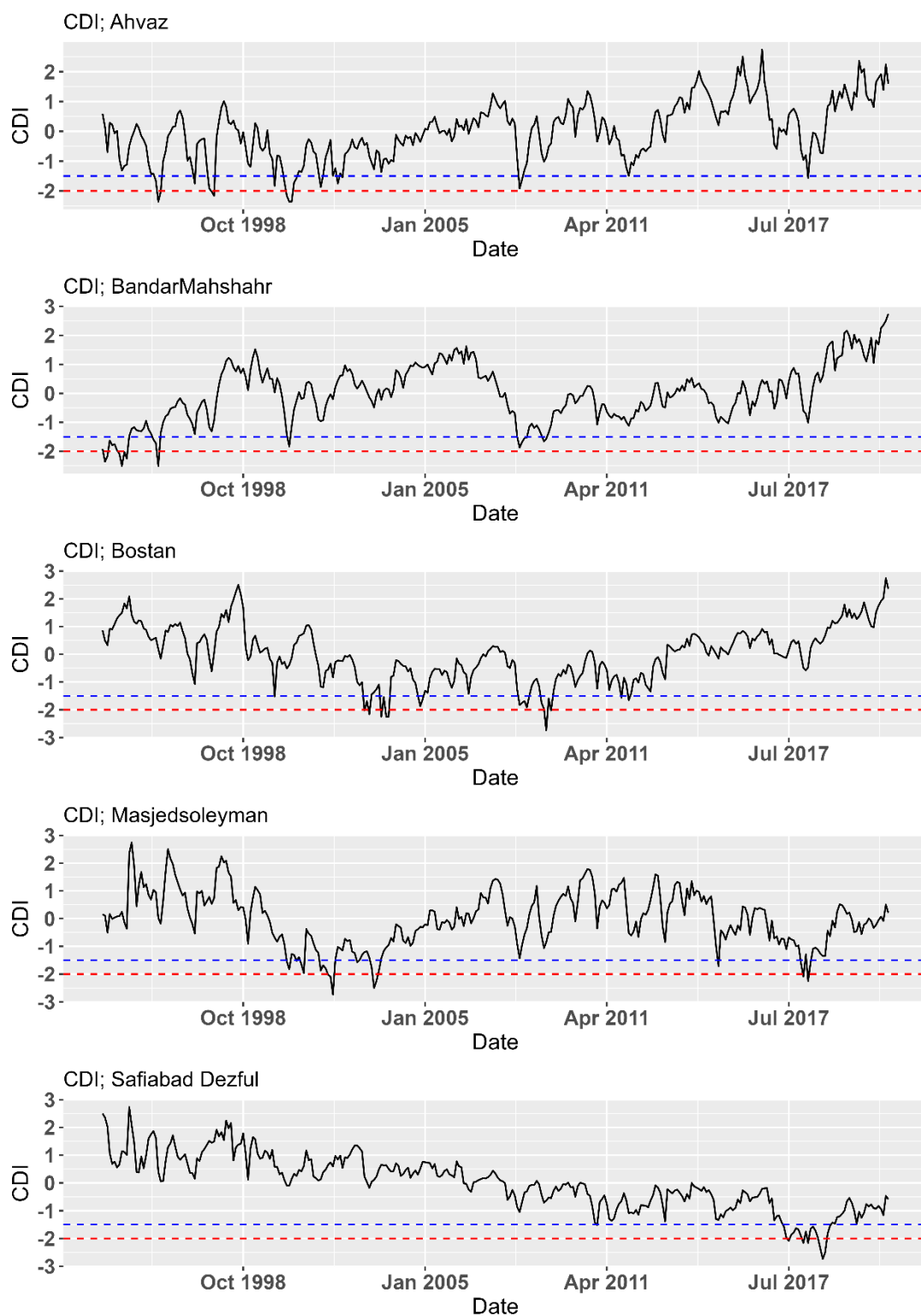
پس از تعیین توابع همبند دومتغیره مناسب، تابع کندال (تابع توزیع همبند تجمعی) برای هریک از ایستگاه‌ها محاسبه شد. با تبدیل معکوس تابع کندال، شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) محاسبه گردید. به کمک CDI و بر مبنای آستانه $1/5 -$ یا 2 ، ابرخشکسالی‌های رخ داده در هریک از ایستگاه‌ها مشخص گردید. نتایج در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل مذکور مشاهده می‌شود که ابرخشکسالی‌های استخراج شده با استفاده از CDI با ابرخشکسالی‌های مستخرج از بررسی عینی سری‌های SPEI در پنج مقیاس زمانی (جدول ۱) فرق می‌کند. CDI توانسته است در فضای همبستگی بین متغیرهای SPEI ابرخشکسالی‌های بیشتری استخراج کند. در بین ایستگاه‌ها، دو ایستگاه اهواز و بندرماهشهر شباهت زیادی از نظر رخداد ابرخشکسالی‌ها دارند. سه ایستگاه دیگر نیز شباهت‌هایی از نظر زمان وقوع ابرخشکسالی دارند. در هیچ سالی، هر پنج ایستگاه ابرخشکسالی را به‌طور همزمان گزارش نکرده‌اند. البته، به نظر می‌رسد که سال ۲۰۰۸ ظرفیت تولید ابرخشکسالی در همه ایستگاه‌ها را دارد. با این حال، شدت خشکسالی در ایستگاه صفی‌آباد دزفول کمتر از ۴ ایستگاه دیگر بوده است. نکته دیگر اینکه روند زمانی CDI در ایستگاه صفی‌آباد دزفول به صورت نزولی است و ابرخشکسالی‌ها در پایان دوره آماری مورد بررسی اتفاق افتاده‌اند.

برای بررسی جزئیات بیشتر در مورد نتایج حاصل از پایش ابرخشکسالی‌ها با استفاده از شاخص خشکسالی ترکیبی در ایستگاه‌های منتخب، برخی مشخصات ابرخشکسالی در جدول ۳ آورده شده است. ستون اول جدول مذکور، تعداد ابرخشکسالی‌های رخ داده ($CDI \leq -1.5$) در ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین تعداد ابرخشکسالی‌ها (۱۱ مورد) در ایستگاه اهواز اتفاق افتاده است و کمترین تعداد (۲ پدیده) در ایستگاه صفی‌آباد دزفول رخ داده است. در ایستگاه‌های بستان و مسجد سلیمان ۸ پدیده و بندرماهشهر ۵ پدیده ابرخشکسالی رخ داده است. میانگین طول مدت ابرخشکسالی در ایستگاه اهواز ۲ ماه و در ایستگاه صفی‌آباد دزفول ۱۱ ماه بوده است. این نتیجه نشان می‌دهد که ایستگاه صفی‌آباد دزفول در مقایسه با اهواز، ابرخشکسالی‌های طولانی‌تری را تجربه نموده است. اوج شدت ابرخشکسالی‌ها در ایستگاه‌های منتخب در سال‌های مختلفی اتفاق افتاده است. اوج شدت ابرخشکسالی در ایستگاه بندرماهشهر در دهه نخست دوره زمانی، در ایستگاه‌های اهواز، مسجد سلیمان و بستان در دهه دوم و در ایستگاه صفی‌آباد دزفول در دهه سوم دوره زمانی اتفاق افتاده است. طولانی‌ترین ابرخشکسالی در ایستگاه صفی‌آباد دزفول به مدت ۲۰ ماه (طی سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) بوده است. ایستگاه بندرماهشهر با ۱۱ ماه، مسجد سلیمان با ۷ ماه، اهواز با ۶ ماه و بستان با ۵ ماه در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۳- مشخصات ابرخشکسالی‌های پایش شده به وسیله شاخص خشکسالی ترکیبی در ایستگاه‌های منتخب

Table 3- Characteristics of super-droughts monitored by CDI at the selected stations.

Station	Number of super-drought events	Average of super-droughts Duration (months)	Peak of super-drought	Longest super-drought (months)
Ahvaz	11	2	2000-05	6(2000-03 to 2000-08)
Bandar Mahshahr	5	4	1994-08	11(1993-12 to 1994-10)
Bostan	8	3	2003-10	5(2009-01 to 2009-05)
Masjed Soleyman	8	3	2001-11	7(2001-06 to 2001-12)
Safiabad Dezful	2	11	2018-09	20 (2017-05 to 2018-12)



شکل ۵- سری‌های زمانی شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) با دو آستانه $-1/5$ و -2 در ایستگاه‌های مورد مطالعه

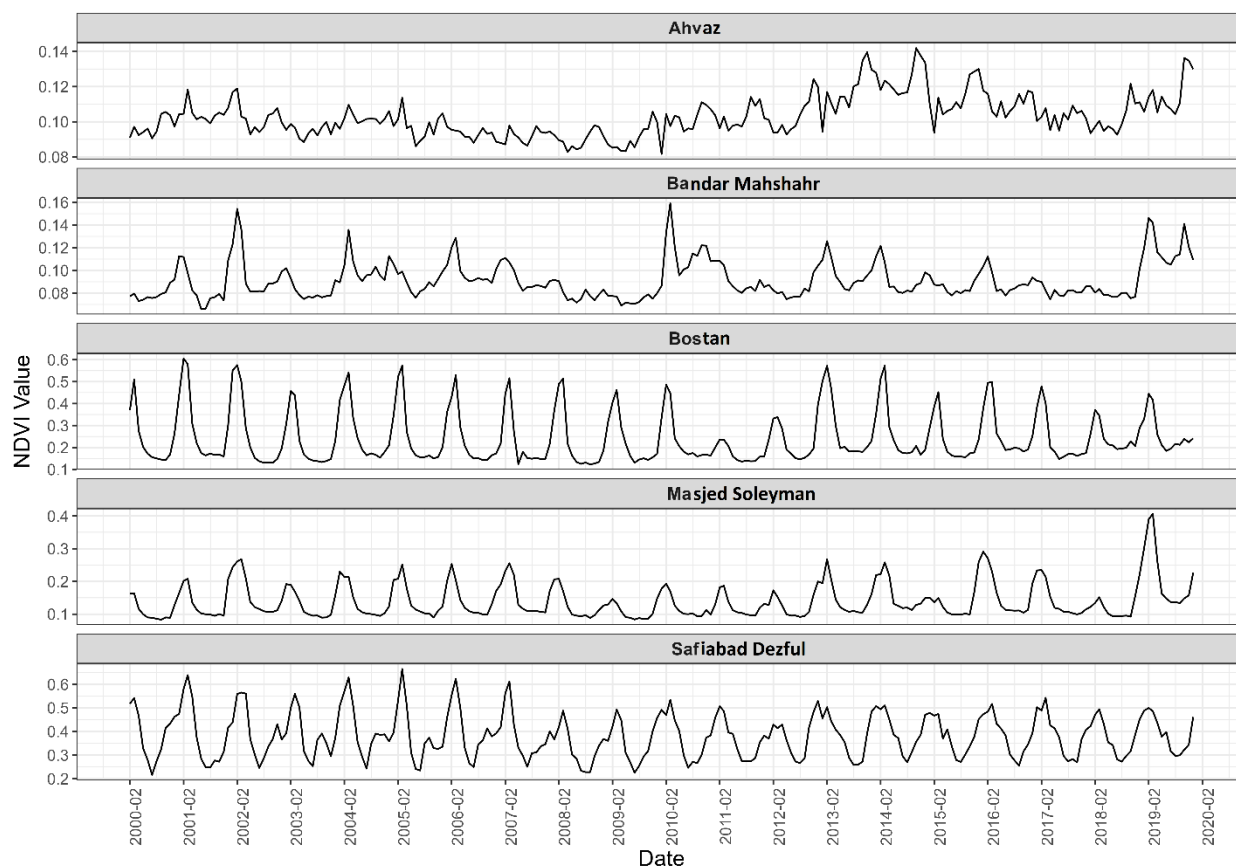
Figure 5- Time series of the combined drought index (CDI) with the truncation levels -1.5 and -2 at the study stations.

رابطه ابرخشکسالی‌ها با پوشش گیاهی

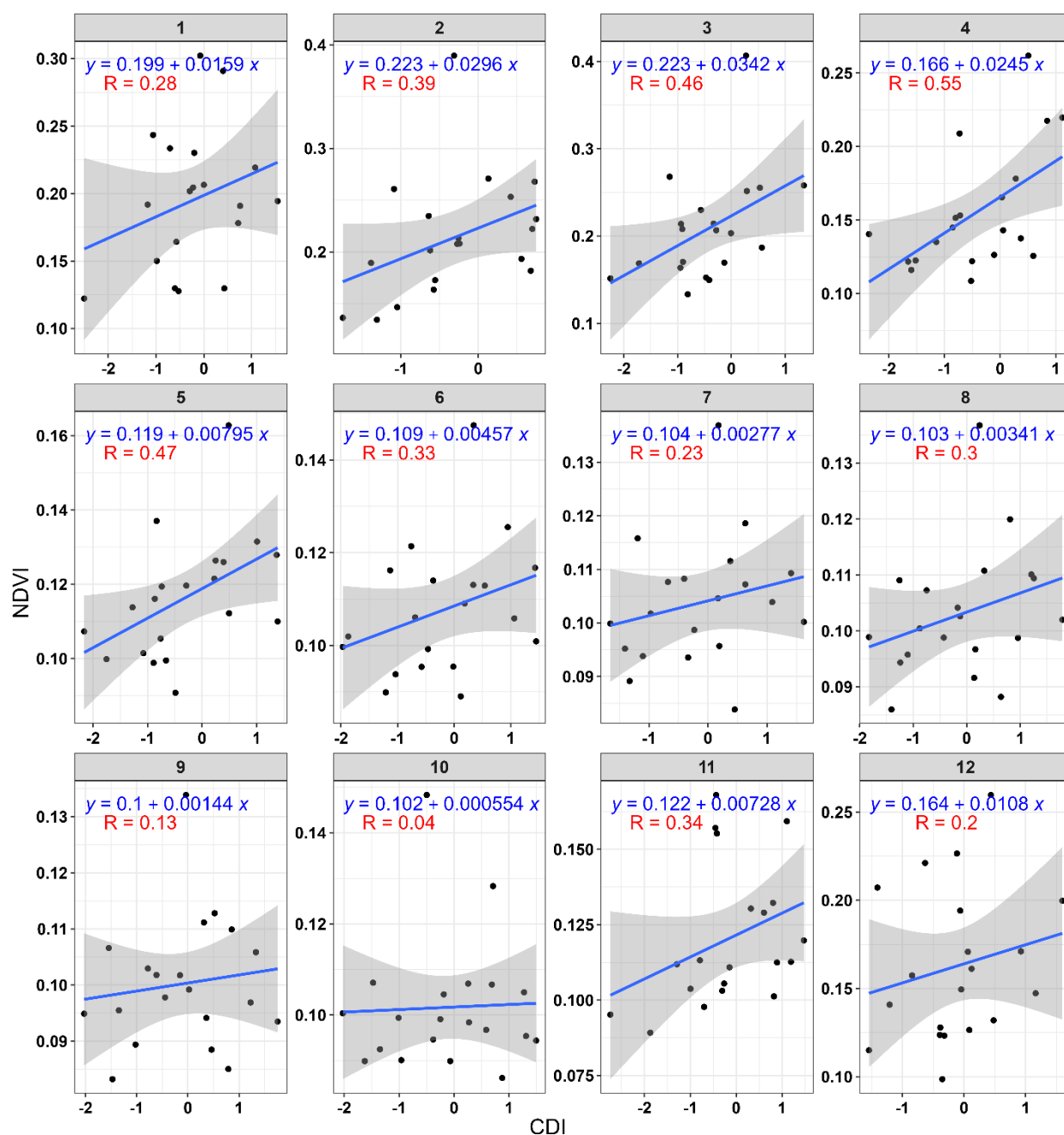
پراکنش داده‌های NDVI در شکل ۶ برای پنج ایستگاه منتخب نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، مقادیر NDVI در طی سال در ایستگاه‌های اهواز و بندر ماهشهر کوچکتر از مقادیر آن برای سه ایستگاه دیگر است. بزرگ‌ترین مقادیر NDVI مربوط به ایستگاه‌های صفی‌آباد دزفول و بستان است. تغییرات فصلی مشخصی در سری زمانی NDVI در ایستگاه‌های بستان، مسجد سلیمان و صفی‌آباد دزفول وجود دارد. این در حالی است که در اهواز و بندر ماهشهر، سری زمانی NDVI تغییرات فصلی معینی در برخی سال‌ها دیده نمی‌شود. در ایستگاه‌هایی که تغییرات فصلی مشخصی در NDVI دارند، شاخص NDVI در بهار به اوج رسیده و پس از آن بتدریج تا اواسط پاییز به کمترین مقدار خود می‌رسد.

با هدف استفاده کاربردی از شاخص ابرخشکسالی، تأثیر آن بر پوشش گیاهی (شاخص NDVI) در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه‌های مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج برای ایستگاه مسجد سلیمان (به عنوان نمونه) در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل، در همه ماه‌های سال همبستگی‌های مثبت و معنی‌داری بین NDVI و CDI وجود دارد. همبستگی مثبت بدین معناست که با افزایش CDI (ترسالی) مقدار NDVI نیز افزایش یافته است و بعکس، با کاهش مقادیر CDI (خشکسالی) مقدار

NDVI کاهش یافته است. به عبارت دیگر، هر چه شدت خشکسالی بیشتر شده است، پوشش گیاهی ضعیف‌تر و پژمرده‌تر گردیده است. بالاترین همبستگی‌ها مربوط به ماه‌های مارس (۰/۴۶)، آوریل (۰/۵۵) و می (۰/۴۷) است. در کل، در نیمه اول سال، همبستگی‌ها بالاتر از نیمه دوم سال است. کمترین همبستگی در ماه نوامبر (۰/۰۴) اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از تحلیل وابستگی خطی CDI و NDVI در جدول ۴ ارائه شده است. در ایستگاه اهواز، همبستگی بین CDI و NDVI در ماه‌های ژانویه، فوریه و ژوئن معنی‌دار نیست. در بقیه ماه‌ها این همبستگی معنی‌دار است و بالاترین مقدار همبستگی مربوط به ماه می (۰/۶۳) است. به علاوه، همبستگی‌ها در ماه‌های نوامبر و دسامبر قابل توجه است. مقدار همبستگی‌ها در ایستگاه بندر ماهشهر، بجز در ماه نوامبر، در دیگر ماه‌ها مثبت و معنی‌دار است. در ایستگاه بستان، همبستگی‌ها در ماه‌های ژوئن تا نوامبر مثبت و معنی‌دار است و در ماه آگوست به بالاترین مقدار می‌رسد (۰/۷۶). بالاترین همبستگی‌ها در ایستگاه صفی‌آباد دزفول در طی ماه‌های فوریه تا آوریل بدست آمد (در ماه آوریل بیشترین همبستگی معادل ۰/۷۹۸ مشاهده شد). در همان ایستگاه، همبستگی‌های منفی معنی‌دار در ماه‌های جون و جولای مشاهده شد. در بقیه ماه‌ها، همبستگی‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود.



شکل ۶- تغییرات زمانی NDVI ماهانه (میانۀ ۸۱ پیکسل پیرامون ایستگاه) در ایستگاه‌های منتخب طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹
Figure 6- Monthly NDVI time series (Median of 81 pixels around station) in the selected stations during 2000-2019.



شکل ۷- رابطه رگرسیونی بین NDVI و CDI در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه مسجد سلیمان

عدد ۱ تا ۱۲ در عنوان پنل‌ها به ترتیب متناظر با ماه‌های ژانویه تا دسامبر هستند.

Figure 7- Regression relationships between CDI and NDVI in different months of the year at Masjed Soleyman station. The numbers 1-12 correspond to the months Jan-Dec, respectively.

جدول ۴- معادلات رگرسیونی بین NDVI و CDI در ایستگاه‌های مطالعاتی به همراه ضرایب همبستگی پیرسون اعداد درشت و ایتالیک نشان از معنی‌دار بودن همبستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

Table 4- Regression equations between NDVI and CDI at the study stations along with Pearson's correlations. The bold and Italic numbers represent the statistical significance at 95% confidence level.

Parameter	Month	Ahvaz	Bandar Mahshahr	Bostan	Safiabad Dezful
Regression Equation	Jan	y = 0.00165 x + 0.1005	y = 0.0099x + 0.1000	y = 0.03044x + 0.3568	y = -0.00209x + 0.4448
	Feb	y = 0.00397 x + 0.1017	y = 0.0181x + 0.1063	y = 0.0275 x + 0.4651	y = 0.04111 x + 0.5135
	Mar	y = 0.00652 x + 0.1055	y = 0.0176x + 0.1065	y = 0.0165 x + 0.4734	y = 0.07020 x + 0.5638
	Apr	y = 0.00503 x + 0.0993	y = 0.0091x + 0.0901	y = 0.00483x + 0.2668	y = 0.05244 x + 0.4767
	May	y = 0.00602 x + 0.0994	y = 0.0070x + 0.0849	y = 0.00788x + 0.1997	y = -0.01844 x + 0.3544
	Jun	y = 0.00303 x + 0.0977	y = 0.0064x + 0.0809	y = 0.0148 x + 0.1750	y = -0.0339 x + 0.3031
	Jul	y = 0.00467 x + 0.0972	y = 0.0074x + 0.0814	y = 0.01735x + 0.1642	y = -0.02055x + 0.2564
	Aug	y = 0.00390 x + 0.0993	y = 0.0082x + 0.0841	y = 0.02171x + 0.1673	y = 0.01349 x + 0.2909
	Sep	y = 0.00469 x + 0.1052	y = 0.0087x + 0.0856	y = 0.01909x + 0.1657	y = 0.02057 x + 0.3116
	Oct	y = 0.00839 x + 0.1075	y = 0.0119x + 0.0858	y = 0.0194 x + 0.1699	y = 0.0181 x + 0.3386
	Nov	y = 0.01053x + 0.1091	y = 0.0043 x + 0.089	y = 0.0179 x + 0.1745	y = 0.00228 x + 0.374
	Dec	y = 0.00800 x + 0.1069	y = 0.0056 x + 0.096	y = 0.0242 x + 0.2304	y = -0.0095 x + 0.4147
Correlation Coefficient	Jan	0.132	<i>0.676</i>	0.301	-0.036
	Feb	0.302	<i>0.616</i>	0.266	<i>0.721</i>
	Mar	<i>0.586</i>	<i>0.614</i>	0.149	<i>0.767</i>
	Apr	<i>0.590</i>	<i>0.568</i>	0.103	<i>0.798</i>
	May	<i>0.630</i>	<i>0.655</i>	0.243	-0.377
	Jun	0.386	<i>0.633</i>	<i>0.613</i>	<i>-0.606</i>
	Jul	<i>0.523</i>	<i>0.663</i>	<i>0.745</i>	<i>-0.601</i>
	Aug	<i>0.486</i>	<i>0.582</i>	<i>0.761</i>	0.302
	Sep	<i>0.461</i>	<i>0.578</i>	<i>0.712</i>	0.409
	Oct	<i>0.519</i>	<i>0.568</i>	<i>0.645</i>	0.329
	Nov	<i>0.604</i>	0.256	<i>0.638</i>	0.043
	Dec	<i>0.599</i>	<i>0.499</i>	0.404	-0.158

نتیجه‌گیری

روش، یکی بر مبنای استفاده از تعریف ساده شرطی وقوع خشکسالی فرین (شدت خشکسالی کمتر از ۱/۵-) در پنج

در این مطالعه، ابرخشکسالی‌های استان خوزستان به دو

مطابقت دارد. در عین حال، در ایستگاه صفی آباد دزفول در دو ماه از سال نتایج معکوس بود. چنین نتیجه‌ای در مطالعات معدودی به‌ویژه در نواحی مرطوب یا نواحی مرتفع گزارش شده است و پوشش گیاهی بیشتر تحت تنش حرارتی است تا تنش آبی. این نتیجه با یافته‌های [Liu](#) (۲۰۲۴) مطابقت دارد.

تعریف ابرخشکسالی متأثر از تعریف مقیاس زمانی شاخص خشکسالی پایه آن (در اینجا SPEI) و آستانه وقوع خشکسالی فرین است. مقیاس‌های مورد استفاده توسط [Wang](#) و همکاران (۲۰۲۳) مبتنی بر توصیه [McKee](#) و همکاران (۱۹۹۳) است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در مورد برآورد ابرخشکسالی ضمن بررسی هر دو عامل مذکور انجام شود تا حساسیت شاخص ترکیبی به مقیاس‌های زمانی و آستانه‌های خشکسالی فرین دخیل در تعریف آن مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد. به علاوه، تأثیر ابرخشکسالی بر منابع آبهای سطحی و زیرزمینی نیز مورد بررسی و کنکاش قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

بخشی از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است که بدین‌وسیله از دست‌اندرکاران تشکر و قدردانی می‌گردد.

مقیاس زمانی SPEI شامل ۳، ۶، ۱۲، ۲۴، و ۴۸ ماه و دیگری استفاده از یک شاخص ترکیبی مبتنی بر توابع همبند Vine روی پنج مقیاس زمانی SPEI استخراج گردید. نتایج نشان داد که بر مبنای تعریف ساده، فقط تعداد محدودی از ابرخشکسالی‌ها قابل شناسایی هستند و حتی در یک ایستگاه هیچ ابرخشکسالی اتفاق نیفتاده است. حال آنکه ابرخشکسالی‌های شناسایی شده بر مبنای تابع همبند در ایستگاه‌ها از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. این نشان می‌دهد که تابع همبند و این با در نظر گرفتن پیچیدگی خشکسالی‌ها و اثرهای متقابل بین مقیاس‌های مختلف زمانی خشکسالی توانسته است کارایی بیشتری در شناسایی ابرخشکسالی‌ها در مقیاس با روش ساده غیرشرطی داشته باشد. نتایج با یافته‌های [Wang](#) و همکاران (۲۰۲۳)، [Wang](#) و همکاران (۲۰۲۲) و [Wang](#) و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. هیچ ابرخشکسالی مشترکی در ایستگاه‌ها یافت نشد. با این حال، برخی ایستگاه‌ها، از نظر دوره‌های وقوع ابرخشکسالی در استان خوزستان شباهت بیشتری به یکدیگر داشتند.

وجود رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار بین NDVI و شاخص ابرخشکسالی CDI در ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد که CDI ظرفیت بالایی در شناسایی دوره‌های خشک کشاورزی دارد. به عبارت دیگر، با افزایش شدت خشکسالی، شاخص پوشش گیاهی در ایستگاه‌های منتخب کاهش یافت. وجود چنین رابطه‌ای در بیشتر مطالعات انجام شده به دلیل تنش آبی در پوشش گیاهیست. این نتیجه با یافته‌های [Liu](#) (۲۰۲۴) و [Karnieli](#) و همکاران (۲۰۱۰)

References

- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., Hassanzadeh, E., Huning, L.S., Mallakpour, I., Martinez, A., Mazdiyasn, O., Moftakhari, H., Norouzi, H., Sadegh, M., Sadeqi, D., Van Loon, A.F. and Wanders, N., 2021. Anthropogenic Drought: Definition,

- Challenges, and Opportunities. Reviews of Geophysics 59, e2019RG000683. DOI:10.1029/2019RG000683
- Akaike, H., 1998. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, in: Parzen, E., Tanabe, K., Kitagawa, G. (Eds.), Selected Papers of Hirotugu Akaike. Springer New York, New York, NY, pp. 199-213. DOI:10.1007/978-1-4612-

- 1694-0_15
- Ault, T.R., 2020. On the essentials of drought in a changing climate. *Science* 368, 256-260. DOI:10.1126/science.aaz5492
 - Bazrafshan, J., Cheraghalizadeh, M. and Shahgholian, K., 2022. Development of a Non-stationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI) for Drought Monitoring in a Changing Climate. *Water Resources Management* 36, 3523-3543. DOI:10.1007/s11269-022-03209-x
 - Bazrafshan, J., Hejabi, S. and Rahimi, J., 2014. Drought Monitoring Using the Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI). *Water Resources Management* 28, 1045-1060. DOI: 10.1007/s11269-014-0533-2
 - Bazrafshan, J., Nadi, M. and Ghorbani, K., 2015. Comparison of Empirical Copula-Based Joint Deficit Index (JDI) and Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI) for Drought Monitoring in Iran. *Water Resources Management* 29, 2027-2044. DOI: 10.1007/s11269-015-0926-x
 - Cheraghalizadeh, M., Ghameshlou, A.N., Bazrafshan, J. and Bazrafshan, O., 2018. A copula-based joint meteorological-hydrological drought index in a humid region (Kasilian basin, North Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 11, 300. DOI: 10.1007/s12517-018-3671-7
 - Haile, G.G., Tang, Q., Li, W., Liu, X. and Zhang, X., 2020. Drought: Progress in broadening its understanding. *WIREs Water* 7, e1407. DOI: 10.1002/wat2.1407
 - Hao, Z. and AghaKouchak, A., 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57, 12-18. DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.03.009
 - Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N. and Goldberg, A., 2010. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *Journal of Climate* 23, 618-633. DOI: 10.1175/2009JCLI2900.1
 - Keyantash, J.A. and Dracup, J.A., 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research* 40, W09304. DOI: 10.1029/2003WR002610
 - Klein Tank, A.M.G. and Zwiers, F.W., 2009. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WCDMP- No. 72, WMO.
 - Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y. and Zhang, J., 2020. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. *Science of The Total Environment* 711, 134585. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134585
 - Liu, W., 2024. The Response of NDVI to Drought at Different Temporal Scales in the Yellow River Basin from 2003 to 2020. *Water* 16, 2416. DOI: 10.3390/w16172416
 - Ma, M., Ren, L., Singh, V.P., Tu, X., Jiang, S. and Liu, Y., 2015. Evaluation and application of the SPDI-JDI for droughts in Texas, USA. *Journal of Hydrology* 521, 34-45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.074
 - McKee, T.B., Doeskin, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, Proceedings of the eighth conference on applied climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA, pp. 179-184.
 - Mirabbasi, R., Anagnostou, E.N., Fakheri-Fard, A., Dinpashoh, Y. and Eslamian, S., 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology* 492, 35-48. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.019
 - Mishra, A.K. and Singh, V.P., 2011. Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology* 403, 157-175. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.049
 - Mohammadi, H., Bazrafshan, J. and Liaghat, A., 2023. Correlation analysis of drought-dust and its relationship with vegetation changes in Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 54, 1447-1465. DOI: 10.22059/IJSWR.2023.364328.669560
 - Nagler, T., Schepsmeier, U., Stoeber, J., Brechmann, E.C., Graeler, B. and Erhardt, T., 2024. VineCopula: Statistical Inference of Vine Copulas, R package version 2.6.0 ed. DOI: 10.32614/CRAN.package.VineCopula
 - Rahimzadeh Bajgiran, P., Darvishsefat, A.A., Khalili, A. and Makhdoum M.F., 2008. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran. *Journal of Arid Environments* 72, 1086-109. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2007.12.004
 - Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2, 359-392. DOI: 10.1002/wat2.1085
 - Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23, 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
 - Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C. and Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering* 17, 318-332. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433
 - Wang, L., Chen, W., Fu, Q., Huang, G., Wang, Q.,

- Chotamonsak, C. and Limsakul, A., 2022. Super droughts over East Asia since 1960 under the impacts of global warming and decadal variability. *International Journal of Climatology* 42, 450-4521. DOI: 10.1002/joc.7483
- Wang, L., Chen, W., Zhou, W. and Huang, G., 2016. Understanding and detecting super-extreme droughts in Southwest China through an integrated approach and index. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 529-535. DOI: 10.1002/qj.2593
- Wang, L., Huang ,G., Chen, W. and Wang, T., 2023. Super Drought under Global Warming Concept, Monitoring Index, and Validation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 104, E943-E969. DOI: 10.1175/BAMS-D-22-0182.1