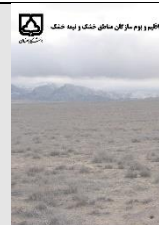




Semnan University

Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions

<https://ceasr.semnan.ac.ir>



Research Article

Structural Equation Modeling the Relative Contributions of Climatic Drivers (Precipitation and Temperature) to Drought Occurrence

Jafar Dastorani ^{a,*}

^a Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran

ARTICLE INFO

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 19 November 2025
Revised: 30 Desember 2025
Accepted: 4 April 2026

Keywords:
Precipitation,
Temperature,
Drought drivers,
Structural equation
Modeling,
Reflection model.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Drought and wetness are complex phenomena in which many factors have different effects. The introduced drought indices have tried to formulate the effect of these factors on drought severity as if they reflect real conditions. Therefore, each index has advantages and disadvantages that a single examination of the index cannot provide comprehensive information in this regard. On the other hand, combining and using several indices with multivariate statistical methods provides useful information. Therefore, in this study, the structural equation modeling approach was used to evaluate the relative contribution of drought drivers to evaluate the weight of precipitation and temperature in drought severity.

Materials and Methods: Structural equation modeling (SEM) was used to analyze the relationship between precipitation and temperature with drought. The data used were precipitation and temperature from 10 synoptic stations in the provincial centers of Iran over a period of 60 years. For each station, annual values of four drought indices (SPI, SPEI, RDI and PDI) were calculated. Before using the indices in structural equation modeling, the values of the indices were cleaned and direction of the indices was corrected (PDI values were multiplied by -1 to align with other indices). In the next step, its structural equation model was designed and implemented. The parameters were estimated using maximum likelihood (ML) method and CFI, RMSEA and SRMR criteria were used to evaluate the model fit. The model fit was accepted when $CFI > 0.90$, $RMSEA < 0.08$ and $SRMR < 0.08$.

Results: The structural equation model showed that the proposed model had a good fit. All four indices (SPI, SPEI, RDI and PDI) had significant factor loadings with drought. The highest loading factor belonged to the SPEI index ($\lambda = 0.86$) and the lowest to the SPI ($\lambda = 0.59$). The paths between exogenous variables and drought were both significant. Precipitation had a strong and negative effect on drought ($\beta = -0.71$, $p < 0.001$), while temperature showed a positive and significant effect ($\beta = 0.48$, $p < 0.01$). In general, based on these four indices and constructs, 64% of the variance of the latent variable of drought was explained by precipitation and temperature. The relative

* Corresponding author: Jdastorani@semnan.ac.ir

contribution of precipitation and temperature to drought was calculated as 69 and 31%, respectively, based on the squared coefficients of the structural equation model.

Conclusion: Structural equation modeling showed that the modified combination of SPI, SPEI, RDI, and PDI indices can well-represent the latent concept of drought. Based on these indices, precipitation had the greatest reducing effect on drought severity, while increasing temperature significantly intensified drought. Also, different factor loadings of the indices showed that SPI and RDI reflect precipitation changes more than other indices, while SPEI and PDI are more sensitive to temperature fluctuations. This separation of the indices' functions highlights the value of using structural equation models in analyzing drought dynamics, because it allows for the simultaneous examination of direct and indirect effects of climate variables. Overall, this study confirms that SEM models are a powerful tool for explaining multivariate climate relationships and can be used to assess drought trends and risk at a regional scale. This research was able to address some of these foundations in the field of drought. To complete this process, extensive researches are needed in this field. By using other indicators, it is possible to obtain more accurate results, create a suitable hybrid model for assessing the severity of drought, and simultaneously understand the contribution of variables to the occurrence of the phenomenon.

Cite this article: Dastorani, J. (2026). Structural equation modeling the relative contributions of climatic drivers (precipitation and temperature) to drought occurrence. *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 3(1), 1-12.

© 2026 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.39770.1062>

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی معادلات ساختاری سهم نسبی محرکین اقلیمی بارش و دما در وقوع خشکسالی

جعفر دستورانی^{*۱}

۱- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*: نویسنده مسئول، Jdastorani@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵	سابقه و هدف: خشکسالی و ترسالی پدیده پیچیده‌ای است که عوامل اثرگذار متفاوتی در وقوع آنها دخالت دارند. شاخص‌های معرفی شده خشکسالی تلاش نموده‌اند تأثیر این عوامل را در شدت خشکسالی به گونه‌ای که شرایط واقعی را نشان دهند فرموله نمایند. بنابراین، هر شاخص مزایا و معایبی دارد که بررسی منفرد شاخص‌ها نمی‌تواند اطلاعات جامعی در این خصوص به دست دهد. از سوی دیگر، ترکیب و استفاده توأم چند شاخص با روش‌های آماری چندمتغیره بسیار مفید خواهد بود. لذا در این تحقیق از رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری در ارزیابی سهم نسبی محرکین خشکسالی استفاده شده تا وزن بارش و دما در شدت خشکسالی ارزیابی شود. مواد و روش‌ها: برای تحلیل روابط بین بارش و دما با خشکسالی، از مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل بارش و دمای ۱۰ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌های ایران طی ۶۰ سال بود. برای هر ایستگاه، مقادیر سالانه چهار شاخص خشکسالی SPI، SPEI، RDI و PDI محاسبه شد. مقادیر شاخص‌ها قبل از استفاده در مدل‌سازی معادلات ساختاری، پاک‌سازی و ناهماهنگی جهت شاخص‌ها اصلاح شد (مقادیر PDI در ۱- ضرب شد تا با سایر شاخص‌ها هم‌جهت شود). در گام بعد، مدل معادلات ساختاری آن طراحی و اجرا شد. پارامترها با روش بیشینه درست‌نمایی (ML) برآورد گردید و برای ارزیابی برازش مدل از شاخص‌های CFI، RMSEA و SRMR استفاده شد. برازش مناسب مدل زمانی پذیرفته شد که $CFI > 0.90$، $RMSEA < 0.08$ و $SRMR < 0.08$ باشد. یافته‌ها: نتایج مدل معادلات ساختاری نشان داد که مدل پیشنهادی از برازش مطلوبی برخوردار است. هر چهار شاخص SPI، RDI، SPEI و PDI دارای بار عاملی معنادار با سازه خشکسالی بودند. بیشترین بار عاملی به شاخص SPEI ($\lambda = 0.86$) و کمترین به SPI ($\lambda = 0.59$) تعلق داشت. مسیرهای بین متغیرهای برون‌زا و خشکسالی هر دو معنادار بودند. بارش اثر منفی و قوی بر خشکسالی داشت ($\beta = -0.71$, $p < 0.001$). در حالی که دما اثر مثبت و معنادار نشان داد ($\beta = 0.48$, $p < 0.01$). به‌طور کلی، بر مبنای این چهار شاخص و سازه ایجاد شده، ۶۴ درصد از واریانس متغیر نهفته خشکسالی توسط بارش و دما تبیین گردید. سهم نسبی بارش و دما در خشکسالی بر اساس مجذور ضرایب مدل معادلات ساختاری به ترتیب ۶۹ و ۳۱ درصد محاسبه شد. نتیجه‌گیری: مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که ترکیب اصلاحی شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و PDI به خوبی می‌تواند مفهوم نهفته‌ی خشکسالی را بازنمایی کند. بر اساس این شاخص‌ها، بارش بیشترین اثر کاهنده بر شدت خشکسالی را داشت؛ در حالی که افزایش دما به‌طور معناداری باعث تشدید خشکسالی شد. همچنین بارهای عاملی متفاوت شاخص‌ها نشان دادند که SPI و RDI بیش از سایر شاخص‌ها بازتاب

تغییرات بارش هستند؛ در حالی که SPEI و PDI حساسیت بیشتری به نوسانات دما دارند. این تفکیک کارکرد شاخص‌ها، ارزش استفاده از مدل‌های معادلات ساختاری را در تحلیل پویایی خشکسالی برجسته می‌کند؛ زیرا امکان بررسی هم‌زمان اثرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای اقلیمی را فراهم می‌آورد. به‌طور کلی، این مطالعه تأیید می‌کند که مدل‌های SEM ابزاری قدرتمند برای تبیین روابط چندمتغیره اقلیمی هستند و می‌توانند در ارزیابی روندها و ریسک خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای به‌کار گرفته شوند. این تحقیق توانست به بخشی از این مبانی در زمینه خشکسالی بپردازد. برای تکمیل این فرایند نیاز به تحقیقات گسترده در این زمینه می‌باشد. با بکارگیری شاخص‌های دیگر می‌توان ضمن حصول نتایج دقیق‌تر، مدل ترکیبی مناسب برای ارزیابی شدت خشکسالی ایجاد و هم‌زمان به سهم متغیرها در وقوع پدیده پی برد.

استناد: دستورانی، ج. (۱۴۰۵). مدل‌سازی معادلات ساختاری سهم نسبی محرکین اقلیمی بارش و دما در وقوع خشکسالی. *اقلیم و بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه‌خشک*، ۳(۱)، ۱-۱۲.

ناشر: دانشگاه سمنان

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.39770.1062>

۱- مقدمه

خشکسالی و ترسالی پدیده پیچیده‌ای است که میزان رطوبت و آب قابل دسترس را طی مدت مشخص نشان می‌دهد و در وقوع آن عوامل زیادی با سهم اثرگذاری متفاوت نقش دارند. کمبود یا افزایش بارش همیشه نقش تعیین‌کننده در وقوع خشکسالی ندارد، بلکه عوامل دیگری نظیر دما، باد، بازتابش خورشیدی، ابرناکی، شرایط محیطی و... ممکن است نقش مستقیم یا غیرمستقیم مهمتری ایفا نمایند. کل کشور ایران دارای شرایطی است که بر اثر تغییرات اقلیمی رخ داده از کاهش نزولات جوی و گرمایش جهانی متأثر شده است. اما به طور کلی و یا مطالعه هدفمند در خصوص تأثیر عوامل اقلیمی مبتنی بر روش‌های آماری چندمتغیره برای تعیین سهم نسبی عوامل اقلیمی بر خشکسالی انجام نشده است. اگرچه گزارش‌های پراکنده در ایران و دنیا در این خصوص منتشر شده است (به عنوان مثال، به عوامل بارش، دمای و سرعت باد در خشکسالی ایلام Lotfi Nasab Asl و همکاران، ۲۰۲۴) و در مناطق میانی و پایینی فلات لس، دما به عنوان عامل اصلی و مستقیم و تبخیر و تعرق بالقوه، به عنوان واسطه در خشکسالی اشاره شده است (Ding و همکاران، ۲۰۲۴)) با این حال، همچنان شاخص‌های معرفی شده خشکسالی زیادی معرفی و برای ارزیابی استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها تلاش نموده‌اند تأثیر این عوامل را در شدت خشکسالی به گونه‌ای که شرایط واقعی را نشان دهند فرموله نمایند. لذا علیرغم اینکه شاخص‌ها دارای هدف مشخص نمایش شرایط واقعی خشکسالی- ترسالی هستند اما همچنان اختلافات بین آنها مشهود است زیرا هنوز تأثیر عوامل اقلیمی به خوبی مشخص نشده و تغییرات مکانی و زمانی عوامل نیز بر پیچیدگی آن افزوده است. بنابراین، هر شاخص، مزایا و معایبی دارد که بررسی منفرد شاخص نمی‌تواند اطلاعات جامعی در این خصوص به دست دهد. از سوی دیگر، ترکیب و استفاده توأم چند شاخص با روش‌های آماری چندمتغیره اطلاعات مفیدی به عنوان مثال علل همگرایی یا واگرایی شاخص‌ها، سهم نسبی اثر مستقیم/غیرمستقیم متغیر مستقل بر متغیر وابسته، ارزیابی روابی بیرونی یک سازه ترکیبی حاصل از چند متغیر وابسته و ارزیابی بار عاملی متغیرهای دخیل در یک سازه ترکیبی به دست می‌دهد. در تحقیقات قبلی خشکسالی، تحلیل‌های چندمتغیره کمتر برای آشکارسازی این مبانی مورد بررسی قرار گرفته است و ابهاماتی همچنان باقی مانده است. لذا رویکردهای سنتی برای شناسایی محرک‌های خشکسالی با محدودیت‌های روش‌شناختی قابل توجهی مواجه هستند. تکنیک‌های آماری رایج مانند تحلیل همبستگی و رگرسیون چندگانه نمی‌توانند روابط علی را از همبستگی‌های تصادفی، به ویژه در سیستم‌های پیچیده محیطی، تشخیص دهند (Hastie و همکاران، ۲۰۰۹؛ Zscheischler و

همکاران، ۲۰۲۰). اما بسیاری از روش‌های تحلیل علی، قابلیت‌های تشخیص بهبود یافته‌ای دارند که استفاده از آن در بررسی محرک‌های خشکسالی، با کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی عوامل کنترل‌کننده خاص منطقه کمک می‌کند (Eyring و همکاران، ۲۰۲۴). در همین راستا، از مدل‌سازی معادلات ساختاری به عنوان یک روش تحلیل علی، در تحقیقات خشکالی به عنوان مثال در واکاوی داده‌ها در سازه‌های اثرگذار بر مدیریت خشکسالی کشاورزان استفاده شده است (Keshavarz و Karami، ۲۰۰۸). اما مدل‌سازی معادلات ساختاری برای تحقیقات خشکسالی که از طریق شاخص‌های خشکسالی انجام می‌شود، می‌تواند به کار گرفته شود و مبانی شاخص‌ها مانند نحوه تدوین صحیح مدل‌های نظری و تجربی، جایگاه هر یک از متغیرهای مستقل (مانند بارش و دما)، متغیرهای میانجی، کنترلی، مداخله‌گر و تعدیل‌کننده مانند تبخیر و تفرق را مورد بررسی و تحلیل نمود. همچنین، میزان اثرگذاری متغیرها آشکار می‌شود و با بهره‌گیری از نقاط قوت شاخص‌ها، یک مدل ترکیبی با دقت بالا در ارزیابی خشکسالی معرفی کرد و متقابلاً شاخص‌های ناکارآمد را حذف نمود. در این تحقیق، مدل‌سازی معادلات ساختاری برای ارزیابی سهم نسبی محرکین وقوع ترسالی - خشکسالی (بارش و دما) طراحی و اجرا شد تا در تصمیم‌گیری برای انتخاب شاخص‌های مناسب ارزیابی شدت خشکسالی کمک نمود. همچنین به بار عاملی چهار شاخص خشکسالی مورد بررسی بر سازه ترکیبی و تعیین شاخص قوی پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه پژوهش و ایستگاه‌های مورد مطالعه

با توجه به هدف تحقیق و حصول نتایج اولیه در خصوص نقش توأم بارش و دما بر شدت خشکسالی در سطح کشور و تأثیر طول دوره آماری بر نتایج حاصل، در این تحقیق، کل کشور مدنظر قرار گرفت. ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی مراکز استان‌ها که احتمال برخورداری از آمار طولانی مدت مورد نیاز این تحقیق شامل بارش، دما و تبخیر و تفرق داشتند بررسی و تعداد ۱۰ ایستگاه شامل ایستگاه‌های اراک، ارومیه، اصفهان، تهران، خرم‌آباد، زنجان، سمنان، کرمان، گرگان و یزد دارای طول دوره آماری بلندمدت ۶۰ سال و شرایط اقلیمی متفاوت انتخاب شدند.

۲-۲- روش کار

در این تحقیق، برای تحلیل روابط علی و تعیین سهم و نقش نسبی بارش و دما در خشکسالی، مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) (رویکرد مدل انعکاسی) طراحی و اجرا شد. بارش و دما به عنوان متغیر مستقل آشکار و تأثیرگذار بر متغیر وابسته پنهان سازه خشکسالی متشکل از چهار شاخص خشکسالی SPI، SPEI، RDI و PDI در نظر گرفته شدند. مقادیر سالانه شدت خشکسالی از طریق این شاخص‌ها برآورد شد که بازتاب سازه خشکسالی هستند. قبل از وارد کردن داده‌ها به مدل، پاک‌سازی و ناهماهنگی جهت شاخص‌ها اصلاح شد (مقادیر PDI در ۱ - ضرب شد تا با سایر شاخص‌ها هم‌جهت شود). در گام بعد، با استفاده از بسته lavaan در محیط R (Rosseel، ۲۰۱۲)، مدلی شامل دو بخش اندازه‌گیری و ساختاری تعریف گردید. در بخش اندازه‌گیری، متغیر نهفته "خشکسالی" به وسیله چهار شاخص اندازه‌گیری شد. در بخش ساختاری، اثر دو متغیر برون‌زا شامل بارش و دما بر متغیر نهفته خشکسالی مدل‌سازی شد. در نهایت با اجرای مدل طراحی شده، ضرایب تأثیر بارش و دما و سهم نسبی آنها برآورد شد.

۲-۳- داده‌های مورد استفاده

آمار هواشناسی شامل بارش، دما و تبخیر و تفرق از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. با انتخاب ایستگاه‌ها و تعیین دوره آماری، صحت داده‌ها بررسی و با آزمون توالی (Run test) همگنی داده‌ها انجام شد. اقلیم ایستگاه‌ها با روش دومارتن

مشخص شد تا اطلاعات کلی حاصل شود. بر این اساس، ایستگاه‌های اراک، ارومیه، خرم آباد و زنجان دارای اقلیم نیمه خشک، اصفهان، تهران، سمنان، کرمان، و یزد دارای اقلیم خشک و گرگان دارای اقلیم مدیترانه‌ای است.

۲-۴- شاخص‌های خشکسالی بازتابی از سازه خشکسالی

جهت ارزیابی شدت خشکسالی سالانه از شاخص‌های SPEI، SPI، PDI و RDI که در تحقیقات قبلی بنا به دلایلی شاخص بهتر معرفی شده‌اند استفاده شد.

۲-۴-۱- شاخص بارش استاندارد شده SPI

این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مورد نیاز برای محاسبه آن بارندگی می‌باشد. McKee و همکاران (۱۹۹۳) بیان کردند که این شاخص اختلاف در دوره تجمع، امکان مشاهده خشکسالی فصلی، میان مدت و طولانی مدت را مهیا می‌کند. در این تحقیق، به خاطر استفاده گسترده و مشهور بودن آن انتخاب گردید. این شاخص با نرم افزار Drinc محاسبه شد.

۲-۴-۲- شاخص شناسایی خشکسالی (RDI')

شاخص RDI بر اساس نسبت بارش به تبخیر و تعرق پتانسیل است (Tsakiris و Vangelis، ۲۰۰۵). این روش دارای مبنای فیزیکی است و برای هر دوره زمانی مد نظر، مقدار آن از طریق برازش تابع توزیع لوگ نرمال دو پارامتری بر نسبت بارش به تبخیر و تعرق پتانسیل و استاندارد نمودن آن به دست می‌آید (Tsakiris و Vangelis، ۲۰۰۵). در این روش مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت وایت برآورد شد. این روش در مطالعات تبخیر و تعرق پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. Grundstein (۲۰۰۹) نیز از روش تورنت وایت برای تخمین PE استفاده کرد و معتقد است زمانی که اطلاعاتی نظیر سرعت باد، تابش خورشیدی یا فشار بخار در دسترس نیست روش مناسبی است. مقدار اولیه شاخص برای یک بازه معین، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} p_j}{\sum_{j=k}^{j=k} PET_j} \quad (1)$$

که در آن، p_j : بارندگی ماه j ام از سال هیدرولوژیک و PET_j : تبخیر- تعرق پتانسیل ماه j ام از سال هیدرولوژیک می‌باشد. بر اساس آزمون‌های صورت گرفته در مکان‌های متعدد و بازه‌های زمانی مختلف، مقادیر a_k از هر دو توزیع گاما و لوگ نرمال به خوبی تبعیت می‌کند (Vangelis و همکاران، ۲۰۱۱). با فرض تبعیت مقادیر a_k از توزیع لوگ نرمال، تعریف دوم از این شاخص، شاخص شناسایی خشکسالی استاندارد (RDIst)، از فرآیندی مشابه فرآیند محاسبه شاخص بارش استاندارد شده پیروی می‌کند (رابطه ۲).

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\bar{\sigma}_k} \quad (2)$$

که در آن، y_k : لگاریتم طبیعی $\bar{\sigma}_k$ ($y_k = \ln(a_k)$)، میانگین حسابی $\bar{y}_k$ و $\bar{\sigma}_k$ انحراف معیار y_k می‌باشد (Tsakiris و Vangelis، ۲۰۰۵).

۲-۴-۳- شاخص تبخیر و تعرق و بارش استاندارد شده (SPEI)

شاخص SPEI با افزودن تبخیر به SPI معرفی شد و در آن برای استاندارد کردن سری‌های تفاوت بین بارش و تبخیر و تعرق ماه مشخص از توزیع لوگ لجیستیک استفاده می‌شود. این شاخص بر اساس بیلان آب است. تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با روش Thornthwaite (۱۹۴۸) محاسبه می‌شود. اگرچه استفاده از روش تورنت وایت که فقط به تغییرات دما ارتباط دارد و

تبخیر را ساده بیان می کند می تواند از محدودیت روش SPEI در ارزیابی خشکی باشد و باید اصلاحات و توجهات به این موضوع در آینده اتفاق بیفتد. اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه ماه J برابر است با:

$$D_j = P_j - PET_j \quad (3)$$

سپس مقادیر محاسبه شده D_j را می توان به مانند SPI برای سایر مقیاس های زمانی تبدیل کرد. اختلاف تجمعی در مقیاس زمانی K- ماه برای سال i که با $D_{i,j}^k$ نشان داده می شود از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$D_{i,j}^k = \begin{cases} \sum_{l=13-K+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} & j < k \\ \sum_{l=j-K+j}^j D_{i,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} & j \geq k \end{cases} \quad (4)$$

که در آن، $D_{i,j}$ مقدار D_i برای سال i و k برای SPEI سه ماهه و شش ماهه به ترتیب برابر ۳ و ۶ است. این شاخص با نرم افزار R محاسبه شد.

۲-۴-۴- شاخص PDI^۱

Pedj (۱۹۷۵) با بررسی منابع و اثرات بارش و دما بر خشکسالی، این شاخص خشکسالی را پیشنهاد کرد که از این به بعد با PDI بیان می گردد و اختلاف بین ناهنجاری های استاندارد شده (SAIs) سالانه دمای هوای سطح زمین و بارش گفته می شود.

$$PDI = SAITM - SAIRF \quad (5)$$

که در آن SAITM و SAIRF به ترتیب ناهنجاری های استاندارد شده میانگین دمای هوای سطح زمین و بارش در منطقه مورد مطالعه هستند و هرچه دما بیشتر و بارش کمتر باشد منجر به اقلیم خشک تر می گردد. پس در روش Pedj از دما نیز استفاده می شود که فاکتور مهم در فرآیند تبخیر و ذخیره رطوبت خاک است. محاسبه این شاخص در مقیاس ۱۲ ماه انجام شد.

۲-۵-۵- اجزای مدل

مدل معادلات ساختاری از اجزای مختلف تشکیل می شود و شامل ۱- متغیرهای وابسته که بر سازه نهته تأثیر می گذارند ۲- چندین متغیر مستقل که در کنار آن ۳- مقدار خطا که محاسبه خواهد شد، می باشند.

۲-۵-۱- بارش و دما: متغیرهای مستقل آشکار

با بررسی شاخص های مورد استفاده در این تحقیق، به نقش متغیرهای دما و بارش در روابط این شاخص ها پی برده می شود. بنابراین این متغیرها به عنوان متغیرهای مستقل آشکار انتخاب شدند تا تأثیر و سهم نسبی آنها بر سازه پنهان خشکسالی ارزیابی شود.

۲-۵-۲- شدت خشکسالی - سازه پنهان

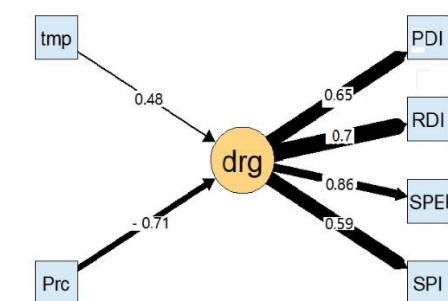
خشکسالی متغیری است که از عوامل و پارامترهای اقلیمی حاصل می شود و از طریق شاخص های خشکسالی سنجیده می شود. به عبارت دیگر، شاخص ها بازتاب دهنده خشکسالی هستند. لذا در این تحقیق، خشکسالی به عنوان سازه پنهان و متغیر وابسته انتخاب شد. ولی برای بیان آن از چند شاخص برآورد شده در این تحقیق استفاده شد تا رابطه علت و معلول بررسی شود. با شرحی که در بخش بعدی بیان می شود سازه مورد نظر به جای شدت خشکسالی، مجموعه ای از چهار شاخص خشکسالی که بازتاب دهنده خشکسالی می باشند در نظر گرفته شد. شاخص ها برای ورود به سازه ترکیبی، از نظر هم جهت بودن بررسی شدند. سپس داده ها پاک سازی و ناهماهنگی جهت شاخص ها اصلاح شد. در نهایت مقادیر PDI در ۱ - ضرب شد تا با سایر شاخص ها هم جهت شود.

۲-۶- مدل‌سازی معادلات ساختاری

در این تحقیق، از میان قابلیت‌های زیاد و با ارزش مدل معادلات ساختاری، فقط از توانایی این مدل‌ها در تعیین نقش نسبی متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته استفاده شد. از این رو، مدل‌سازی بر اساس هدف تحقیق انجام شد. مدل‌سازی معادلات ساختاری، روشی جامع (از روش‌های تحلیل مسیر، رگرسیون و تحلیل عاملی) در تحلیل چند متغیره نظیر این تحقیق می‌باشد و همزمان چند متغیر مستقل آشکار با چند متغیر وابسته آشکار در نظر گرفته می‌شوند تا رابطه علی بین آنها مورد ارزیابی قرار گیرد و در قالب ترکیبی از مدل‌های اندازه‌گیری و مدل‌های ساختاری اجرا می‌شود. بر مبنای مدل‌های اندازه‌گیری، متغیرهای آشکار و متغیرهای پنهان تعریف و بر پایه مدل ساختاری، همبستگی و یا وابسته بودن متغیرها با یکدیگر مشخص شدند. به این ترتیب به طور همزمان کیفیت سنجش متغیرها و مقبولیت اثرات متغیرهای مستقل و به عبارت دیگر توان این متغیرها در تبیین متغیر وابسته و نهایتاً تعامل‌های تعریف شده میان شاخص‌های خشکسالی در متغیر پنهان ارزیابی شد. بر اساس توضیحات فوق و با هدف تعیین سهم نسبی عوامل بارش و دما (متغیرهای پیش‌بین آشکار) در وقوع خشکسالی از مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده و به شرح زیر عمل شد. برای انجام کلیه تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار R استفاده شد.

۲-۶-۱- ترسیم مدل معادلات ساختاری

بعد از شناسایی متغیرهای پنهان و آشکار، با استفاده از بسته lavaan در محیط R (Rosseel, ۲۰۱۲)، مدلی شامل دو بخش اندازه‌گیری و ساختاری تعریف و ترسیم شد. در ترسیم مدل، سرفلش‌ها که به نوع مدل انتخابی بستگی دارد بسیار مهم است. نوع مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل انعکاسی بود؛ زیرا شاخص‌های خشکسالی همگی بازتابی از سازه پنهان خشکسالی هستند. در این مدل، سازه پنهان، علت تغییر در شاخص‌های مشاهده شده است. به عبارت دیگر، شاخص‌ها واکنش‌دهنده به تغییرات خشکسالی هستند. از این رو، سرفلش‌ها از متغیر پنهان به سمت متغیر آشکار رسم گردید (شکل ۱).



شکل ۱. مدل معادلات ساختاری سازه خشکسالی

Fig. 1 The structural equation modeling of drought

در بخش اندازه‌گیری، متغیر نهفته "خشکسالی" به وسیله چهار شاخص PDI و RDI، SPEI، SPI اندازه‌گیری شد. در بخش ساختاری، اثر دو متغیر برون‌زا شامل بارش و دما بر متغیر نهفته خشکسالی مدل‌سازی شد.

۲-۶-۱-۱- مدل اندازه‌گیری (CFA)

چهار شاخص خشکسالی PDI و RDI، SPEI، SPI به عنوان اندیس‌های مشاهده شده یک سازه پنهان به نام شدت خشکسالی (η) مشخص شدند.

اختلافات و ضعف/ قوت هر شاخص خشکسالی در بارهای عاملی (λ)، خطاها (ϵ) و برازش مدل منعکس شد (روابط ۶).

$$\begin{aligned}
 \text{SPI} &= \lambda_1 \times \text{Drought} + \varepsilon_1 \\
 \text{SPEI} &= \lambda_2 \times \text{Drought} + \varepsilon_2 \\
 \text{RDI} &= \lambda_3 \times \text{Drought} + \varepsilon_3 \\
 \text{PDI} &= \lambda_4 \times \text{Drought} + \varepsilon_4
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

۲-۱-۲-۲ مدل ساختاری

بارش و دما به صورت متغیر مستقل آشکار برون‌دادی از طریق ضرایب (β) وارد سازه شدت خشکسالی ترکیبی شدند تا مدل ساختاری تشکیل شود. قدرت رابطه بین خشکسالی و متغیرهای بارش و دما به وسیله همین ضریب یا بار عاملی نشان داده می‌شود بار عاملی مقداری بین صفر و یک است.

۲-۲-۲-۲ اجرا و برازش مدل

روایی و پایایی مدل که میزان مقبولیت را نشان می‌دهد انجام شد. پارامترها با روش بیشینه درست‌نمایی (ML) برآورد گردید و برای ارزیابی برازش مدل از شاخص‌های CFI، RMSEA و SRMR استفاده شد. برازش مناسب مدل زمانی پذیرفته شد که $\text{CFI} > 0.90$ ، $\text{RMSEA} < 0.08$ و $\text{SRMR} < 0.08$ باشد. در مورد بار عاملی شاخص‌های خشکسالی بر سازه خشکسالی، اگر بار عاملی کمتر از ۰/۳ باشد رابطه ضعیف در نظر گرفته شده و از آن صرف نظر می‌شود. بار عاملی بین ۰/۳ تا ۰/۶ قابل قبول است و اگر بزرگتر از ۰/۶ باشد بسیار مطلوب است. همچنین اگر $\text{CFI}/\text{TLI} \geq 0.95$ ، $\text{RMSEA} \leq 0.06$ ، $\text{SRMR} \leq 0.08$ باشد در این حالت برازش مدل خوب بوده، در غیر این صورت به‌خاطر خطای همبسته، مدل اندازه‌گیری یا روابط ساختاری مناسب نبوده و نیاز به بازنگری و استانداردسازی است.

۲-۳-۲ خروجی‌های مدل و ارزیابی سهم نسبی بارش و دما

پس از ترسیم کامل مدل، با پایان یافتن اجرای مدل طراحی شده، خروجی‌های مدل ساختاری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این گام، ضرایب هر یک از متغیرهای مستقل که به صورت مستقیم بر متغیرهای وابسته و سازه پنهان اثر گذاشته بود استخراج شد. سهم نسبی بارش و دما در خشکسالی بر اساس مجذور ضرایب استاندارد مدل معادلات ساختاری محاسبه شد. به این صورت که سهم هر کدام از بارش از طریق مجذور این عوامل بر مجموع مجذورات آنها محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۱ نتایج مدل معادلات ساختاری

مطابق آنچه که در روش تحقیق بیان شد، در مدل‌سازی ساختاری، قبل از استخراج ضرایب هر متغیر مستقل، ساختار مدل و مقبولیت مدل ارزیابی شد. پس از اطمینان از مدل اندازه‌گیری، با اجرای مدل طراحی شده که در آن از تحلیل عاملی تأییدی (CFA) استفاده شد و وزن عامل (ضریب بارش و دما) و همبستگی درونی آزمون شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد.

جدول ۱. نتایج بارهای عاملی شاخص‌های خشکسالی در سازه پنهان شدت خشکسالی

Table 1. Results of factor loads of drought indices in latent drought severity structure

شاخص خشکسالی	SPI	SPEI	RDI	PDI
بار عاملی شاخص	0.59	0.86	0.7	0.65

بر اساس جدول ۱، تأثیر همه شاخص‌ها بر سازه خشکسالی معنی‌دار و مقدار P-value آنها کمتر از ۰/۰۰۱ می‌باشد. اما چون مقدار بار عاملی شاخص SPEI از همه بیشتر است. لذا تأثیر آن بر سازه بیشتر است. نتایج مدل معادلات ساختاری نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از برازش مطلوبی برخوردار است. هر چهار شاخص SPI، SPEI، RDI و PDI دارای بار عاملی

معنادار با سازه خشکسالی بودند. بیشترین بار عاملی به شاخص $SPEI (\lambda = 0.86)$ و کمترین به $SPI (\lambda = 0.59)$ تعلق داشت. مسیرهای بین متغیرهای برونزا و خشکسالی هر دو معنادار بودند. بارش اثر منفی و قوی بر این سازه ترکیبی خشکسالی داشت ($\beta = -0.71, p < 0.001$)، در حالی که دما اثر مثبت و معنادار نشان داد ($\beta = 0.48, p < 0.01$). به‌طور کلی ۶۴ درصد واریانس متغیر نهفته خشکسالی توسط بارش و دما تبیین گردید. سهم نسبی بارش و دما در خشکسالی بر اساس مجذور ضرایب استاندارد مدل معادلات ساختاری به ترتیب ۶۹ و ۳۱ درصد محاسبه شد. از این لحاظ با نتایج حاصل از تحقیق اثر محرک‌های بارش، دما و پوشش زمین بر خشکسالی از طریق مدل ParFLOW-CLM که بر تأثیر بیشتر بارش نسبت به دما در خشکسالی است مطابقت دارد؛ هر چند از نظر مقدار عددی اختلاف دارد (Hein و همکاران، ۲۰۱۹). اما با نتایج Fu و همکاران (۲۰۲۳) که دمای هوا تأثیر بیشتری نسبت به بارندگی بر تشدید خشکسالی در آینده خواهد داشت مغایرت دارد. با این حال، مدل‌سازی معادلات ساختاری در تحقیقات منابع آب طراحی و بهتر از مدل‌های سنتی اثر مستقیم و غیر مستقیم متغیرهای مستقل بر وابسته را کمی‌سازی نموده است. این رویکرد به خوبی اهمیت نسبی عوامل اقلیمی و انسانی را در رواناب ارزیابی نمود (Wang و همکاران، ۲۰۲۴).

۴- نتیجه‌گیری

تعیین سهم نسبی بارش و دما به عنوان محرکین اقلیمی مؤثر بر وقوع خشکسالی هدف اصلی این تحقیق بود. از این رو، بررسی هم‌زمان چند شاخص خشکسالی ضروری می‌باشد. ترکیب شاخص‌های $SPEI$ ، SPI ، RDI و PDI از طریق مدل‌سازی معادلات ساختاری، یک شیوه مناسب انتخاب شد. این ترکیب به‌خوبی مفهوم نهفته خشکسالی را بازنمایی کرد. بر اساس سازه ترکیبی حاصل از این شاخص‌ها، بارش بیشترین اثر کاهنده بر شدت خشکسالی را داشت؛ در حالی که افزایش دما به‌طور معناداری باعث تشدید خشکسالی شد. مدل‌سازی معادلات ساختاری موضوع دیگری را نیز آشکار نمود. بارهای عاملی شاخص‌ها نشان دادند که SPI و RDI بیش از سایر شاخص‌ها بازتاب تغییرات بارش هستند، در حالی که $SPEI$ و PDI حساسیت بیشتری به نوسانات دما دارند. این تفکیک کارکرد شاخص‌ها، ارزش استفاده از مدل‌های معادلات ساختاری را در تحلیل پویایی خشکسالی برجسته می‌کند، زیرا امکان بررسی هم‌زمان اثرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای اقلیمی را فراهم می‌آورد.

به طور کلی، این تحقیق با بهره‌گیری از رویکرد SEM به صورت یکپارچه اثر هم‌زمان بارش و دما را بر شدت خشکسالی و بار عاملی شاخص‌ها و در نتیجه شاخص مناسب‌تر را بررسی کرد، و از این نظر دارای نوآوری علمی قابل توجهی است. این مطالعه تأیید می‌کند که مدل‌های SEM ابزاری قدرتمند برای تبیین روابط چندمتغیره اقلیمی هستند و می‌توانند در ارزیابی روندها و ریسک خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای به‌کار گرفته شوند. از آنجا که این مطالعه داده‌های ۶۰ ساله ده ایستگاه سینوپتیک را به صورت تلفیقی تحلیل کرده است، نتایج آن تصویری کلی از رفتار خشکسالی در کشور ارائه نمود. این تحقیق توانست به بخشی از این مبانی در زمینه خشکسالی بپردازد. برای تکمیل این فرایند نیاز به تحقیقات گسترده در این زمینه می‌باشد. با بکارگیری شاخص‌های دیگر می‌توان ضمن حصول نتایج دقیق‌تر، مدل ترکیبی مناسب برای ارزیابی شدت خشکسالی ایجاد و هم‌زمان به سهم متغیرها در وقوع پدیده پی برد.

۵- سپاس‌گزاری

نویسنده بر خود لازم می‌داند از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای علمی و آقای احسان شهریاری به خاطر نظرات علمی سپاسگزاری نماید.

۶- داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، داده‌های دریافتی از سازمان هواشناسی کشور و تحقیق نویسنده است.

۷- تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید نویسنده است.

۸- مشارکت نویسندگان

تمام مراحل و نگارش این تحقیق توسط نویسنده انجام شده است.

۹- اصول اخلاقی

نویسنده، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید نویسنده می‌باشد.

۱۰- حمایت مالی

این مقاله حاصل نتایج تحقیق مستقل و بدون حمایت مالی سازمانی انجام گردیده است.

۱۱- مراجع

1. Ding, Y., Zhang, L., He, Y., Cao, S., Wei, X., Guo, Y., Ran, L., & Filonchyk, M., (2024). Spatiotemporal evolution of agricultural drought and its attribution under different climate zones and vegetation types in the Yellow River Basin of China. *Science of The Total Environment*, 914, 169687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169687>
2. Eyring, V., Collins, W. D., Gentine, P., Barnes, E. A., Barreiro, M., Beucler, T., Bocquet, M., Bretherton, C.S., Christensen, H.M., Dagon, K., Gagne, D.J., Hall, D., Hammerling, D., Hoyer, S., Iglesias-Suarez, F., Lopez-Gomez, I., McGraw, M.C., Meehl, G.A., Molina, M.J., Monteleoni, C., Mueller, J., Pritchard, M.S.,
3. Fu R., Wang C., Ma D., Gu H., Xie Q., Liu G., & Yin G., (2023). Attribution of air temperature and precipitation to the future global drought events. *Environmental Research Communication*, 5, 061005. DOI.10.1088/2515-7620/acde37
4. Grundstein, A. (2009). Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. *Climatic Change*, 93(1), 103-115. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9480-3>
5. Hastie, T. (2009). The elements of statistical learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, New York.
6. Hein, A., Condon, L., & Maxwell, R. (2019). Evaluating the relative importance of precipitation, temperature and land-cover change in the hydrologic response to extreme meteorological drought conditions over the North American High Plains. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(4), 1931-1950. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1931>
7. Keshavarz, M., & Karami, E., (2008). Factors influencing drought management and impacts: A structural equation modeling approach. *Journal of Water and Soil Science*, 12(43) :267-283[in Persian].
8. Lotfi, N. A. S., Gohardoust, A., & Dargahian, F. (2024). Intuition on climate change in Zagros vegetative regions: Case study of oak tree decline sites in Ilam province. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(2), 149-188. doi: 10.22098/mmws.2023.12438.1242 [In Persian]
9. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* 17(22), 179-183.
10. Pedj, D. A. (1975). On the indicators of drought and moisture surplus. *Proceedings of HMC of USSR*, 156, 19-38.

11. Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*, 48(2), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02>
12. Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
13. Tsakiris, G., & Vangelis, H. J. E. W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
14. Vangelis, H., Spiliotis, M., & Tsakiris, G. (2011). Drought severity assessment based on bivariate probability analysis. *Water Resources Management*, 25(1), 357-371.
15. Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., ... & Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 333-347. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>
16. Wang, Q., Shao, W., Guan, Q., Sun, Y., Du, Q., Zhang, E., Yan, Y., & Yang, X. (2024). The structural equation modeling constructed for runoff change attribution analysis outperforms traditional methods. *Hydrology*, 636, 131317. doi.org/10.1016/