



Evaluation of drought characteristics based on combined global precipitation and runoff products datasets across Iran's sub basins

Fatmeh Moghaddasi¹, **Mahnoosh Moghaddasi²**, **Mehdi Mohammadi Ghaleni³**

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, and Research Institute for Water sciences and Engineering, Arak University, Arak, Iran. Email: f.moghaddasi.00@msc.araku.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. Email: m-moghaddasi@araku.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment and . Research Institute for Water sciences and Engineering, Arak University, Arak, Iran. Email: mohammadighaleni@araku.ac.ir.

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: July. 18, 2023</p> <p>Revised: Sep. 8, 2023</p> <p>Accepted: Sep. 25, 2023</p> <p>Published online: Nov. 22, 2023</p> <p>Keywords: Global datasets of precipitation and runoff, River basin, Entropy Weight, Combined Drought Index.</p>	<p>Recently, with the advancement of technology, extensive facilities have been provided for monitoring climate data with different resolution. Therefore, the aim of this research is to investigate the combination of precipitation databases and simultaneous monitoring of meteorological and hydrological droughts on a monthly time scale using the Combined Drought Index (CDI) at sub basins of Iran. To this end, observational data (100 synoptic stations on a daily scale) and global precipitation and runoff databases including ERA5, MRRRA2, GRUN, GLDAS and TERRA (with different spatial resolution on a monthly scale) were collected and extracted during the period of 1987-2019. Then, based on the aridity index, the climatic classification of the stations and sub basins has been done and the entropy weight method (EW) was employed to combine databases and indices. The accuracy of the datasets was assessed based on Kling Gupta (KGE) and Standardized Mean Square Error (NRMSE) metrics. The results showed that the combination of precipitation databases in the Hyper-arid, Arid, Semi-arid and Humid climates reduced the error index by 32, 10, 24 and 26%, respectively, compared to individual databases. In the 3-month scale, the sub basin of Sefidroud, Lake Namak, and Talesh, and in the 12-month scale, the sub basin of Lake Urmia, Lake Namak, Sefid Rud, Hamon Jazmourian, Hamon Mashkel, South Baluchistan, and parts of Aras River have faced with drought with more severity, duration, and peak values of drought. It should be said that, on average, in both scales, the middle part of the country has less drought severity and duration. The extent of drought in the river basins of Hyper-arid, Arid and Semi-arid climates in the scale of 3 and 12 months on average is 45 and 53%, and 70 and 40% in Humid climates. Based on these findings, it can be concluded that the combining precipitation databases enhances the accuracy compared to using global single databases. Additionally, drought in the humid climate shows higher intensity, duration, and extent in the short-term scale compared to the long-term scale.</p>

Cite this article: Moghaddasi, F., Moghaddasi, M., & Mohammadi Ghaleni, M. (2023). Evaluation of drought characteristics based on combined global precipitation and runoff products datasets across Iran's sub basins, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (9), 1299-1317. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.362401.669537>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.362401.669537>



ارزیابی خصوصیات خشکسالی بر اساس ترکیب داده‌های بارش و رواناب پایگاه‌های جهانی در حوضه‌های آبریز درجه دو کشور

فاطمه مقدسی^۱، مه‌نوش مقدسی^۲✉، مهدی محمدی قلعه‌نی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست و پژوهشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

رایانامه: f.moghaddasi.00@msc.araku.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

رایانامه: m-moghaddasi@araku.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست و پژوهشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

رایانامه: mohammadighaleni@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۹/۱

واژه‌های کلیدی:

داده‌های جهانی بارش و رواناب، حوضه آبریز، وزن‌دهی آنتروپی، شاخص خشکسالی ترکیبی.

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، امکانات گسترده‌ای برای پایش داده‌های اقلیمی با توان تفکیک متفاوتی فراهم شده است. لذا در تحقیق حاضر، هدف بررسی ترکیب پایگاه‌های داده‌های بارش و پایش همزمان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از شاخص خشکسالی ترکیبی (CDI) در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو کشور می‌باشد. بدین منظور ابتدا داده‌های مشاهداتی (۱۰۰ ایستگاه سینوپتیک در مقیاس روزانه) و پایگاه‌های جهانی بارش و رواناب شامل ERA5، MRRRA2، GLDAS.GRUN و TERRA (در مقیاس ماهانه) طی دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۱۹ گردآوری و استخراج گردید. سپس بر اساس شاخص خشکی، ایستگاه‌ها و حوضه‌ها آبریز طبقه‌بندی شدند و برای ترکیب پایگاه‌ها و شاخص‌ها از روش وزن دهی آنتروپی (EW) استفاده شده است. دقت پایگاه‌ها بر اساس معیارهای کلینگ گوپتا (KGE) و مجذور میانگین مربع خطا استاندارد شده (NRMSE) انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب پایگاه‌های بارش در اقلیم فراهشک، خشک، نیمه خشک و مرطوب به ترتیب ۳۲، ۱۰، ۲۴ و ۲۶ درصد باعث کاهش خطا نسبت به استفاده از پایگاه داده‌های منفرد گردید. در مقیاس ۳ ماهه حوضه آبریز سفیدرود، دریاچه نمک و تالش و در مقیاس ۱۲ ماهه حوضه آبریز دریاچه ارومیه، دریاچه نمک، سفید رود، هامون جازموریان، هامون مشیکل، جنوب بلوچستان و قسمتی از ارس از شدت، مدت و پیک بیشتری برخوردار هستند. بطور متوسط در هر دو مقیاس، خشکسالی‌ها در قسمت میانی کشور از شدت و مدت کمتری برخوردار می‌باشند. وسعت خشکسالی در حوضه‌های اقلیم فراهشک، خشک و نیمه خشک در مقیاس ۳ و ۱۲ ماهه به ترتیب بطور متوسط ۴۵ و ۵۳ درصد و در اقلیم مرطوب ۷۰ و ۴۰ درصد بوده است. بر اساس یافته‌های فوق می‌توان گفت ترکیب پایگاه داده‌های بارش منجر به افزایش دقت استفاده از پایگاه‌های جهانی می‌گردد. همچنین خشکسالی در اقلیم مرطوب از شدت، مدت و وسعت بیشتری در مقیاس کوتاه‌مدت نسبت به بلندمدت برخوردار می‌باشد.

استاد: مقدسی، فاطمه؛ مقدسی، مه‌نوش؛ و محمدی قلعه‌نی، مهدی (۱۴۰۲). ارزیابی خصوصیات خشکسالی بر اساس ترکیب داده‌های بارش و رواناب

پایگاه‌های جهانی در حوضه‌های آبریز درجه دو کشور، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۹)، ۱۳۱۷-۱۲۹۹.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.362401.669537>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.362401.669537>

مقدمه

پراکندگی، تراکم نامناسب، کمبود و همچنین وجود خلاهای آماری در ایستگاه‌های باران سنج، پژوهشگران را با چالش‌های فراوانی برای پایش خشکسالی مواجه کرده است (Su et al., 2008; Xu et al., 2016; Faridzad et al., 2018; Erfani et al., 2020). امروزه توسعه پایگاه‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی داده‌های اقلیمی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا، امکان دسترسی به داده‌های تقریباً به‌هنگام را فراهم کرده و تا حدودی چالش‌های مذکور را مرتفع نموده است. این داده‌ها از منابع مختلفی (۱) ایستگاه-مینا (Gauge-based)، (۲) ماهواره (Remote Sensing)، (۳) مدل‌های عددی و (۴) یا ترکیبی از سه مورد اول (Assimilation) تهیه می‌گردند (Hosseini-Moghari et al., 2018; Sun et al., 2018; Saemian et al., 2022). اگرچه این داده‌ها ذاتاً از دقت کمتری نسبت به داده‌های مشاهده‌ای برخوردار هستند ولی تحقیقات متعددی پتانسیل آن‌ها را به عنوان یک منبع جایگزین مناسب در مناطق فاقد ایستگاه و مناطق با توزیع نامکن ایستگاه‌ها نشان داده است (Pom'eon et al., 2017; Salman et al., 2019; Eghdami and Barros, 2019). از آنجائیکه عملکرد این پایگاه‌ها در زمان و مکان بسیار متفاوت است، انتخاب یک پایگاه مناسب برای پایش چالش‌برانگیز و اهمیت ترکیب پایگاه‌ها را آشکار می‌سازد. برای پایش و شناسایی خشکسالی، شاخص‌های متفاوتی با استفاده از متغیرهای نظیر بارش، دما، رطوبت خاک، رواناب و غیره گسترش یافته است (PDSI: Plamer, 1965; SPI: McKee et al., 1993; RDI: Tsakiris & Vangelis, 2005; SPEI: Vicente-Serrano et al., 2010; SSI: Hao & Aghakouchak, 2013). این شاخص‌ها اکثراً تک متغیره بوده است که برای توصیف اثرات و شرایط پیچیده خشکسالی کافی نیستند. برای غلبه بر این مشکل، شاخص‌های ترکیبی پیشنهاد شده است (Yang et al., 2018). این شاخص‌ها بر اساس رویکردهای مختلف خطی و غیر خطی توسعه یافته‌اند (Beersma & Buishand, 2004; Hao & Aghakouchak, 2013a; Li et al., 2015; Nazeri Tahroudi et al., 2020; Won et al., 2020; Motevali Bashi Naeini et al., 2021).

در این تحقیق بطور کلی هدف، ارزیابی و مقایسه داده‌های بارش پایگاه‌های ^۱TerraClimate، ^۲MERRA2، ^۳GLDAS و ^۴ERA5 و ترکیب آنها در مقیاس ماهانه با داده‌های مشاهده‌ای و استفاده از شاخص ترکیبی هواشناسی و هیدرولوژیکی برای پایش و شناسایی وسعت و طبقات خشکسالی در دو مقیاس کوتاه و بلند مدت طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۷ می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت بالای بیلان و مدیریت منابع آب، این مطالعه در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پیشینه پژوهش

در زمینه ترکیب پایگاه‌ها برای بهبود ارزیابی عملکرد پایگاه‌های منفرد با داده‌های مشاهده‌ای بندرت تحقیقی انجام شده است. به تازگی ترکیب داده‌های بارش پایگاه‌های ERA5، ERA5-Land^۵، TerraClimate، GPM^۶، PERISANN-CDR^۷، TRMM^۸ و CHIRPS^۹ با استفاده از روش‌های ترکیبی OWA^{۱۰} و EW^{۱۱} در اقلیم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت (Fooladi et al., 2023). نتایج نشان داد که ترکیب پایگاه‌ها در بهبود معیارهای ارزیابی عملکرد بالای دارند.

در تحقیقی فهمی‌راد و شاه‌کرمی برای پایش همزمان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز کمال صالح استان مرکزی از شاخص جدید ترکیبی ^{۱۲}(ADI) استفاده نمودند. بدین منظور از دو شاخص خشکسالی بارندگی و رواناب استاندارد شده و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری استفاده شده است. نتایج عملکرد بهتر شاخص ترکیبی نسبت به شاخص‌های منفرد را نشان داد (Fahimirad and Shahkarami, 2021). در تحقیق دیگری برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر احتمال وقوع خشکسالی در مرکز ایران از

1 A dataset of monthly climate and climatic water balance for global terrestrial surfaces

2 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications-2

3 Global Land Data Assimilation System

4 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis systems 5

5 ECMWF Reanalysis v5 - Land (ERA5-LAND)

6 Global Precipitation Measurement

7 Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Dynamic Infrared Rain Rate near real-time

8 Tropical Rainfall Measuring Mission

9 Climate Hazards Group InfraRed Precipitation

10 Ordered Weighted-Averaged

11 Entropy Weight

12 Aggregate Drought Index



شاخص خشکسالی ترکیبی جدیدی به نام شاخص استاندارد خشکسالی چند متغیره (MSDI) که از شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارش (SPEI^۲) و شاخص استاندارد رطوبت خاک (SSI^۳) تشکیل شده است، استفاده گردید. در این راستا داده‌های مورد نیاز شامل بارش، دما از CRU^۴ و رطوبت خاک از ESA CCA SM در مقیاس زمانی ماهانه برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۶ استخراج شده است. نتایج عملکرد بالای شاخص جدید را نشان داد (Naderi et al., 2022). در تحقیق دیگری برای پیش همزمان خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی شاخص ترکیبی جدیدی بر اساس سه شاخص SPI^۵، SRI^۶ و SMI^۷ و با استفاده از روش‌های خطی (PCA^۸، EW^۹) و غیر خطی (KECA^{۱۰}، CF^{۱۱}) توسعه دادند. در این راستا داده‌های مورد نیاز شامل بارندگی، رواناب و رطوبت خاک از پایگاه ERA5 طی دوره ۲۰۲۰-۱۹۷۹ استخراج شده است. نتایج نشان داد شاخص جدید شرایط خشکسالی را بر اساس وقایع ثبت شده، بهتر پیش و شناسایی نموده است (Hosseini et al., 2023).

همان‌طور که در قسمت فوق گفته شد، در مطالعات متعددی داده‌های شبکه‌بندی بارش در مقیاس جهانی یا منطقه‌ای از جمله ایران و شاخص‌های منفرد برای پیش و شناسایی خشکسالی استفاده شده است. اما ترکیب پایگاه‌ها برای بهبود ارزیابی و استفاده از شاخص‌های ترکیبی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین بیشتر موارد فوق در یک حوضه آبریز بررسی شده است.

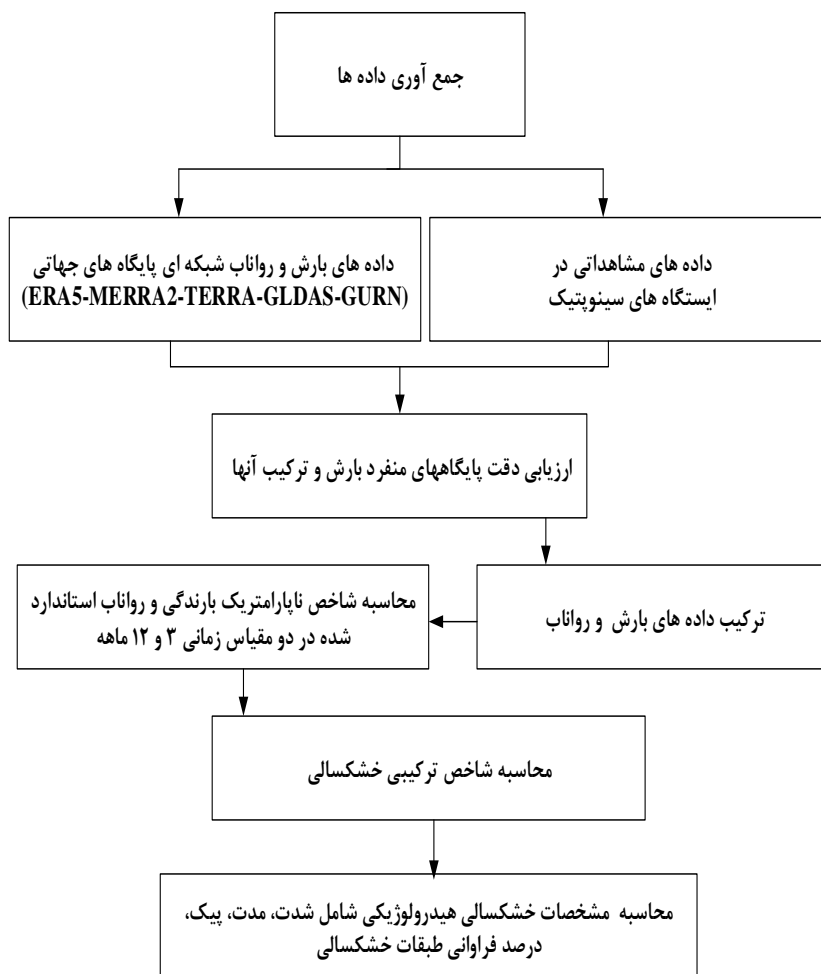
روش‌شناسی پژوهش

در این قسمت ابتدا مراحل انجام تحقیق برای درک بهتر ارائه شده است که در ادامه ابزار مورد استفاده توضیح داده خواهد شد. (شکل ۱). همان‌طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است روش کار به طور کلی دارای ۶ مرحله است (۱) انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس دسته‌بندی اقلیمی و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، (۲) ارزیابی دقت داده‌های بارندگی مورد استفاده، (۳) ترکیب پایگاه‌ها بارندگی و رواناب، (۴) محاسبه شاخص بارش و رواناب استاندارد شده در دو مقیاس زمانی ۳ و ۱۲ ماهه (به منظور مدیریت کوتاه و بلندمدت)، (۵) محاسبه شاخص ترکیبی خشکسالی، (۶) محاسبه مشخصات خشکسالی هیدرولوژیکی شامل شدت، مدت، پیک، درصد فراوانی طبقات خشکسالی. این مراحل در ادامه به طور کامل شرح داده خواهند شد.

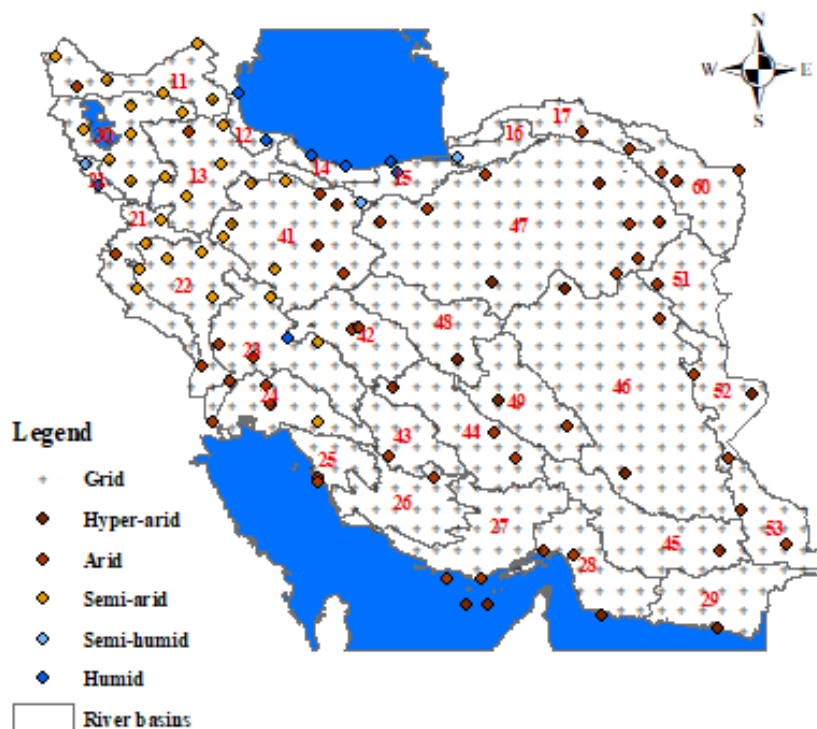
منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در تحقیق حاضر، کشور ایران با تنوع اقلیمی و ۳۰ حوضه آبریز درجه دو می‌باشد. اقلیم‌بندی بر اساس شاخص خشکی یونپ^{۱۲} (UNDP AI = P/PET) که از نسبت میانگین بارش سالانه (P) به میانگین تبخیر تعرق پتانسیل سالانه (PET) بدست می‌آید، انجام شده است. بر اساس این شاخص اقلیم ایران به پنج طبقه فراخشک (P/PET < 0.03)، خشک (0.03 < P/PET < 0.20)، نیمه‌خشک (0.20 < P/PET < 0.50)، نیمه‌مرطوب (0.50 < P/PET < 0.75) و مرطوب (P/PET > 0.75) تقسیم‌بندی می‌گردد (Tsiros et al., 2020; UNESCO, 1979) (شکل ۱).

- 1 Multivariate Standardized Drought Index
- 2 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 3 Standardized Soil Moisture Index
- 4 Climate Research Unit
- 5 Standardized Precipitation Index
- 6 Standardized Runoff Index
- 7 Standardized Soil Moisture Index
- 8 Principal Component Analysis
- 9 Entropy Weight
- 10 Kernel Mean Component Analysis
- 11 Copula Function
- 12 United Nations Environment Programme Aridity Index (UNDP AI)



شکل ۱. فلوچارت مراحل انجام پژوهش حاضر



شکل ۲. موقعیت حوضه های آبریز درجه دو و ایستگاه های سینوپتیک



داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از شش منبع داده شامل داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و باز تحلیل شده چهار پایگاه TerraClimate، MERRA2، GRUN، ERA5 و GLDAS استفاده شده است. داده‌های روزانه بارش، دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی ۱۰۰ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور از سازمان هواشناسی ایران^۱ (IRIMO) طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹ جمع‌آوری گردید. بارش ماهانه از داده‌های روزانه و تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش پنمن-مانتیث فائو^۲ (FAO-PM (NO:56)) و سپس متوسط بارش و تبخیر و تعرق سالانه برای برآورد شاخص خشکی در ایستگاه‌های سینوپتیک و با استفاده از روش چندضلعی تیسن در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو محاسبه شده است. نتایج تقسیم‌بندی اقلیمی حوضه‌ها آبریز درجه دو در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات حوضه‌های آبریز درجه دو مورد مطالعه پژوهش حاضر در ایران طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹

شخص خشکی	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در سال)	بارش (میلی‌متر در سال)	دمای میانگین (درجه سانتی‌گراد)	مساحت (هزار کیلومتر مربع)	نام حوضه	کد	اقلیم حوضه
۰.۰۳	۳۱۰۲	۸۰	۱۹.۰	۴۸.۶	کویر سیاه‌کوه	۴۸	ف. ا. خشک
۰.۰۳	۳۳۷۲	۹۳	۱۸.۰	۵۰.۷	کویر درنجیر	۴۹	
۰.۰۳	۳۲۶۸	۹۱	۲۰.۷	۳۳.۶	هامون هیرمند	۵۲	
۰.۰۳	۴۰۵۸	۱۱۵	۲۶.۱	۴۸.۵	بلوچستان جنوبی	۲۹	
۰.۰۳	۳۲۷۰	۱۰۴	۲۳.۴	۶۹.۴	هامون جازموریان	۴۵	
۰.۰۳	۳۱۳۹	۱۰۷	۲۰.۱	۲۰.۶۴	کویر لوت	۴۶	
۰.۰۴	۳۶۴۰	۱۴۱	۲۲.۲	۴۴.۸	بندرعباس سدیج	۲۸	
۰.۰۴	۲۷۲۷	۱۲۰	۲۱.۵	۳۶.۵	هامون مشکیل	۵۳	
۰.۰۵	۳۱۳۳	۱۶۹	۲۴.۵	۶۲.۹	کل مهران	۲۷	
۰.۰۶	۲۲۲۵	۱۳۷	۱۶.۶	۵۷.۱	ابرقو سیرجان	۴۴	
۰.۰۷	۲۶۵۱	۱۷۴	۱۹.۹	۲۲۶.۵	کویر مرکزی	۴۷	ش. خشک
۰.۰۸	۲۴۶۴	۱۸۶	۱۵.۵	۳۳.۱	نمکزار خواف	۵۱	
۰.۱۰	۲۶۴۵	۲۷۷	۲۰.۷	۴۷.۸	مند	۲۶	
۰.۱۲	۲۶۹۱	۳۲۵	۲۲.۹	۲۱.۳	حله	۲۵	
۰.۱۳	۱۹۸۳	۲۵۸	۱۵.۳	۹۲.۹	دریاچه نمک	۴۱	
۰.۱۳	۱۹۴۴	۲۵۵	۱۷.۵	۳۱.۵	طشک بختگان	۴۳	
۰.۱۳	۲۳۴۹	۳۱۰	۱۶.۶	۱۳/۰	قره‌سو گرگان	۱۶	
۰.۱۴	۲۰۶۷	۲۸۷	۱۵.۵	۴۴.۳	قره قوم	۶۰	
۰.۱۴	۱۶۸۳	۲۴۳	۱۴.۹	۴۱.۶	گاوخونی	۴۲	
۰.۱۵	۲۰۹۵	۳۱۵	۲۴.۹	۴۰.۸	جراحی زهره	۲۴	
۰.۲۱	۱۵۸۷	۳۲۹	۱۵.۰	۲۶.۴	اترک	۱۷	پ. نیمه‌خشک
۰.۲۵	۱۱۴۲	۲۸۰	۱۲.۳	۳۹.۸	ارس	۱۱	
۰.۲۷	۱۲۳۵	۳۳۰	۱۲.۶	۵۱.۸	دریاچه ارومیه	۳۰	
۰.۲۸	۱۵۳۹	۴۲۸	۱۷.۱	۵۱.۹	کرخه	۲۲	
۰.۲۹	۱۶۶۰	۴۷۷	۱۸.۲	۶۶.۷	کارون بزرگ	۲۳	
۰.۳۱	۱۶۲۵	۵۰۹	۱۶.۴	۳۹.۳	مرزی غرب	۲۱	
۰.۳۴	۱۱۶۸	۳۹۳	۱۲.۱	۵۹.۲	سفیدرود	۱۳	
۰.۵۶	۱۰۸۶	۶۱۳	۱۶.۳	۱۸.۸	هراز قره‌سو	۱۵	
۱.۲۰	۹۴۲	۱۱۳۵	۱۳.۹	۷.۰	رودخانه‌های تالش	۱۲	
۱.۲۲	۹۶۳	۱۱۷۳	۱۶.۴	۱۰.۹	سفیدرود هراز	۱۴	

1. Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO)

2. Penman-Monteith method based on Food and Agriculture Organization in its Irrigation and Drainage Paper No. 56

پایگاه داده GLDAS، به طور مشترک توسط دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (ناسا)، مرکز فضایی پروازهای گودارد، سازمان ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی و مرکز بین المللی پیش‌بینی محیط زیست به منظور تولید محصولات مختلف توسعه داده شده است (Rodell et al., 2004). این مدل در واقع با هدف ادغام محصولات ماهواره‌های و مشاهدات زمینی با استفاده از مدلسازی و تکنیک‌های پیشرفته همسان‌سازی به منظور برآوردهای مطلوب از شار سطح زمین و منابع آب و انرژی طراحی شده است. حالت‌ها و شارهای سطح زمین با استفاده از چهار مدل سطحی پرکاربرد از جمله 'NOAH'، 'Mosaic'، 'VIC' و 'CLM' شبیه‌سازی گردیده است (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov).

پایگاه داده TERRA (TerraClimate)، شامل مجموعه‌ای از داده‌های ماهانه آب و هوا و بیلان آب با تفکیک مکانی بالا برای سطوح زمینی جهانی است. این پایگاه از درون‌یابی، ترکیبی از نرمال‌های اقلیمی از مجموعه داده WorldClim با تفکیک مکانی بالا برای تولید مجموعه داده ماهانه بارش، حداکثر و حداقل دما، سرعت باد، فشار بخار و تابش خورشیدی استفاده می‌نماید. علاوه بر این، مجموعه داده‌های ماهانه تعادل آب سطحی را با استفاده از یک مدل بیلان آب تولید می‌کند که تبخیر و تعرق مرجع، بارش، دما و ظرفیت آب خاک قابل استخراج گیاه را در خود جای داده است (https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE).

پایگاه داده ERA5، داده‌های نسل پنجم پایگاه داده ECMWF می‌باشد که در مقایسه با داده‌های ERA-Interim تغییرات مهمی از جمله وضوح مکانی و زمانی بالاتر، جذب مشاهدات بیشتر، مدل عددی بهبود یافته و شبیه‌سازی طرح‌های داده‌ها و نسخه‌های بهبود یافته، پیدا کرده است (Hersbach et al., 2018). این داده‌ها آخرین مجموعه داده‌های باز تحلیل با تفکیک مکانی ۳۱ کیلومتر، ۱۳۷ سطح تا ۰/۰۱ هکتوپاسکال می‌باشند که پارامترهای جوی، سطح زمین و اقیانوسی را همراه با عدم قطعیت‌های آنها از سال ۱۹۷۹ تاکنون در اختیار کاربران قرار می‌دهد. مجموعه داده ERA5 به دلیل افزایش تفکیک افقی، خروجی سه ساعته، بهبود دقت و نمایش بهتر جزئیات در سطح مدل نسبت به ERA-Interim، جایگزین ERA-Interim شده است. به روزرسانی مجموعه داده و دقت این پارامترها به ترتیب هر ۵ روز و هر سه ماه منتشر می‌شود. قابل ذکر است که در تحقیق حاضر از داده‌های ماهانه هر دو مدل فوق و با دقت مکانی ۰/۱۲۵×۰/۱۲۵ درجه‌ی جغرافیایی (حدود ۱۰ کیلومتر) استفاده شده است (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5).

پایگاه داده MERRA، مدل تحلیل گذشته‌نگر عصر مدرن برای تحقیقات و کاربردها (MERRA) با استفاده از داده‌های زمینی توسط NASA توسعه یافته است (Rienecker et al., 2011; Gelaro et al., 2017). داده‌های ماهانه بارش از نسخه دوم مدل MERRA با عنوان MERRA2 (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2) دریافت و استفاده شده است.

پایگاه داده GRUN-Ensemble، یک بازسازی رواناب مبتنی بر مشاهده (ایستگاه-مبنا) است که از الگوریتم یادگیری ماشینی (ML) برای تخمین نرخ رواناب جهانی طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۰۱ استفاده می‌کند (Ghiggi et al., 2019). یکی از اشکالات آن این است که مبتنی بر یک مجموعه داده اجباری جو است (GSWP3; Kim et al., 2017). سپس یک رواناب بازسازی جدید به نام G-RUN ENSEMBLE با حداکثر ۵۲۵ عضو گروه بر اساس ۲۱ مجموعه داده اجباری جوی مختلف تولید شده است (https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12794075).

البته قابل ذکر است اطلاعات پایگاه‌های فوق با تفکیک مکانی‌های مختلف (مطابق جدول ۲)، به ۰/۵*۰/۵ تبدیل شده است. بر این اساس اطلاعات بارش و رواناب کل پایگاه‌های برای ۶۲۱ پیکسل استخراج گردید.

جدول ۲. مشخصات پایگاه داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

دوره آماری مشترک	دوره آماری در دسترس	متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی	تفکیک مکانی	مقیاس زمانی	منبع	نوع داده
	۱۹۰۱-۲۰۱۹	رواناب	۰/۵×۰/۵۰	ماهانه	G-RUN ENSEMBLE	
	۱۹۷۹-۲۰۲۲	بارش و رواناب	۰/۲۵×۰/۲۵۰	ماهانه	ERA5	
۱۹۸۷-۲۰۱۹	۱۹۴۸-۲۰۲۲	بارش و رواناب	۰/۲۵×۰/۲۵	ماهانه	GLDAS	باز تحلیل شده
	۱۹۵۸-۲۰۲۲	بارش و رواناب	۰/۰۴×۰/۰۴	ماهانه	TerraClimate	
	۱۹۸۰-۲۰۲۲	بارش	۰/۶۲۵×۰/۵	ماهانه	MERRA2	

1 Community Land Model

2 Variable Infiltration Capacity

3 Mashin Learning



روش وزن آنترپی (Entropy Weight)

EW یک روش خطی برای وزن دهی شاخص‌ها است (Zhu et al., 2018). در اینجا، ماتریس مشتق شده از شاخص استاندارد می‌شود. سپس آنترپی هر شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H_j = \frac{-\sum_{i=1}^m f_{i,j} * \ln(f_{i,j})}{\ln(m)} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن:

$$f_{ij} = \frac{\text{abs}(r_{i,j})}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(r_{i,j})} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، f_{ij} مقدار ماتریس شاخص، m سال، i متغیر و j ماه می‌باشد. وزن هر شاخص را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$D_j = 1 - H_j \quad \text{رابطه ۳}$$

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad \text{رابطه ۴}$$

جایی که w_j وزن اختصاص داده شده به هر متغیر است که در آن کار می‌شود $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ، D_j نشان دهنده آنترپی برای متغیر j^{th} است.

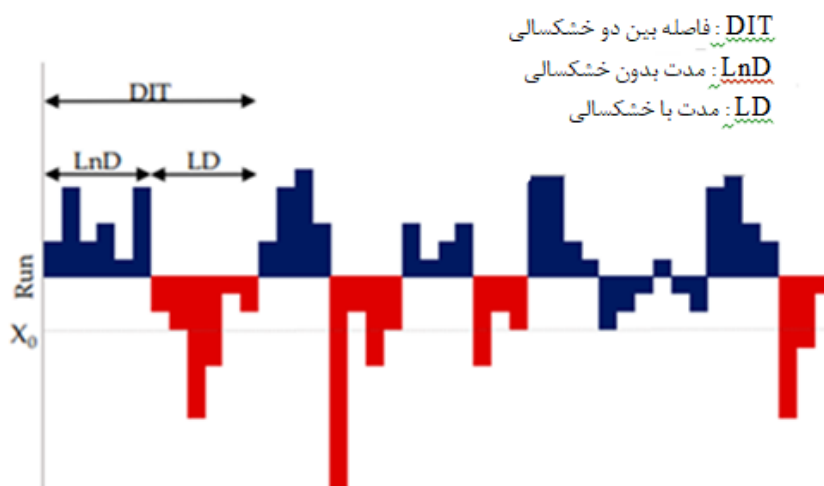
شاخص خشکسالی ترکیبی (Combined Drought Index; CDI)

یکی از رایج‌ترین شاخص‌های مورد استفاده برای خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، شاخص بارش و رواناب استاندارد شده (SPI: Mackee et al., 1993, SRI: Shukla and Wood, 2008) می‌باشند که به دلیل سادگی، ماهیت استاندارد و انعطاف‌پذیری آنها توسط بسیاری از تحقیقات مورد مطالعه قرار گرفته است. محاسبه این شاخص‌ها به این صورت است که در گام اول ابتدا مناسب‌ترین توزیع بر مقادیر بارش و دبی ماهانه هر ایستگاه و احتمالات تجمعی برازش داده می‌شود. یکی از اصلی‌ترین ملاک‌ها برای انتخاب توزیع که در تحقیق حاضر نیز استفاده شده است، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف است. این آزمون نوعی آزمون نیکوئی برازش برای مقایسه یک توزیع نظری با توزیع مشاهده شده است که به منظور تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع آماری برای یک زمان خاص انجام می‌شود. سپس در گام دوم، انتقال هم‌احتمال از توزیع برازش تجمعی به توزیع استاندارد نرمال تجمعی با استفاده از دستور NORMINV در محیط برنامه نویسی متلب انجام می‌گردد. لازم به ذکر است پیش فرض اولیه در محاسبه این شاخص‌ها، توزیع گاما می‌باشد که همیشه این شرایط امکان‌پذیر نمی‌باشد. به عبارت دیگر توزیع گاما را نمی‌توان بطور یکسان بر داده‌های بارش و رواناب در همه ایستگاه‌ها برازش داد. لذا در این شرایط می‌توان از یک چارچوب ناپارامتریک برای محاسبه شاخص بارش و رواناب استاندارد شده (NSRI و NSPI) استفاده نمود که خشکسالی را به طور واقعی‌تری شناسایی نماید (Farahmand and AghaKouchak, 2015). در ادامه، بر اساس روش وزن آنترپی دو شاخص مذکور برای پایش توام خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی ترکیب شده‌اند و برای هر پیکسل شاخص مذکور محاسبه گردید.

تئوری ران

یکی از روش‌های مرسوم و بسیار متداول تحلیل و بررسی خشکسالی، روش Run Theory است (Yevjevich, 1967). این تئوری در بررسی خشکسالی، به صورت کمی بیان می‌دارد که چگونه فرآیند هیدرولوژیکی از بالا و پایین یک آستانه بحرانی عبور می‌کند. به عبارت دیگر تئوری ران پیمایش سری زمانی و قسمتی از آن است که مقادیر خشکسالی در زیر یا بالای سطح آستانه مشخص قرار می‌گیرد. مقدار آستانه انتخابی، سطح مبنا یا سطح بحرانی نامیده می‌شود. پنج پارامتر اصلی خشکسالی عبارتند از: مدت خشکسالی (D): مدت زمان بین شروع و پایان پدیده خشکسالی، بزرگی خشکسالی: برابر با مجموع مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند، شدت خشکسالی (S): متوسط مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند. شدت از تقسیم بزرگی خشکسالی بر مدت زمان آن بدست می‌آید، فاصله بین دو دوره خشکسالی پیوسته: فاصله زمانی بین دو شروع خشکسالی

پیوسته می‌باشد. لازم به ذکر است در تحقیق حاضر مقادیر شدت بصورت قدرمطلق ارائه شده است. از خصوصیات مهم دیگر میتوان به وسعت خشکسالی اشاره کرد که بر اساس پیکسل‌های واقع در یک حوضه برآورد میگردد بدین صورت که چند درصد از پیکسل‌ها همزمان یک شرایط از خشکسالی و ترسالی را باهم تجربه کردند.



شکل ۳. تعیین خصوصیات خشکسالی بر اساس تئوری ران

معیارهای ارزیابی

برای مقایسه پیش‌بینی‌های مدل در برآورد بارش در برابر داده‌های مشاهداتی از جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و کلینگ گوپتا^۱ (KGE) که سه نوع خطا شامل خطا زمانی، بایس و تغییرپذیری را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده شده است و روابط آن‌ها در زیر ارائه گردید.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$NRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M - O)^2}{N}}}{O_{\max} - O_{\min}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن M ، مقادیر داده پایگاه‌ها، O مقادیر مشاهداتی بارش، N تعداد کل داده‌ها، r ضریب همبستگی، β نسبت بایس (زمانی) که بزرگتر از یک است در واقع داده‌ها را بیش برآورد کرده است و بالعکس) و γ نسبت تغییرات می‌باشد.

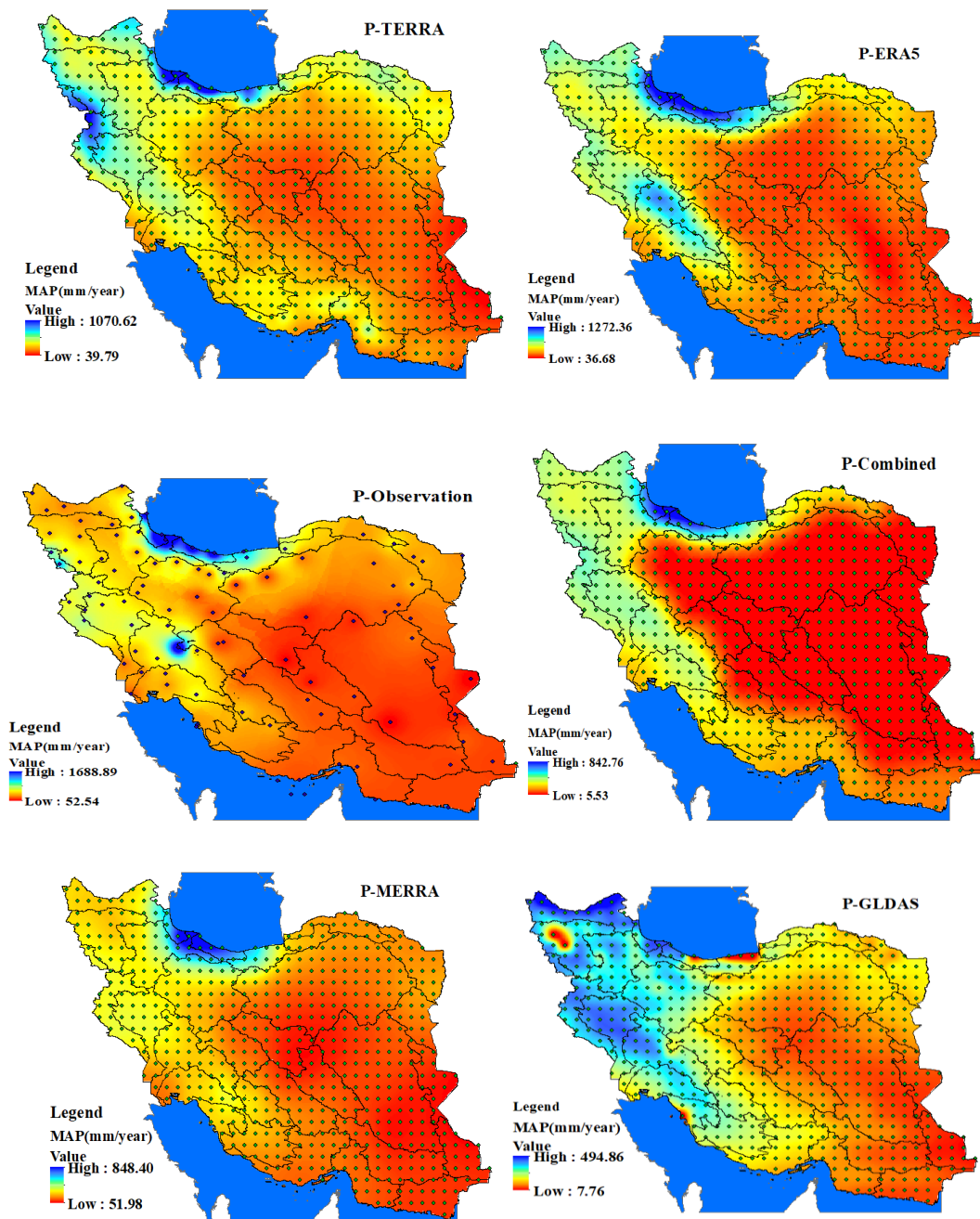
یافته‌های پژوهش

تغییرات بارش و رواناب بر اساس پایگاه‌های منفرد و ترکیبی

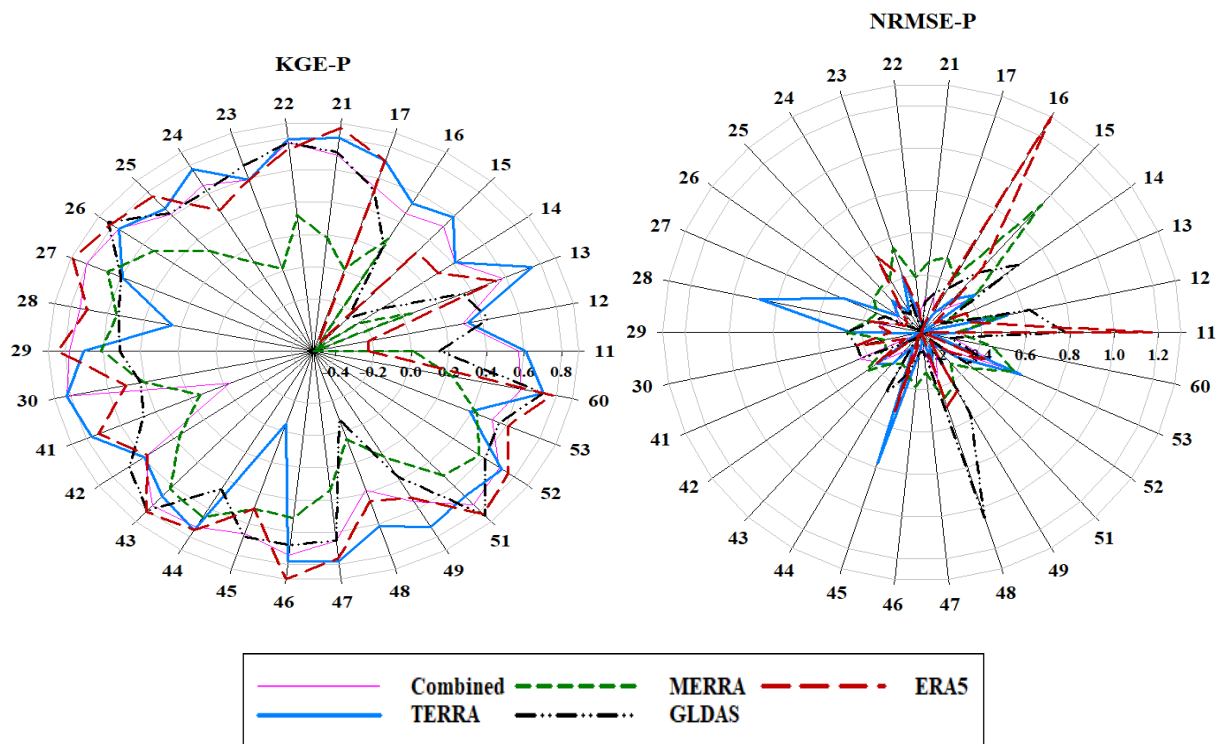
در این قسمت تغییرات متوسط بارش منابع مختلف (پایگاه‌های منفرد و ترکیب آنها) و مشاهداتی در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹ ارائه شده است (شکل ۴). همانطور که قابل مشاهده است در بین پایگاه‌ها، ERA5 و TERRA بیشترین (۱۲۷۲/۳۶) و ۱۰۷۰/۶۲ (میلیمتر در سال) و GLDAS کمترین برآورد میانگین سالانه بارندگی (۴۹۴/۸۶ میلی‌متر در سال) طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹ را از خود نشان داد. همچنین بایستی گفت بازه تغییرات این دو پایگاه (ERA5 و TERRA) مانند داده‌های مشاهداتی زیاد می‌باشد. در ادامه نتایج معیارهای ارزیابی پایگاه‌های منفرد و ترکیب آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. بطور میانگین در کل حوضه‌های آبریز درجه دو، پایگاه TERRA (KGE=0.63 و NRMSE=0.32) و ERA5 (KGE=0.57 و NRMSE=0.36) در بین پایگاه‌ها منفرد بهترین و پایگاه MERRA (KGE=0.27 و NRMSE=0.42) بدترین عملکرد را داشته‌اند که با نتایج تحقیقات گذشته حسینی و همکاران (۱۴۰۱) و محمدی قلعه‌نی و شرفی (۱۴۰۱) همخوانی دارد. بیشترین KGE در حوضه کل مهران (کد ۲۷-۰/۸۸) و دریاچه ارومیه (کد ۳۰-۰/۸۲) به ترتیب در پایگاه

ERA5 و TERRA مشاهده گردید. در مورد ترکیب پایگاهها (Combined)، در ۵۰ درصد از حوضه‌ها ترکیب پایگاهها سبب کاهش خطا گردید. به عنوان مثال در حوضه آبریز هرازوقره سو (کد ۱۵) در اقلیم مرطوب ترکیب پایگاهها منجر کاهش خطا برآورد بارش از ۰/۳۴ به ۰/۲۷ گردید. بطور متوسط ترکیب پایگاههای بارش در اقلیم فراخشک، خشک، نیمه خشک و مرطوب به ترتیب ۰/۳۲، ۰/۱۰، ۰/۲۴ و ۰/۲۶ درصد باعث کاهش خطا نسبت به پایگاههای منفرد گردید.

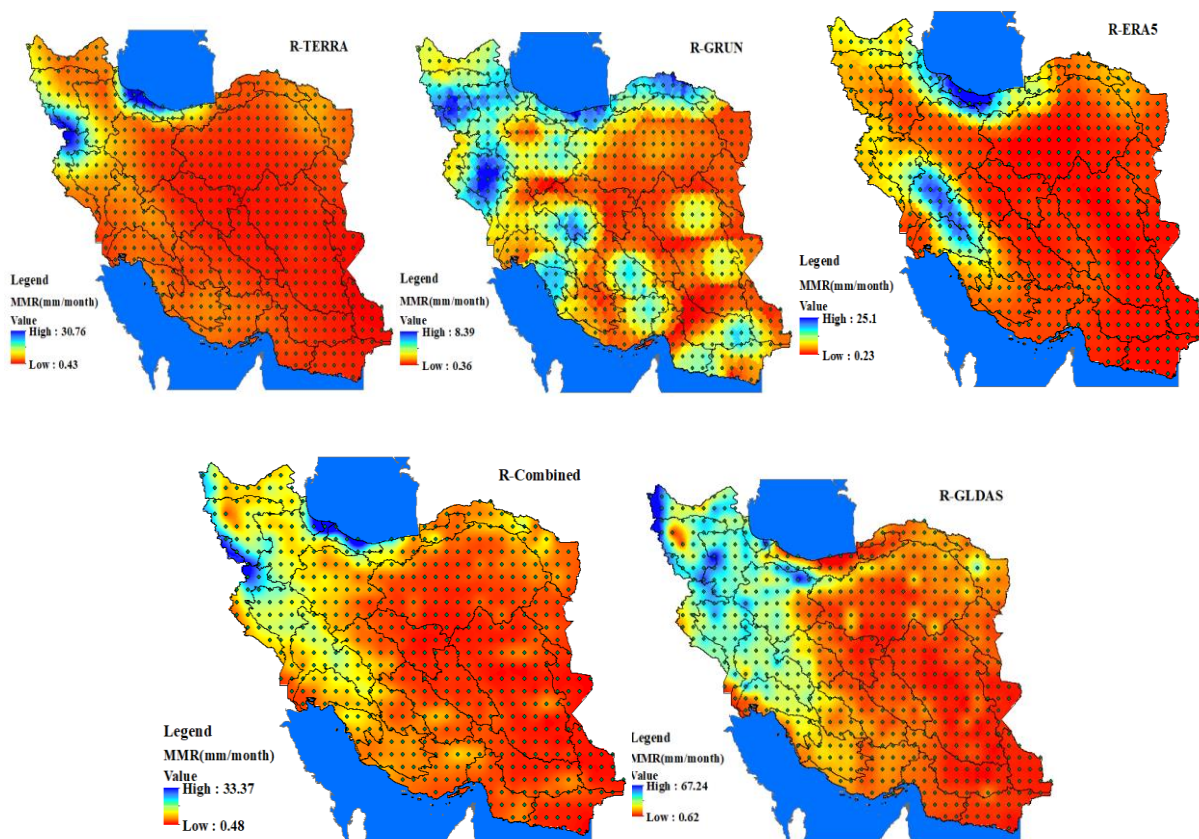
البته قابل ذکر است در اکثر حالات ترکیب پایگاهها تغییر چندانی در معیار KGE ایجاد نکرده است و کاهش خطا متفاوت بوده است. در مورد رواناب، تغییرات متوسط ماهانه رواناب منابع مختلف (پایگاهها منفرد و ترکیب آنها) در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های لازم با پراکنش مناسب برای برآورد رواناب در سطح حوضه، امکان مقایسه با رواناب مشاهداتی و برآورد معیارهای ارزیابی وجود نداشته است. اما بطور کلی در بین پایگاهها به ترتیب GLDAS و GRUN بیشترین و کمترین رواناب به ترتیب ۶۷/۲۴ و ۸/۳۹ میلی‌متر بر ماه برآورد شده است.



شکل ۴. تغییرات متوسط سالانه بارش (Monthly Annual Precipitation; MAP) داده‌های منفرد و ترکیب پایگاههای مختلف جهانی طی دوره



شکل ۵. نتایج معیارهای ارزیابی داده‌های متوسط بارش سالانه منفرد و ترکیب پایگاه‌های مختلف جهانی در حوضه‌های آبریز درجه دو



شکل ۶. تغییرات متوسط ماهانه رواناب (Monthly Mean Runoff; MMR) داده‌های منفرد و ترکیبی پایگاه‌های مختلف جهانی طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰



تغییرات مشخصه‌های شدت، مدت و پیک خشکسالی ترکیبی

تغییرات مشخصه‌های خشکسالی شامل شدت، مدت و پیک بر اساس شاخص ترکیبی در دو مقیاس زمانی ۳ و ۱۲ در شکل ۷ ارائه گردید. همانطور که قابل مشاهده است بطور کلی شدت خشکسالی در مقیاس ۱۲ ماهه بین ۱۴- (قسمت مرکزی) و ۵۰- (قسمت شمال غرب) تغییر کرده است که متناظر آن مدت بین ۱۰ تا ۳۵ ماه در حال نوسان می‌باشد. از نظر پیک خشکسالی قسمت میانی (۱/۶-) نسبت به بقیه قسمت‌ها (۲/۱۲-) از شدت کمتری برخوردار است. بطور کلی در این مقیاس می‌توان گفت خشکسالی در حوضه‌های آبریز گاو خونی، طشت بختگان، ابرقوسیرجان، کویر مرکزی، کویر سیاه کوه، کویردرنجیر و کویر لوت از شدت، مدت و پیک کمتری برخوردار می‌باشند. در مقیاس ۳ ماهه شدت خشکسالی بین ۶- (قسمت مرکزی و جنوب غربی) و ۲۴- (قسمت شمال غربی بویژه حوضه آبریز سفید رود و دریاچه نمک) و متناظر آن مدت بین ۴ و ۱۴ ماه طی دوره منتخب در حال تغییر می‌باشد. پیک خشکسالی نیز مانند مقیاس ۱۲ ماهه تقریباً همان محدوده تغییر کرده است.

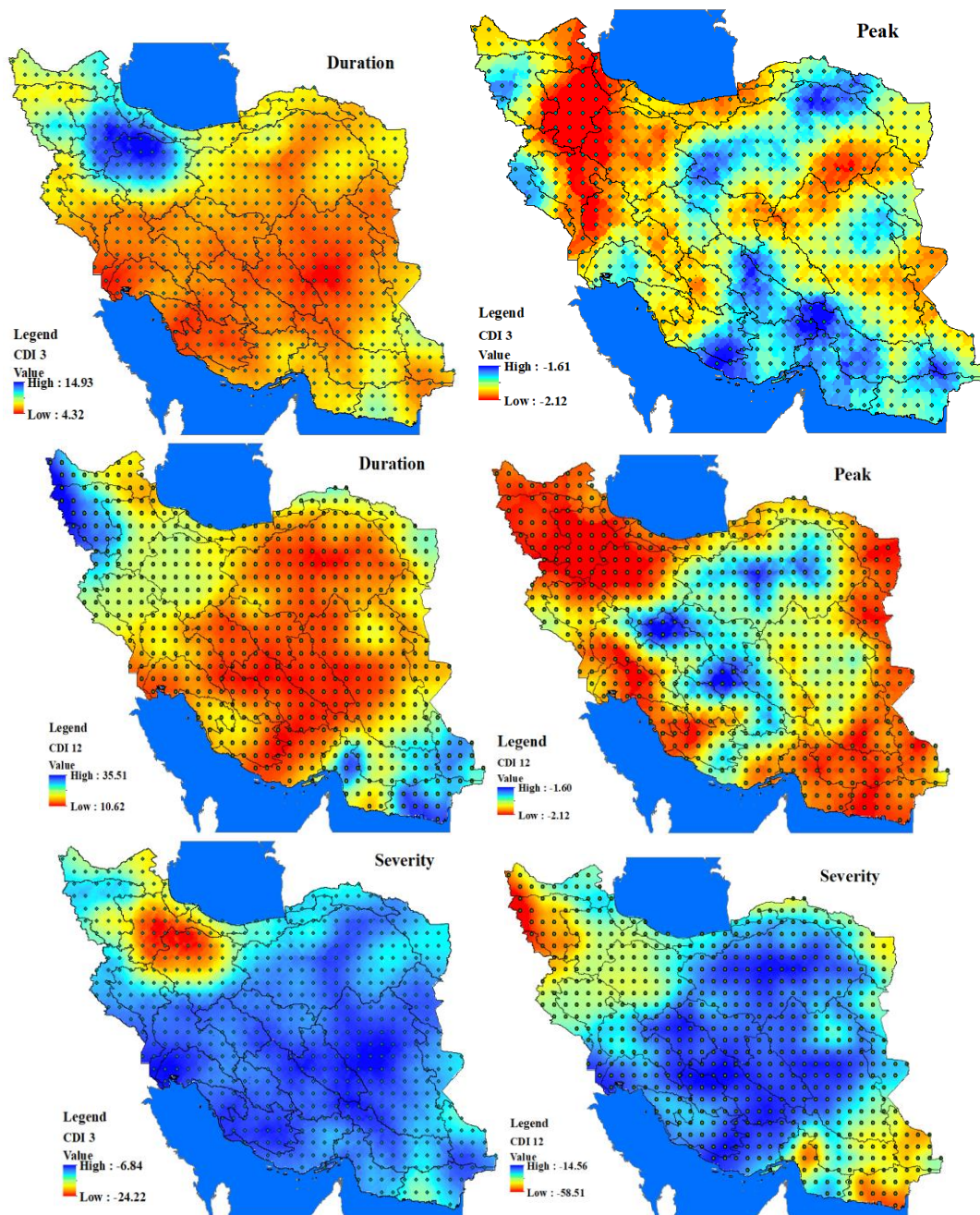
بطور جزئی در مقیاس ۳ ماهه و اقلیم فراخشک، حوضه آبریز جنوب بلوچستان نسبت به سه حوضه دیگر در این اقلیم، خشکسالی را شدیدتر (۱۸/۵۲-) و با مدت بیشتری (۱۳ ماه) تجربه کرده است که مقدار و زمان پیک آن به ترتیب با مقدار ۲/۱۲- و طی سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۰، ۱۹۹۹، ۱۹۹۳ و ۲۰۰۴ اتفاق افتاده است. در اقلیم خشک، شدیدترین خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با شدت ۳۰/۷۶-، مدت ۱۸ ماه، مقدار ۲/۱۲- و زمان پیک طی سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ مشاهده شده است. در اقلیم نیمه خشک، حوضه آبریز سفیدرود شدیدترین خشکسالی را (شدت: ۳۰/۰۷-)، مدت ۱۸ و پیک ۲/۱۲-) طی سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ تجربه کرده است. در اقلیم مرطوب تقریباً هر سه حوضه آبریز یک شرایط خشکسالی را طی سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ تجربه کرده‌اند.

در اقلیم فراخشک و در مقیاس ۱۲ ماهه، حوضه آبریز جنوب بلوچستان نسبت به سه حوضه دیگر در این اقلیم، خشکسالی را شدیدتر (۶۲/۳۶-) و با مدت بیشتری (۴۱ ماه) تجربه کرده است که مقدار و زمان پیک آن به ترتیب با مقدار ۲/۱۲- و طی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ اتفاق افتاده است. در اقلیم خشک، شدیدترین خشکسالی در حوضه آبریز بندرعباس با شدت ۶۰/۴۷-، مدت ۴۰ ماه، مقدار ۲/۱۲- و زمان پیک طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ اتفاق افتاده است. ضعیف‌ترین خشکسالی این اقلیم در حوضه آبریز کل مهران با شدت ۱۰/۸- و مدت ۲۴ رخ داده است. در اقلیم نیمه خشک، شدیدترین خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و سفید رود با شدت ۶۱/۷۴-، مدت ۳۷ ماه، مقدار ۲/۱۲- و زمان پیک طی سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ و ضعیف‌ترین در حوضه کارون ۳۵/۳- و مدت ۲۱ ماه اتفاق افتاده است. در حالیکه در همه حوضه‌های آبریز واقع در اقلیم مرطوب (هراز و قره سو، تالش و هراز و سفیدرود) خشکسالی با شدت (۳۷/۱۲-)، مدت (۲۱ ماه)، مقدار (۲/۱۲-) و زمان پیک تقریباً یکسان طی سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ رخ داده است. بطور کلی می‌توان گفت در هر سه اقلیم فراخشک، خشک و نیمه‌خشک شدیدترین خشکسالی با شدت و مدت تقریباً یکسانی اتفاق افتاده است.

بر اساس یافته‌های فوق در همه اقلیم‌ها، شاخص جدید ترکیبی دوره ۲۰۰۱-۱۹۹۸ را شناسائی نموده است که با تحقیق Morid et al., 2006 همخوانی دارد.

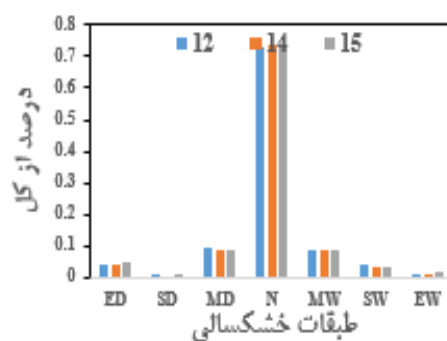
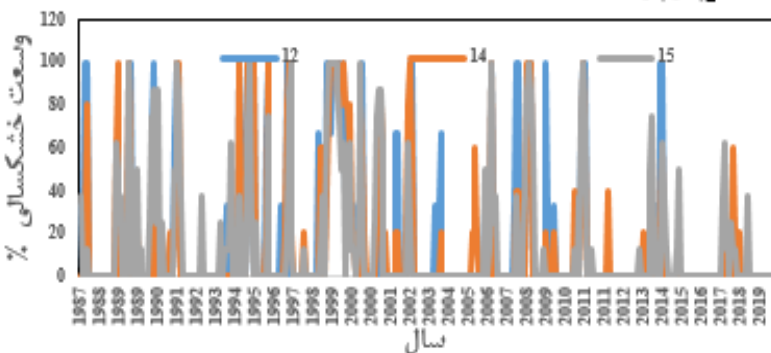
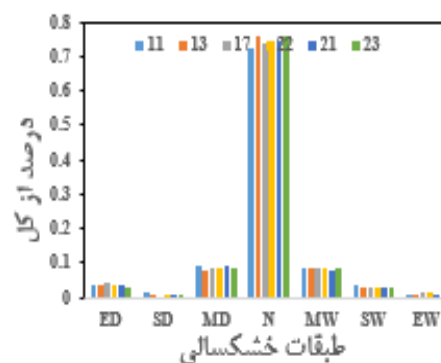
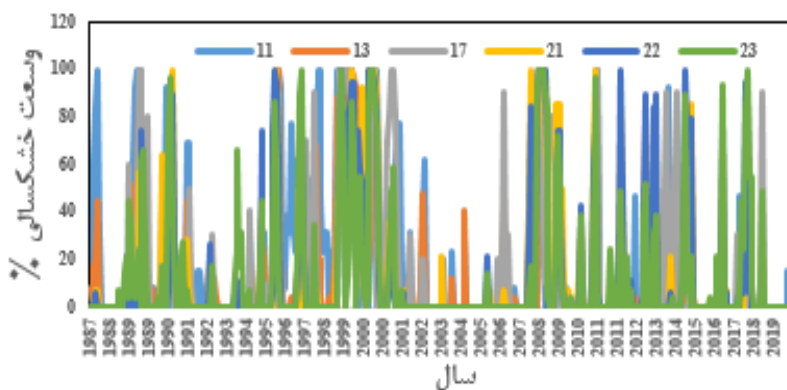
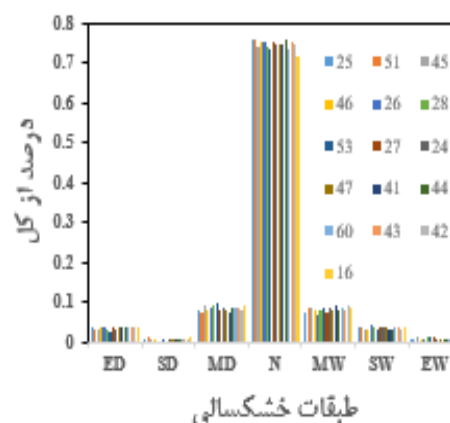
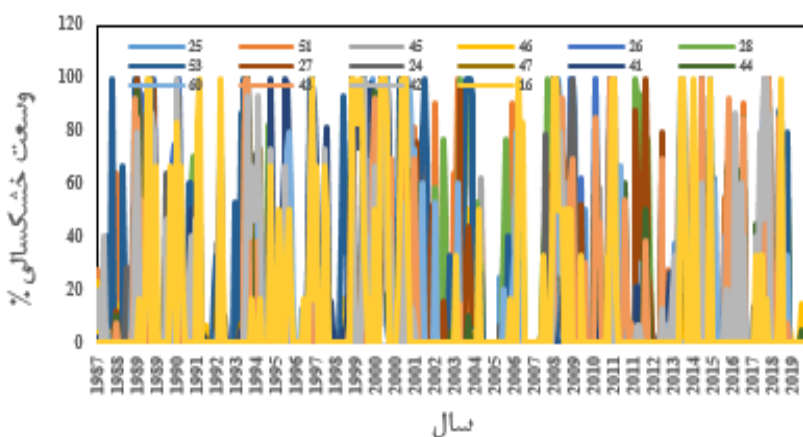
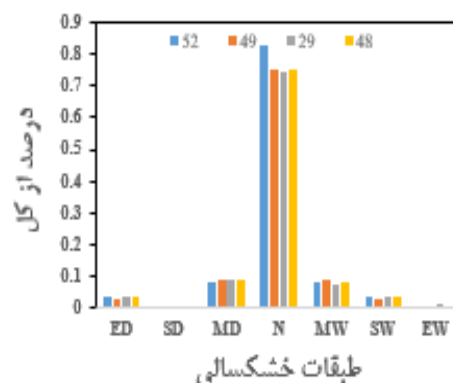
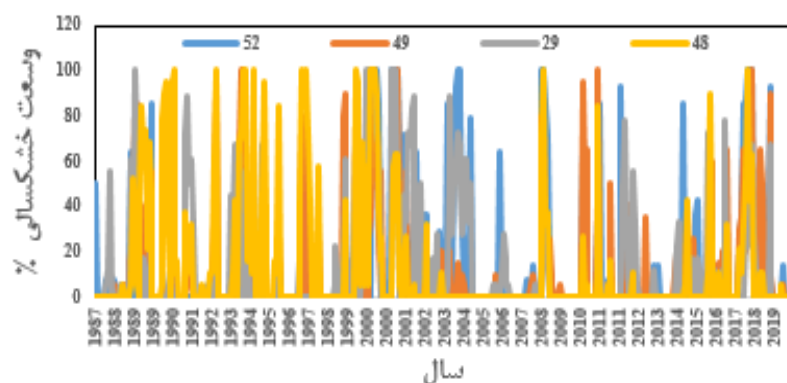
تغییرات طبقات و وسعت خشکسالی ترکیبی

در این بخش تغییرات طبقات و مساحت خشکسالی در چهار اقلیم براساس تعداد پیکسل‌های واقع در هر حوضه در دو مقیاس زمانی ۳ و ۱۲ ماهه ارائه شده است (شکل‌های ۸ و ۹). همانطور که قابل مشاهده است در مقیاس کوتاه مدت (۳ ماهه) و در اقلیم فراخشک تغییرات ماهانه وسعت نشان داد که در برخی از ماه‌ها تقریباً همه پیکسل‌های واقع در یک حوضه (۱۰۰ درصد) خشکسالی را تجربه کرده‌اند. به عنوان مثال در حوضه آبریز سیاه کوه حداقل، متوسط و حداکثر وسعت به ترتیب ۵، ۴۵ و ۱۰۰ درصد بوده است. از نظر طبقات تقریباً در همگی حوضه‌ها، ۱۲ درصد از ماه‌ها طبقه ملایم و بسیار شدید خشکسالی را تجربه نموده‌اند. در اقلیم خشک، به عنوان مثال حوضه آبریز بندرعباس بطور متوسط ۴۵ درصد از حوضه درگیر خشکسالی بوده است و حداقل وسعت (۶ درصد) را در سال ۲۰۱۸، حداکثر وسعت را در طی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴ (۱۰۰ درصد) تجربه کرده است. در این اقلیم بطور متوسط ۱۵ درصد در شرایط خشکسالی (هر سه طبقه) و ۸ درصد از آن در طبقه ملایم بوده است. در اقلیم نیمه خشک، بطور متوسط ۴۳ درصد حوضه‌ها درگیر خشکسالی بوده‌اند. بطوریکه حوضه اترک با ۵۳ درصد بیشترین و حوضه سفیدرود با ۳۳ درصد کمترین وسعت را داشته است. ۱۳ درصد از ماه‌ها بطور متوسط شرایط خشکسالی ملایم و بسیار شدید را تجربه نموده‌اند. اقلیم مرطوب حوضه آبریز تالش بیشترین و هراز و قره‌سو کمترین وسعت خشکسالی به ترتیب ۷۰ و ۵۰ درصد را تجربه کرده‌اند و شرایط طبقات خشکسالی کاملاً یکسان در همه حوضه‌ها (۱۳ درصد) بوده است.

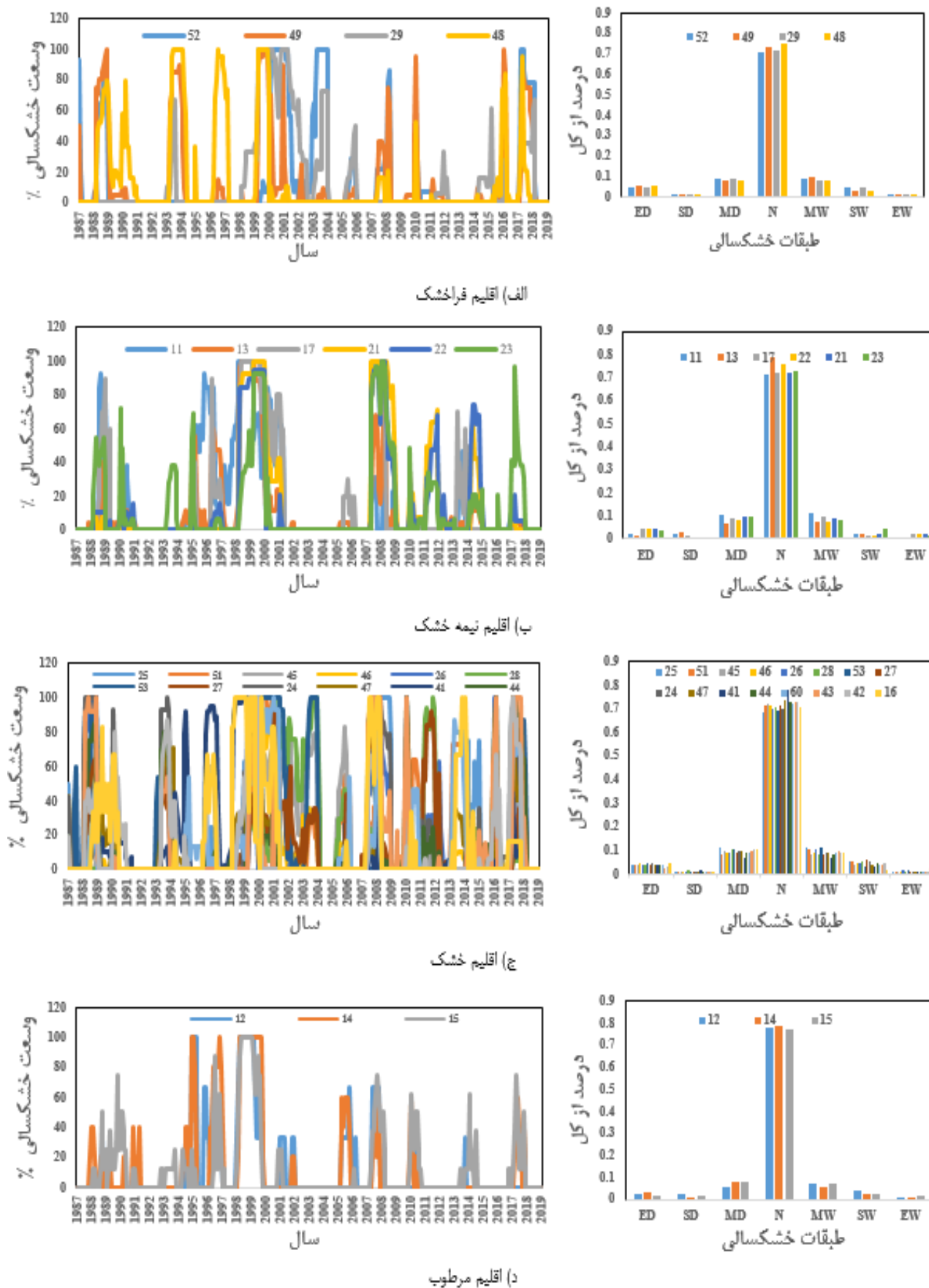


شکل ۷. شدت، مدت و پیک خشکسالی بر اساس داده‌های ترکیبی پایگاه‌های مختلف جهانی و CDI3 و CDI12 طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹

در مقیاس ۱۲ ماهه و در اقلیم فراخشک، تغییرات ماهانه وسعت نشان داد که در برخی از ماه‌ها تقریباً همه پیکسل‌های واقع در یک حوضه (۱۰۰ درصد) خشکسالی را تجربه کرده‌اند. به عنوان مثال در حوضه آبریز هامون جازموریان حداکثر وسعت (۱۰۰ درصد) را طی سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۴ و حداقل وسعت (۷ درصدی) را در سال ۲۰۱۱ و بطور متوسط ۵۲ درصد وسعت را تجربه کرده است. از نظر طبقات، همه حوضه‌های آبریز واقع در این اقلیم تقریباً ۱۴ درصد در شرایط خشکسالی که در این بین بیشتر در طبقه ملایم (۸ درصد) و بسیار شدید (۵ درصد) اتفاق افتاده است. در اقلیم خشک، به عنوان مثال حوضه آبریز بندرعباس طی سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۹ با وسعت ۱۰۰ درصد و در سال ۲۰۱۲ با وسعت ۱۲/۵ درصد و بطور متوسط ۵۴ درصد خشکسالی را مشاهده نموده است. در اقلیم مرطوب، نیز تغییرات وسعت خشکسالی بین حوضه‌های آبریز زیادتر می‌باشد. به عنوان مثال، در حوضه آبریز تالش ۳۳، ۱۰۰ و ۵۵ درصد و در حوضه آبریز هراز و قره‌سو ۱۲، ۱۰۰ و ۳۶ درصد به ترتیب حداقل، حداکثر و بطور متوسط از وسعت منطقه را فراگرفته است.



شکل ۸. تغییرات وسعت خشکسالی بر اساس شاخص CDI 3 و تقسیم بندی اقلیمی در حوضه‌های آبریز درجه طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۷



شکل ۹. تغییرات وسعت خشکسالی بر اساس شاخص CDI 12 و تقسیم بندی اقلیمی در حوضه‌های آبریز درجه طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۷

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر دقت پایگاه‌های مختلف و ترکیب آنها در برآورد مقدار میانگین بارش، پایش، شناسائی طبقات و خصوصیات خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی شامل شدت، مدت، پیک و وسعت با استفاده از شاخص ترکیبی (CDI) در دو مقیاس زمانی کوتاه و بلندمدت (۳ و ۱۲ ماهه) در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو کشور طی سال‌های ۱۹۸۷-۲۰۱۹ بررسی شده است.

به طور کلی نتایج ارزیابی پایگاه‌های منفرد نشان داد پایگاه‌های ERA5 و TERRA عملکرد بالاتری در همه اقلیم‌ها دارند. به عبارت دیگر داده‌های ماهانه، فصلی و سالانه بارش دو پایگاه مذکور با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها مشابهت بیشتری از خود نشان دادند. همچنین ترکیب پایگاه‌های منفرد نشان داد که در همه اقلیم‌ها بویژه در اقلیم فراخشک شامل حوضه‌های آبریز کویرسیاه کوه، کویردرنجیر، هامون هیرمند و بلوچستان جنوبی، عملکرد ارزیابی پایگاه‌های منفرد افزایش یافته است که نتایج تحقیق Fooladi et al., 2023 نیز همین گزارش را دارد.

پایش با شاخص ترکیبی جدید توانست در همه اقلیم‌ها شرایط خشکسالی در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ را بدرستی شناسائی نماید که در واقع صحت و سقم شاخص جدید را تأیید می‌نماید. خصوصیات خشکسالی شناسائی شده با شاخص جدید شامل شدت و مدت، با افزایش مقیاس زمانی کوتاه به بلندمدت مطابق با تحقیقات گذشته با شاخص‌های منفرد افزایش می‌یابد. بطور متوسط در اقلیم فراخشک، خشک و نیمه خشک حدود ۱/۷ و در اقلیم مرطوب حدود ۰/۸ برابر (مقیاس بلندمدت به کوتاه مدت) شدت و مدت خشکسالی افزایش یافته است. در مورد طبقات، همه اقلیم‌ها بطور متوسط طبقات ملایم و بسیار شدید خشکسالی حدود ۱۴ و ۷۰ درصد شرایط نرمال طی دوره منتخب را شناسائی نموده‌اند. تغییرات وسعت خشکسالی نیز نشان داد در اثر افزایش مقیاس زمانی در اقلیم‌های فراخشک، خشک و نیمه خشک بطور متوسط افزایش (از ۴۵ به ۵۳ درصد) و در اقلیم مرطوب بالعکس از (۷۰ به ۴۰ درصد) رخ داده است. بطور کلی می‌توان گفت نتایج کاربردی این پژوهش استفاده از ترکیب داده پایگاه‌های منفرد برای پایش بهتر و دقیق‌تر متغیرهای اقلیمی و شاخص‌های ترکیبی برای پایش همزمان ابعاد مختلف خشکسالی می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

حسینی، زهراسادات؛ مقدسی، مه‌نوش و پایمزد، شهلا (۱۴۰۱). ارزیابی دقت پایگاه داده ECMWF در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی و پایش خشکسالی حوزه آبریز قره چای استان مرکزی. *مجله تحقیقات آب و خاک*، ۵۳(۴)، ۷۱۵-۷۳۲.

محمدی قلعه‌نی، مهدی و شریفی، سعید (۱۴۰۱). ارزیابی دقت پایگاه داده‌های ERA5 و CRU TS4.05 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیر/تعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۵)، ۸۷۹-۸۹۰.

REFERENCES

- Beersma, J. J., & Buishand, T. A. (2004). Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands. *Water Resources Research*, 40(12), 1-12.
- Eghdami, M., & Barros, A.P. (2019). Extreme orographic rainfall in the eastern Andes tied to cold air intrusions. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 101.
- Erfani, A., Babaeian, I., & Entezari, A. (2020). ERA-Interim. *Journal of Climate Research*, 1398(38), 77-92.
- Fahimirad, Z., & Shahkarami, N. (2021). The Impact of Climate Change on Hydro-Meteorological Droughts Using Copula Functions. *Water Resources Management*, 35(12), 3969-3993.
- Farahmand, A., & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 76, 140-145.
- Faridzad, M., Yang, T., Hsu, K., Sorooshian, S., & Xiao, C. (2018). Rainfall frequency analysis for ungauged regions using remotely sensed precipitation information. *Journal of Hydrology*, 563, 123-142.
- Fooladi, M., Golmohammadi, M. H., Rahimi, I., Safavi, H. R., & Nikoo, M. R. (2023). Assessing the changeability of precipitation patterns using multiple remote sensing data and an efficient uncertainty method over different climate regions of Iran. *Expert Systems with Applications*, 221, 119788.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., ... & Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419-5454.

- Ghiggi, G., Humphrey, V., Seneviratne, S. I., & Gudmundsson, L. (2019). GRUN: an observation-based global gridded runoff dataset from 1902 to 2014. *Earth System Science Data*, 11(4), 1655-1674.
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18.
- Hersbach, H., de Rosnay, P., Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., ... & Zuo, H. (2018). *Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP*. European Centre for Medium Range Weather Forecasts. Reading, UK.
- Hoseeni, Z. S., Moghaddasi, M., & Paimozd, S. (2022). Accuracy assessment of ECMWF datasets in prediction of climate data and drought monitoring of Garechai basin of Markazi Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(4), 715-732 (In persian).
- Hosseini, Z. S., Moghaddasi, M., & Paimozd, S. (2023). Simultaneous Monitoring of Different Drought Types Using Linear and Nonlinear Combination Approaches. *Water Resources Management*, 37(3), 1125-1151.
- Hosseini-Moghari, S.M., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2018). Spatio-temporal evaluation of global gridded precipitation datasets across Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 63 (11), 1669-1688.
- Kim, H., Watanabe, S., Chang, E. C., Yoshimura, K., Hirabayashi, J., Famiglietti, J., & Oki, T. (2017). *Global Soil Wetness Project Phase 3 Atmospheric Boundary Conditions (Experiment 1)*. Data Integration and Analysis System (DIAS).
- Li, Q., Li, P., Li, H. & Yu, M. (2015). Drought assessment using a multivariate drought index in the Luanhe River basin of Northern China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(6), 1509-1520.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993, January). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, USA. 17:179-183.
- Mohammadi Ghaleni, M., & Sharafi, S. (2022). Evaluation of CRU TS4. 05 and ERA5 Datasets Accuracy to Precipitation, Temperature and Potential Evapotranspiration in Different Climates across Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 879-890 (In persian).
- Morid, S., Smakhtin, V. and Moghaddasi, M. (2006). Comparison of Seven Meteorological Indices for Drought in Iran. *International Journal of Climatology*, 26, 971-985.
- Motevali Bashi Naeni, E., Akhoond-Ali. A.M., Radmanesh, F., Koupai, J.A, & Soltaninia, S. (2021). Comparison of the Calculated Drought Return Periods Using Tri-variate and Bivariate Copula Functions under Climate Change Condition. *Water Resources Management*, 35(14), 4855-4875.
- Naderi, K., Moghaddasi, M., & Shokri, A. (2022). Drought Occurrence Probability Analysis Using Multivariate Standardized Drought Index and Copula Function Under Climate Change. *Water Resources Management*, 36(8), 2865-2888.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C. & Mirabbasi, R. (2020). A new method for joint frequency analysis of modified precipitation anomaly percentage and streamflow drought index based on the conditional density of copula functions. *Water Resources Management*, 34(13), 4217-4231.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*. Department of Commerce, Weather Bureau., Washington, DC, 58 pp.
- Pom'eon, T., Jackisch, D., & Diekkrüger, B. (2017). Evaluating the performance of remotely sensed and reanalyzed precipitation data over west Africa using HBV light. *Journal of Hydrology*, 547, 222-235.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., & Kim, G.-K. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24, 3624-3648.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394.
- Saemian, P., Tourian, M. J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades?. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101095.
- Salman, S.A., Shahid, S., Ismail, T., Al-Abadi, A.M., Wang, X.j., & Chung, E.S. (2019). Selection of gridded precipitation data for Iraq using compromise programming. *Measurement*, 132, 87-98.
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2).
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D.P. (2008). Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9 (4), 622-640.



- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56 (1), 79–107.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. J. E. W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
- Tsiros, I. X., Nastos, P., Proutsos, N. D., & Tsaousidis, A. (2020). Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900–1997). *Atmospheric Research*, 240, 104914.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (1979). Map of the world distribution of arid regions: map at scale 1:25,000,000 with explanatory note, *MAB Technical Notes 7*. UNESCO, Paris.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Won, J., Choi, J., Lee, O. & Kim, S. (2020). Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change. *Science of the Total Environment*, 744, 140701.
- Xu, H., Xu, C.Y., Chen, S., & Chen, H. (2016). Similarity and difference of global reanalysis datasets (WFD and APHRODITE) in driving lumped and distributed hydrological models in a humid region of China. *Journal of Hydrology*, 542, 343–356.
- Yang, J., Chang, J., Wang, Y., Li, Y., Hu, H., Chen, Y., ... & Yao, J. (2018). Comprehensive drought characteristics analysis based on a nonlinear multivariate drought index. *Journal of Hydrology*, 557, 651-667.
- Yevjevich, V. M. (1967). *Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*, An (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
- Zhu, G. Y., He, L. J., Ju, X. W., & Zhang, W. B. (2018). A fitness assignment strategy based on the grey and entropy parallel analysis and its application to MOEA. *European Journal of Operational Research*, 265(3), 813-828.

Evaluation of drought characteristics based on combined global precipitation and runoff products datasets across Iran's sub basins

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Due to the high cost of installation and maintaining gauges, specific locations worldwide may have limited or no weather stations, and the available records might be incomplete or cover shorter time periods. To address the data scarcity in developing regions, various institutions have developed alternative sources of global gridded datasets. However, selecting an appropriate database and index for drought monitoring poses challenges and underscores the significance of combining databases and indices. The objective of this research is to assess global products, their composite nature, and their effectiveness in monitoring drought characteristics such as severity, duration, peak, and extent, utilizing the compound drought index.

Material and Methods

For this purpose, the daily meteorological data were collected from 100 synoptic stations around the Iran during 1987-2019. Thiessen polygons method was used to extend the monthly time series of precipitation and potential evapotranspiration in synoptic stations to sub basin scale (to classify them based on Aridity index). Then, the five products including ERA5.MRRRA2.GRUN, GLDAS.TERRA with 0.5×0.5 spatial resolution were used to extract monthly precipitation and runoff. Then, for each pixel, precipitation (four products) and runoff (four products) datasets were composed. In the other words, one data as representative of precipitation and runoff was obtained that the non-parametric standardized precipitation and runoff index were calculated based on them. Then, the composite drought index (CDI) was developed and characterized drought at the short and long time scale (3 and 12-month scale). The Entropy weight method was used to compose datasets and indices. To extract drought characteristics, theory run was used and the drought extent was obtained based on the number of pixel located in each sub basin. To assess the performance of products, across Iran's sub basins on monthly scale, Kling-Gupta efficiency (KGE) and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), of each product were calculated at the sub basin scale.

Results

The results indicate that the accuracy of each dataset varied over years and climates. However, both ERA5 and TERRA datasets exhibited high performance in all climates. Furthermore, combining multiple datasets demonstrated improved performance across all climates, particularly in the Hyper-arid climate. As the time scale increased, drought characteristics such as severity and duration increased, too. In the Hyper-arid, Arid, and Semi-arid climates, the severity and duration were approximately 1.7, while in the humid climate, it was around 0.8 (long-term to short-term timescale). The peak of drought did not show significant changes. Mild and extreme drought levels accounted for approximately 14% of drought occurrences during the study period across all climates. The variation in drought extent indicated an average increase in the Hyper-arid, Arid, and Semi-arid climates (from 45% to 53%) with an increase in the time scale.

Conclusion

In summary, this study presented an evaluation of both individual and combined precipitation datasets. The research findings demonstrate the applicability of utilizing precipitation data from appropriate global products, taking into account temporal and spatial considerations, and characterizing drought using a composite drought index. Based on the results of this study, it is recommended to utilize these datasets, their combination, and the composite index for drought monitoring purposes.