

## Original Article



## Spatial Monitoring of Drought Using Remote Sensing Indices, Case Study: Sistan and Baluchestan Province

Masumeh Nabavizadeh<sup>1</sup> and Kamal Omidvar<sup>2\*</sup> 

### Affiliation

1. Ph.D. Students,  
Department of Geography,  
Campus of Humanities and  
Social Sciences, Yazd  
University, Yazd, Iran
2. Professor of Geography,  
Campus of Humanities and  
Social Sciences, Yazd  
University, Yazd, Iran

### ABSTRACT

**Introduction:** Drought monitoring is crucial due to its widespread impacts on the economy, environment, and society. To monitor droughts accurately, comprehensive and integrated meteorological and hydrological data are essential, particularly in areas such as Sistan and Baluchestan Province, which is facing a severe drought. Climatic studies indicate that Sistan and Baluchestan province has evolved into an arid region highly susceptible to prolonged droughts due to a combination of climatic factors such as low precipitation, high evaporation rates, strong winds, and limited vegetation cover. Based on research conducted between 2000 and 2015, approximately 58% of the province's total area has been directly affected by drought. These findings align with previous studies, which have shown that dry years with below-average rainfall constitute more than 52% of the province's climatic record.

**Materials and methods:** In this study, MODIS and GRACE satellite data were utilized to comprehensively assess drought in Sistan and Baluchestan province. The Vegetation Health Index (VHI) was employed to monitor vegetation changes, while the Terrestrial Water Storage (TSDI) was used to analyze groundwater variations. The Global Land Data Assimilation System (GLDAS) soil moisture data served as a reference for result validation. Given the limitations of GRACE data, a 16-year common period (2002-2017) was selected for the analysis. Additionally, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was calculated over a 30-year period (1987-2018) to examine long-term drought trends.

**Results and discussion:** Geographically, VHI drought maps revealed that Sistan and Baluchestan province has experienced moderate to severe drought throughout the study period, with increasing drought severity in the years leading up to the study. To monitor hydrological drought, GRACE satellite data was utilized to measure changes in terrestrial water storage. This is a significant step in comprehensively understanding hydrological drought in the study province. The TSDI index, a quantitative measure of drought, was calculated to monitor hydrological drought in all 50 third-level sub-basins. The drought monitoring process began by calculating the deficit, defining drought as four consecutive months with negative TWSA. Results clearly show an increasing drought deficit from south to north in the study province. Almost all basins experienced large deficits from 2011 onwards. By estimating the deficit and the overall decrease in groundwater storage in April, this study demonstrated that all basins were experiencing a water storage deficit in the critical and exceptional range in the years leading up to the end of the study period.

**Conclusion:** Results from the VHI revealed that the study province has experienced widespread drought in recent years. The southern and central regions of the province have faced more severe drought classes. Analysis of drought index graphs across different severity classes confirmed that all watersheds have experienced drought conditions, particularly in recent years. Data analysis indicates a severe water crisis in the province. Urgent and coordinated actions are required to address this challenge. Shifting to drought-resistant crops, improving irrigation efficiency, and securing water rights are essential steps towards a sustainable future.

**Keywords:** Vegetation Health Index (VHI), Total Ground Water Storage Deficit (TWS), Hydrological Drought, GLDAS data of moisture of soil, Standardized Precipitation-Evaporation and Transpiration Index (SPEI), Sistan and Baluchestan province.

**Citation:** Nabavizadeh M. & Omidvar K. *Spatial Monitoring of Drought Using Remote Sensing Indices, Case Study: Sistan and Baluchestan Province, Iran J Remote Sens GIS. 16(4):35-56.*

\* Corresponding Author: komidvar@yazd.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.231123.1156>

Received: 2023.03.18  
Accepted: 2023.10.14



**Copyright:** © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



## پایش مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان)

معصومه نبوی‌زاده<sup>۱</sup> و کمال امیدوار<sup>۲\*</sup>

سمت

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیا،

پردیس علوم انسانی و اجتماعی،

دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. استاد گروه جغرافیا، پردیس علوم

انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد،

ایران

### چکیده

**سابقه و هدف:** پایش خشکسالی به دلیل تأثیرات گسترده آن در اقتصاد، محیط‌زیست و جامعه، مسئله‌ای حیاتی است. برای پایش دقیق خشکسالی، داده‌های جامع و یکپارچه هواشناسی و هیدرولوژیکی ضروری است؛ به‌ویژه در مناطقی مانند استان سیستان و بلوچستان که با خشکسالی شدید مواجه است. مطالعات اقلیمی نشان می‌دهد که استان سیستان و بلوچستان، به دلیل عوامل اقلیمی مانند بارندگی اندک، تبخیر بالا، بادهای شدید و پوشش گیاهی محدود، به منطقه‌ای خشک و بسیار مستعد خشکسالی‌های طولانی‌مدت تبدیل شده است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش، برای ارزیابی جامع خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، از داده‌های ماهواره‌ای مادیس و گریس بهره گرفته شد و شاخص پوشش گیاهی VHI برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و شاخص TSDI برای تحلیل تغییرات منابع آب زیرزمینی به کار رفت. برای اعتبارسنجی نتایج، داده‌های رطوبت خاک GLDAS به‌منزله داده مرجع در نظر گرفته شد. با توجه به محدودیت‌های داده‌ای گریس، دوره مشترک شانزده‌ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۷) برای تحلیل انتخاب شد. همچنین، برای بررسی روندهای بلندمدت خشکسالی، شاخص SPEI طی دوره سی‌ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۸) محاسبه شد.

**نتایج:** از لحاظ جغرافیایی، نقشه‌های VHI نشان داد استان سیستان و بلوچستان، در تمامی سال‌ها، با خشکسالی متوسط و ملایم روبه‌رو بوده و در سال‌های منتهی به دوره مطالعاتی، بر شدت خشکسالی‌ها افزوده شده است. به‌منظور پایش خشکسالی هیدرولوژیکی، از محصول ماهواره‌ای گریس استفاده شده است که تغییر در مقدار آب زمینی را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج مطالعه شاخص TSDI مفهوم کمی خشکسالی را پوشش می‌دهد. این شاخص، با هدف پایش خشکسالی هیدرولوژیکی، در تمامی حوضه‌های آبریز درجه ۳ (پنجاه حوضه) محاسبه شد. فرایند پایش خشکی، در گام نخست، با محاسبه کسری خشکسالی به‌منزله ماه‌هایی با TWSA منفی به‌صورت چهار ماه متوالی تعریف شد. نتایج میزان افزایش کسری خشکسالی، از جنوب به شمال استان مورد مطالعه را به‌خوبی به نمایش گذاشته است. تمامی حوضه‌ها، تقریباً از ۲۰۱۱، با کسری‌های بزرگی مواجه بودند. این مطالعه، از طریق برآورد کسری و کاهش ذخیره کلی آب زمینی در ماه آوریل، نشان داد تمامی حوضه‌ها، در سال‌های منتهی به پایان دوره مطالعاتی، شاهد کمبود ذخیره آب، آن هم در محدوده خطرناک و استثنایی بوده‌اند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاصل از VHI نشان داد که استان مورد مطالعه، در سال‌های اخیر، دچار خشکسالی گسترده‌ای شده است. مناطق جنوبی و مرکزی استان با کلاس‌های شدیدتر خشکسالی مواجه بوده‌اند. تحلیل نمودارهای شاخص خشکسالی، در کلاس‌های متفاوت شدت خشکسالی، تأیید می‌کند که همه حوضه‌های آبریز با شرایط خشکسالی، به‌ویژه در سال‌های اخیر، روبه‌رو بوده‌اند. داده‌ها نشان می‌دهند که استان با بحران شدید آب مواجه است. اقدامات فوری و هماهنگ برای مقابله با این چالش ضروری است.

**کلیدواژه‌ها:** شاخص سلامت پوشش گیاهی، شاخص کسری ذخیره آب زمینی، خشکسالی هیدرولوژیکی، داده‌های مدل جهانی رطوبت خاک، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده، استان سیستان و بلوچستان.

استناد: نبوی‌زاده، م. و امیدوار، ک.

پایش مکانی خشکسالی با استفاده از

شاخص‌های سنجش از دوری (مطالعه

موردی: استان سیستان و بلوچستان)،

نشریه سنجش از دور و GIS ایران. سال

۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳: ۵۶-۳۵.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: komidvar@yazd.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.231123.1156>

## ۱- مقدمه

خشکسالی تأثیر نامطلوب شایان توجهی در شرایط اقتصادی، کشاورزی و محیط‌زیست دارد. محققان، به‌منظور پایش خشکسالی، روش‌ها و شاخص‌های گوناگونی ایجاد کرده‌اند؛ این روش‌ها مبتنی بر مشاهدات زمینی داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند بارش، دمای هوا، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و رواناب سطح است. مجموعه‌ای از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، از جمله شاخص استاندارد بارش (SPI)<sup>۱</sup> و شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)<sup>۲</sup>، براساس این داده‌ها توسعه داده شدند. داده‌ها و مشاهدات زمینی در مناطقی با وسعت زیاد با توزیع نابرابر ایستگاه‌های زمینی و فقدان داده روبرو هستند که جهت رفع این مشکل داده‌های مفقود منجر می‌شود، میزان اطمینان را کاهش می‌دهد (Kogan, 1995). بنابراین تمرکز بر سنجش از راه دور، برای نظارت بر خشکسالی، به‌دلیل ویژگی‌های جامع، سریع و پویای آن می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های یادشده باشد (Han et al., 2020). در این راستا، شاخص‌های متعدد خشکسالی مبتنی بر سنجش از راه دور به‌منظور انعکاس شرایط خشکسالی توسعه یافته‌اند. یکی از گسترده‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده NDVI<sup>۳</sup> است (Anyamba & Tucker, 2005; Liu et al., 1994; Malo & Nicholson, 1990; Vicente-Serrano et al., 2004). باین‌حال NDVI، برای پایش خشکسالی، دارای دو محدودیت اصلی بود؛ نخست، میزان تأخیر زمانی میان بارندگی و واکنش NDVI و دوم، تأثیر تأخیری بارش در دوره شکل‌گیری بذر گیاه طی فصل رشد (Bajgiran et al., 2008; BAJGIRAN et al., 2009). به این دلیل، در مطالعات بعدی لزوم توجه به شاخصی حساس‌تر در برابر میزان تنش آب در گیاهان مورد توجه قرار گرفت و برای غلبه بر آن، رویکردهای ترکیب شاخص NDVI و LST، برای تعیین محتوای آب پوشش گیاهی گسترش یافت (Hashimoto et al., 1984). کوگن<sup>۴</sup> (۱۹۹۵) شاخص وضعیت پوشش گیاهی

(VCI)<sup>۵</sup> را با نرمال‌سازی مقادیر NDVI به حداکثر دامنه منطقه‌ای خاص، پیشنهاد کرد. بدین‌صورت، با نرمال‌سازی، مؤلفه اکوسیستم با موفقیت به حداقل رسید. در ادامه، VCI در نظارت و تجزیه و تحلیل خشکسالی استفاده گسترده‌ای یافت و اطمینان به آن طی بسیاری از مطالعات تأیید شد (Jiao WenZhe et al., 2016). شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)<sup>۶</sup>، در حقیقت، شاخص ترکیبی VCI و TCI<sup>۷</sup> است که تأثیرات ترکیبی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین را در پایش خشکسالی نمایش می‌دهد (Damavandi et al., 2016). VHI با افزایش دما، پوشش گیاهی دچار تنش می‌شود و در شرایطی هم که رطوبت محیط بیش‌ازحد باشد، این شاخص، قادر به تشخیص خطای خشکسالی ناشی از شرایط رطوبتی بیش‌ازحد خواهد بود (Kogan, 1995; Singh et al., 2003). طی پژوهش‌هایی، شمسی‌پور<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه کاشان؛ زمانیان<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در استان اصفهان؛ دماوندی<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در استان مرکزی؛ پورمحمدی و رحیمیان<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۷) در حوضه توپسرکان همدان؛ پورخسروانی<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در حوضه سیرجان کارآیی VHI را بررسی و دقت بسیار خوب این شاخص را در پایش خشکسالی کشاورزی تأیید کردند. آنها بیان کردند که شاخص‌های سنجش از دوری پایش خشکسالی، مانند VHI، می‌توانند در پایش خشکسالی کشاورزی به برنامه‌ریزان محیطی کمک شایانی کنند. با توجه به اهمیت میزان آب‌های زیرزمینی در استان سیستان و بلوچستان علاوه بر

1. Standardized Precipitation Index
2. Palmer Drought Severity Index
3. Normalized Difference Vegetation Index
4. Kogan
5. Vegetation Condition Index
6. Vegetation Health Index
7. Temperature Condition Index
8. Shamsipour
9. Zamanian
10. Damavandi
11. Pourmohammadi & Rahimian
12. Pourkhosravani

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان، با وسعتی حدود ۱۸۱۷۸۵ کیلومتر مربع، پهناورترین استان در جنوب شرق کشور است و ۵ درجه عرض جغرافیایی گسترش دارد. این استان دارای پنجاه حوضه آبریز درجه ۳ است که در شکل ۱ آورده شده است. این استان، به دلیل قرار گرفتن در عرض‌های جغرافیایی پایین، آب‌وهوایی گرم‌وخشک دارد و بیش از نیمی از سال تحت تسلط سامانه پرفشار جنب‌حاره‌ای قرار دارد که همین عامل باعث گرم‌وخشک شدن هوا می‌شود. بالابودن میانگین دما و پایین بودن نوسانات آن از مشخصه‌های اساسی اقلیم منطقه است (Piri et al., 2013).

### ۲-۲- داده‌ها و روش‌شناسی

خشکسالی کشاورزی و خشکسالی هیدرولوژیکی دو مقوله جدا از هم نیستند. وابستگی بسیار زیاد کشاورزی به منابع آب‌های زیرزمینی، در استان سیستان و بلوچستان، موجب شد این تحقیق در سه بخش کشاورزی، هیدرولوژی و هواشناسی به پایش خشکسالی بپردازد که در ادامه، بیان می‌شود.

### ۲-۲-۱- پایش خشکسالی کشاورزی با شاخص سلامت پوشش گیاهی VHI

شاخص سلامت پوشش گیاهی متوسط مجموع VCI و TCI است و NDVI از محصول MOD13A3 مادیس به دست می‌آید (Didan et al., 2015). دما نیز به‌عنوان

پایش خشکی پوشش گیاهی، به بررسی خشکی هیدرولوژیکی هم پرداخته شد. برای تعریف و توسعه شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر ذخیره کلی آب (TWS)<sup>۱</sup> و رطوبت خاک و آب زیرزمینی، باید مشاهدات پیوسته و جامع و بلندمدت در قالب شبکه‌ای از ایستگاه‌های آب‌سنجی، برف‌سنجی، هواشناسی، سینوپتیک و چاه‌های مشاهداتی، با توزیع مکانی مناسب در اختیار داشته باشیم. احداث و نگهداری چنین شبکه‌ای هزینه‌های هنگفتی در پی خواهد داشت (Chen et al., 2010). سنجش از دور با قابلیت‌های خود توانسته است برخی از این مشکلات را رفع کند که در این زمینه، می‌توان از ماهواره گرانسنجی و مشاهدات آب‌وهوایی (GRACE)<sup>۲</sup> نام برد. محققان در سال ۲۰۱۴ روشی بسیار کاربردی برای نظارت بر خشکسالی هیدرولوژی، با استفاده از داده‌های ماهواره گریس، پیشنهاد و اثبات کردند که این روش، به‌ویژه در حوضه‌های دارای محدودیت داده، مفید است (Thomas et al., 2014). جانگ<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) و المامالچی<sup>۴</sup> (۲۰۲۰)، برای پایش خشکسالی حوضه‌های آبریز در چین و عراق، از همین رویکرد بهره بردند و به نتایج مورد اعتمادی دست یافتند. در این مطالعات، برای پایش خشکسالی، از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای شامل شاخص سلامت پوشش گیاهی، داده‌های رطوبت مدل جهانی (GLDAS)<sup>۵</sup> و شاخص کسری ذخیره کل (TSDI)<sup>۶</sup> استفاده شده است زیرا، با پایش همه‌جانبه خشکسالی‌ها، می‌توان به دید جامع و کلی‌تری دست یافت. با توجه به اینکه مطالعات سنجش از دوری در زمینه خشکسالی هیدرولوژیکی، در سطح استان، بسیار اندک است و تولید داده‌های زمینی نیز به‌علت وسعت بسیار زیاد، محدودیت دارد، پایش خشکسالی حوضه‌های آبریز از طریق داده‌های سنجش از دور می‌تواند بسیار مفید باشد. یادآوری می‌شود کشاورزی در این استان بیشتر به آب‌های زیرزمینی و آب‌آوردهای فرامرزی متکی است که این نکته اهمیت پایش خشکسالی هیدرولوژیکی را دوچندان می‌کند.

1. Total Water Storage

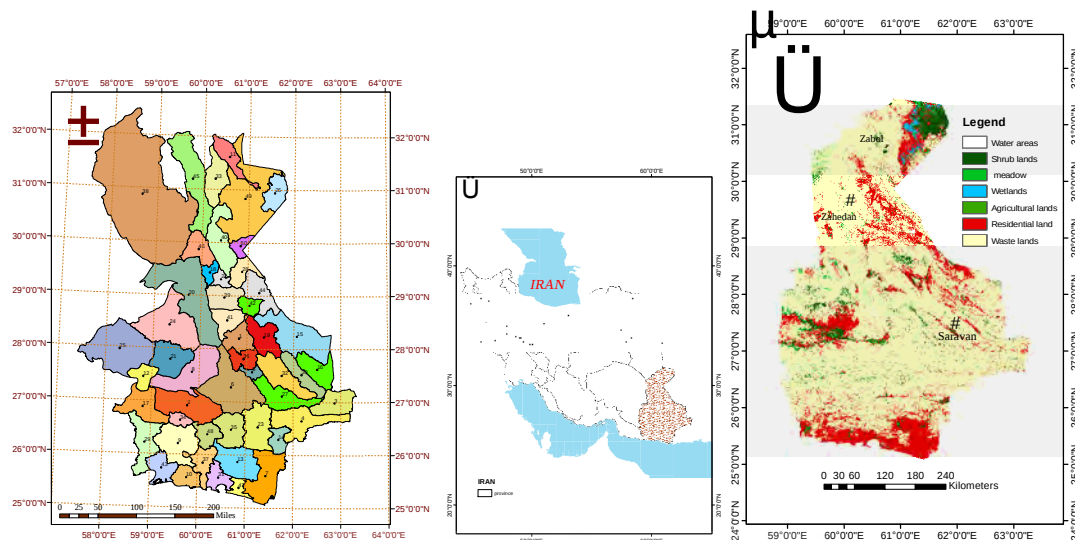
2. Gravity Recovery and Climate Experiment

3. Zhang

4. Almamalchy

5. Global Land Data Assimilation System

6. Total Storage Deficit Index



شکل ۱. موقعیت منطقه و حوضه‌های آبریز مورد مطالعه و محدوده پوشش اراضی در استان

گیاهی توسعه یافته و در صورت استفاده در مناطق بایر، ممکن است نتایج آن غیرواقعی و گمراه‌کننده باشد؛ از سویی، مساحت زیادی از استان شرایط خشک‌وبیابانی دارد و به همین دلیل، مناطق دارای پوشش گیاهی از مناطق فاقد گیاه جداسازی شدند (شکل ۱). برای جدا سازی پوشش گیاهی، به‌علت وسعت زیاد استان، از محصول طبقه‌بندی جهانی پوشش زمین ارائه‌شده با سنجنده مادیس (MCD12Q1) با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. برای طبقه‌بندی کاربری‌ها، سیستم طبقه‌بندی UMD به‌منزله شیوه بهینه طبقه‌بندی، برای شناسایی پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه، شناخته شد (Mahmoudi et al., 2020). به‌منظور محاسبه شاخص، دو محصول سنجنده مادیس ماهواره ترا به نام‌های MOD11A1 و MOD13A3، با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر، از درگاه داده‌ای سیستم دیده‌بانی جهانی (EOS) دریافت شد. با توجه به هدف که پایش خشکی گیاه است، آوریل که ماه حداکثر رویشی در استان است به‌منزله ماه مورد مطالعه طی دوره زمانی شانزده‌ساله‌ای (۲۰۰۲-۲۰۱۷) انتخاب شد.

دمای سطحی زمین (LST)، درمورد روز و شب، به‌طور جداگانه از محصول MOD11A1 حاصل می‌شود. نحوه محاسبه VHI با استفاده از معادلات (۱) تا (۵) نشان داده شده است. براساس (جدول ۱)، کلاس‌های خشکسالی VHI، طبقه‌بندی می‌شود (Kogan, 1995).

$$\text{رابطه (۱)} \quad NDVI = \frac{NIR + RED}{NIR - RED}$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad LST = \frac{LST_{day} - LST_{night}}{2}$$

$$\text{رابطه (۴)} \quad TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad VHI = \alpha_1 \times VCI_i + \alpha_2 \times \Delta TCI_i$$

$NDVI_{max}$ ،  $NDVI_{min}$  بیانگر حداکثر و حداقل NDVI برای یک پیکسل در تمامی ماه‌ها هستند (رابطه (۱)).  $LST_{min}$  و  $LST_{max}$  حداقل و حداکثر دمای سطح زمین در دوره زمانی مشخص را نشان می‌دهد (رابطه (۴)).  $VCI_i$  شاخص وضعیت پوشش گیاهی و TCI شاخص وضعیت دماست (رابطه‌های (۲) و (۵)). شایان ذکر است که VHI برای نظارت بر سلامت پوشش

جدول ۱. میزان و کلاس‌های خشکسالی در VHI

| کلاس  | بسیار شدید | شدید      | متوسط     | ملایم     | نبود خشکسالی |
|-------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| میزان | $\leq 10$  | $\leq 20$ | $\leq 30$ | $\leq 40$ | $> 40$       |

## ۲-۲-۲- ذخیره کلی آب (TSDI)

پایش خشکسالی هیدرولوژیکی نیز در این منطقه، به علت استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، اهمیت فراوانی دارد. در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی زمینی مانند کندن چاه‌ها، مأموریت ماهواره‌ای گریس جایگزین بسیار کارآمد و کم‌هزینه‌تری برای بررسی میزان تغییرات ذخیره آب‌ها محسوب می‌شود که همواره در مقیاس جهانی با مشکلات و تنگنانهایی روبه‌رو بوده است. ماهواره گریس می‌تواند هرگونه تغییر در جاذبه نقاط گوناگون زمین را تشخیص دهد. زمانی که میزان آب در سفره آبی کم می‌شود، نیروی جاذبه آن نقطه کاهش می‌یابد. گریس به دلیل این توانایی منحصربه‌فرد در اندازه‌گیری تغییر مقدار آب موجود در بخش زمینی (از جمله آب زیرزمینی)، علاوه بر پایش خشکسالی هیدرولوژیکی مانند برآورد دبی کل حوضه (Syed et al., 2008) و برآورد تبخیر و تعرق (Famiglietti et al., 2011; Ouyang et al., 2016)، کاربردهای گسترده‌ای در منابع علمی دارد. محصولات ماهواره گریس در سه مرکز پردازش تولید می‌شوند. این پردازش در لابراتوار JPL ناسا، مؤسسه GFZ در آلمان و مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس آمریکا (CSR) انجام می‌شود. در این مطالعه، از داده‌های به‌روزشده سطح ۲، Release-06 با نام و فرمت «RL06\_Mascons\_all-corrections\_v02 NETCDF»

دریافت شده از وبگاه GRACE-Tellus، استفاده شد.

دوره زمانی انتخابی در بخش هیدرولوژیکی از آوریل ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۷، با شروع به کار این ماهواره از ۲۰۰۲ است و تا ۲۰۱۹ هم در دسترس قرار دارد. در برخی ماه‌ها، این ماهواره فاقد داده است و طبق مطالعاتی که در سطرهای پیش‌تر به آنها اشاره شد، از

روش‌های میان‌یابی برای داده‌های مفقود شده استفاده می‌شود. شایان ذکر است که این ماهواره از ژوئن ۲۰۱۷ تا شانزدهم ژوئن ۲۰۱۸، به مدت یازده ماه، با نبود داده روبه‌رو بوده است که این مسئله به خلل و عدم قطعیت بسیار زیاد در نتایج منجر می‌شود؛ به همین علت، در این تحقیق از داده‌های جدید فقط تا ژوئن ۲۰۱۷ استفاده شد که داده‌های مفقود بسیار کمتری داشت.

TSDI می‌تواند میزان تغییرات ذخیره آب زمینی را با استفاده از داده‌های تغییرات ذخیره کلی آب، دریافتی از ماهواره گریس، محاسبه کند. این شاخص می‌تواند، در بلندمدت، تصویر مناسبی از ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها پدید آورد. برای محاسبه TSDI ابتدا باید کمبود ذخیره کلی آب را به صورت تجمعی محاسبه کرد. ذخیره کلی آب طبق رابطه (۷) تعیین می‌شود (Swenson & Wahr, 2002).

$$TSDij = \frac{TWSIij - M TWSIj}{M TWSIj - Min TWSIj} \times 100 \quad \text{رابطه (۷)}$$

$TWSIij$  میزان تغییرات ذخیره کلی آب در همان ماه و همان سال است که از داده‌های ماهواره گریس حاصل می‌شود.  $M TWSIj$  میانگین تغییرات ذخیره کلی آب در همه ماه‌های ژام، در کل بازه زمانی مورد نظر است.  $Max TWSIj$  و  $Min TWSIj$  نیز به ترتیب، حداکثر و حداقل مقدار تغییرات ذخیره کلی آب در ماه ژام هستند. در مرحله بعد، TSDI باید براساس مقادیر TSD محاسبه شود. در برخی مطالعات، برای محاسبه TSDI، از پارامتر بحرانی  $c$  حاصله از مونوگراف خشکسالی استفاده نموده (Agboma et al., 2009) و سپس با کمک شاخص خشکسالی دیگری، مثلاً SPI، در مناطق متفاوت تعیین شده است ولی، این روش، معیار یکسانی را برای تعریف تک‌نگاری خشکسالی معرفی نمی‌کند (Cao et al., 2015). از این‌رو، به منظور ایجاد مجموعه داده شاخص خشکسالی مناسب و اجرایی در نواحی گسترده در این مطالعه، TSDI با استاندارد کردن مقادیر TSD بدین صورت محاسبه می‌شود (Wanders et al., 2010):

$$TSDIij = \frac{TSDij - \mu}{\sigma} \quad \text{رابطه (۸)}$$

شبیه‌سازی جهانی نیز استفاده شد. با توجه به مطالعات (Ahmadi\_baseri et al., 2020; Faraji et al., 2017; Miri et al., 2018; Nasr-Azadegan et al., 2014; Niazi et al., 2018; Pakdel\_Khosmakhi et al., 2014)، داده‌های GLDAS دقت بالایی دارند و در مناطق فاقد آمار، می‌توان این داده‌های ماهواره‌ای را جایگزین داده‌های زمینی کرد. در این تحقیق، برای تطابق شاخص‌ها با داده‌های هواشناسی، از پایگاه داده مدل جهانی همسان‌سازی داده‌های زمینی GLDAS مقیاس ماهیانه، مدل Noah با تفکیک مکانی  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  درجه (دریافتی از وبگاه Giovanni، با فرمت Geo Tiff) استفاده شد. در جدول ۳، داده‌های به‌کاررفته در این تحقیق بیان شده و در شکل ۲، فلوچارت تحقیق آمده است.

در این معادله،  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب، مقدار متوسط و انحراف استاندارد TSD هستند. مقادیر TSDI برای همه شبکه‌ها از ۳- تا ۳+ است که شرایط بسیار خشک تا بسیار مرطوب را بیان می‌کند. از آن‌جاکه مقادیر TSDI بین ۳- و ۳+ استاندارد شده بودند، می‌توانند از نظر فضایی بین مناطق متفاوت آبی- اقلیمی (خشک یا مرطوب) مقایسه شوند (Narasimhan & Srinivasan, 2005).

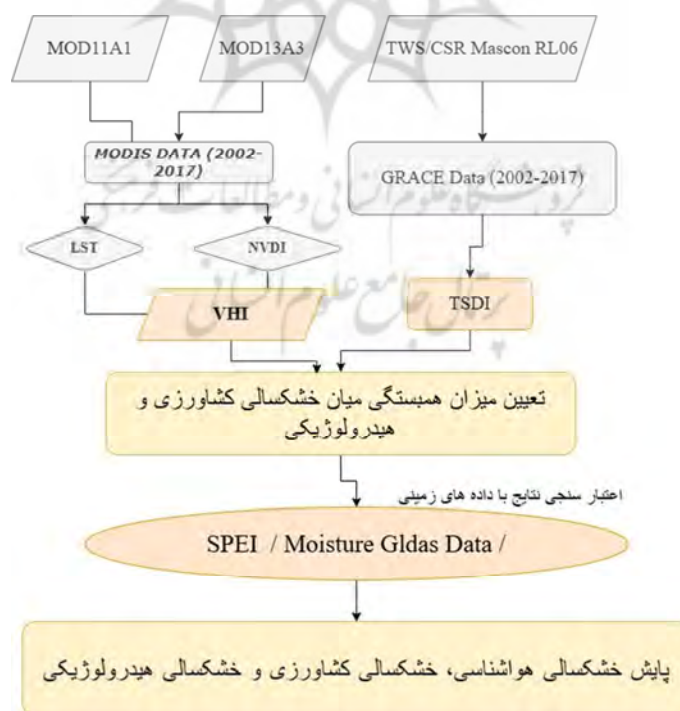
### ۳-۲-۲- پایش خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) و داده‌های GLDAS

#### الف) پایش با داده‌های رطوبت خاک GLDAS

در این مطالعه، به‌علت پهنابودن استان مورد مطالعه و فاصله زیاد ایستگاه‌های آماری، از داده‌های شبکه‌ای

جدول ۲. آستانه‌های طبقه‌بندی TSDI و SPEI

| کلاس | ترسالی بسیار شدید | ترسالی شدید  | ترسالی متوسط | نرمال     | خشکسالی ملایم | خشکسالی متوسط | خشکسالی شدید | خشکسالی بسیار شدید |
|------|-------------------|--------------|--------------|-----------|---------------|---------------|--------------|--------------------|
| TSDI | ۲ و بیشتر         | ۱/۴۹ تا ۱/۵۵ | ۱ تا ۱/۴۹    | ۰ تا ۰/۹۹ | ۰ تا ۰/۹۹     | ۱- تا ۱/۴۹    | ۱/۵ تا ۱/۹۹  | ۲- و بیشتر         |



شکل ۲. فلوچارت تحقیق

جدول ۳. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

| نوع داده                                                              | ماهواره<br>نام لایه                                               | تاریخ دریافت داده‌ها        |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| LST شامل دمای سطح و تفکیک زمانی روزانه                                | MODIS / MOD11A1                                                   | از اپریل ۲۰۰۲ تا اپریل ۲۰۱۷ |
| NDVI و تفکیک زمانی ماهانه                                             | MODIS / MOD13A3                                                   | از اپریل ۲۰۰۲ تا اپریل ۲۰۱۷ |
| GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly Soil Moisture Noah 0-10 cm   | NASA Global Land Data Assimilation System                         | از اپریل ۲۰۰۲ تا اپریل ۲۰۱۷ |
| RL06_Mascons_all-corrections_v02 (3).NETCDF                           | GRACE/ TWS                                                        | ۲۰۰۲-۲۰۱۷                   |
| Land Cover Type 2: Annual University of Maryland (UMD) classification | MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly MCD12Q1                   | ۲۰۰۲-۲۰۱۷                   |
| NDVI و Landsat-8 LST در قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر                       | LANDSAT 8                                                         | ۳۰ اپریل ۲۰۱۵               |
| بارش روزانه                                                           | ایستگاه‌های سینوپتیک زاهدان، زابل، سراوان، خاش، ایرانشهر و چابهار | ۱۹۸۷-۲۰۱۸                   |

## ب) شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده

در این مقاله، به منظور اعتبارسنجی از TSDI، VHI و SPEI استفاده شد. می‌توان گفت یکی از محدودیت‌های SPI در نظر نگرفتن بیلان آب براساس میزان تبخیر و تعرق است. SPEI بیلان آب را در محاسبه شاخص خود لحاظ می‌کند. از دیگر سو، تمرکز TSDI و VHI بر رطوبت خاک و گیاه است. SPEI، در مقیاس‌های زمانی متفاوت، از معادله ساده بیلان آب، یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنتوایت استفاده می‌کند. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل PET، تفاوت بین بارندگی P و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه  $t$  طبق رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$Di = P_i - PET_i \quad \text{رابطه (۹)}$$

به توزیعی سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا مقادیر منفی در داده‌های D پوشش داده شود. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها، در مقیاس‌های زمانی متفاوت دارد. بدین ترتیب تابع تجمع‌ی احتمال سری داده‌های D، براساس تابع لجستیک لگاریتمی، طبق رابطه (۱۰) است.

$$F(X) = \left[ 1 + \left( \frac{a}{\beta - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$\alpha$  پارامتر مقیاس،  $\beta$  پارامتر شکل و  $\gamma$  پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده  $-\infty < D < \gamma$  است.

بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال، مقادیر SPEI استخراج می‌شود (Lorenzo-Lacruz et al., 2010). SPEI را می‌توان در مقیاس‌های زمانی متفاوتی، مانند یک ماه، سه ماه، شش ماه، دوازده ماه، بیست و چهار یا چهل و هشت ماه محاسبه کرد. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن گویای منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب به کار رود. خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به ۱- برسد و با مثبت شدن آن نیز، خاتمه می‌یابد. کاربرد این شاخص در کشورهای گوناگون رواج دارد (Morid et al., 2006). طبقه‌بندی این شاخص همانند TSDI است (جدول ۲).

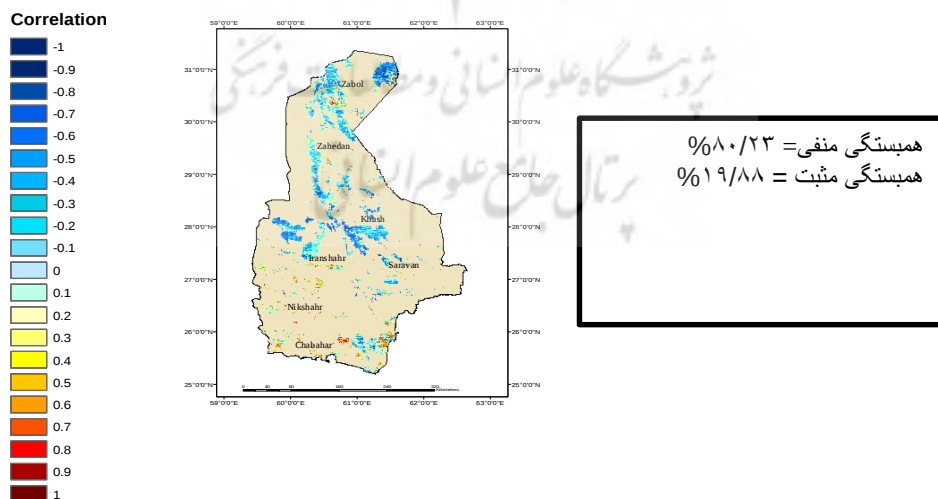
## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- عملکرد VHI در پایش خشکسالی

VHI برای نظارت بر پوشش گیاهی توسعه یافته است و در صورت استفاده در مناطق بایر، چه بسا نتایج آن

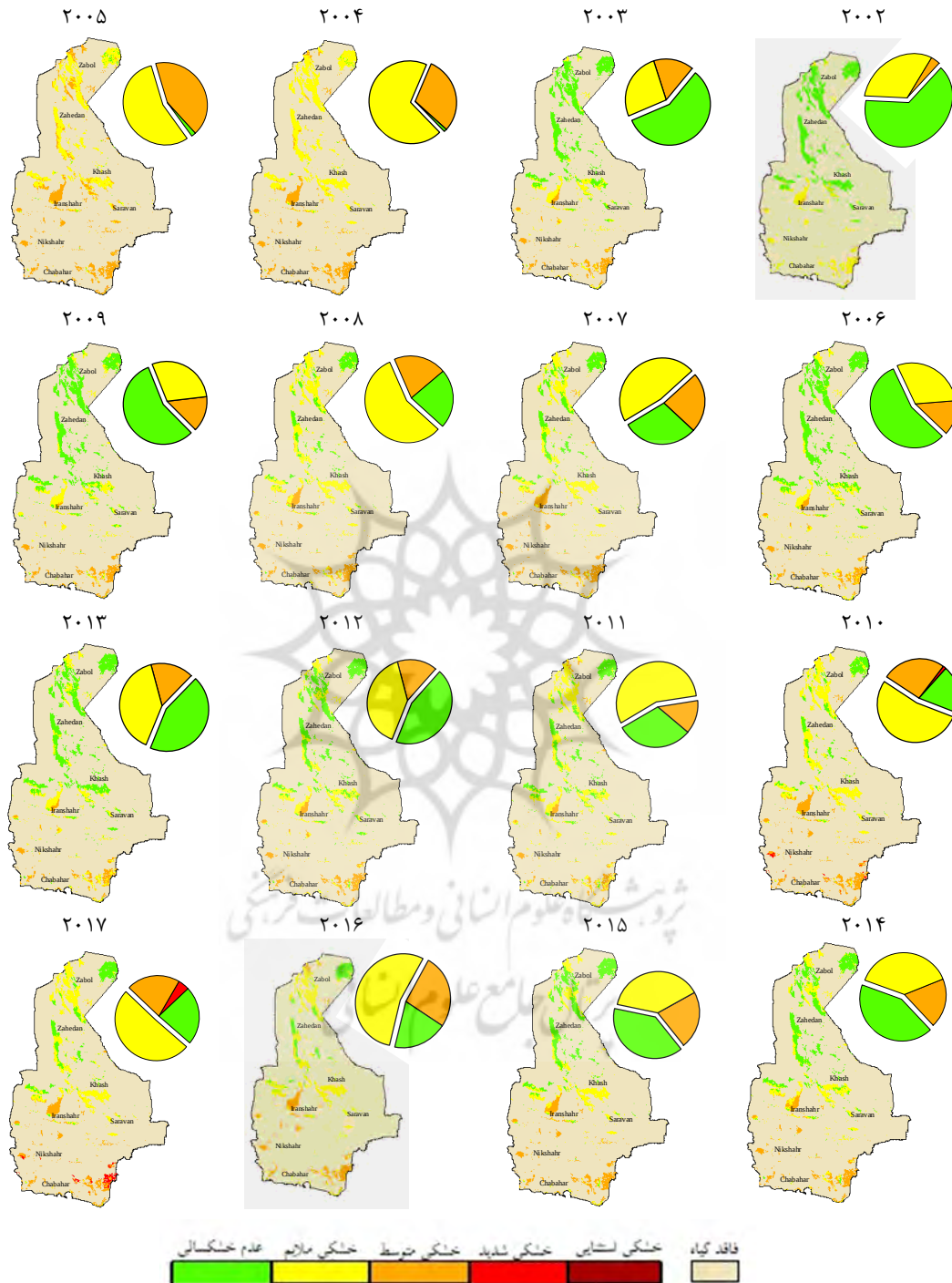
در فرایند تحقیق، ابتدا نقشه‌های خشکسالی ماه آوریل VHI، به‌تعداد شانزده نقشه خروجی در ماه آوریل، ایجاد شد (شکل ۴). همان‌طور که در نقشه‌های خشکسالی مشاهده می‌شود، رخ‌دادن خشکسالی و وقوع خشکسالی جزئی و خفیف در تمامی سال‌ها وجود دارد و همه سال‌ها، در مناطق دارای پوشش گیاهی، نیمه شمالی استان با نبود خشکسالی یا خشکسالی خفیف مواجه بوده است. در نیمه جنوبی، فقط در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۰، به‌ترتیب ۴/۵ و ۱/۴۶٪ طبقات خشکسالی شدید مشاهده شده و شدت خشکسالی بالا، در این شاخص، بیشتر از نوع متوسط بوده است. خشکسالی بسیار شدید و استثنایی در هیچ سالی مشاهده نشد اما نکته بسیار مهم آن است که، با توجه به وقوع خشکسالی‌های شدید هواشناسی در این استان که در بسیاری از مطالعات به اثبات رسیده است (Kahkhakohan et al., 2019; Khosravi, 2009; Piri & Ansari, 2013; Zare-Abianeh et al., 2015)، می‌توان به اهمیت سفره‌های آب‌های زیرزمینی و استفاده بی‌رویه از این نعمت خدادادی جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی این استان اشاره کرد.

غیرواقعی و گمراه‌کننده باشد. از سویی، مساحت زیادی از جنوب‌شرق ایران، شامل استان سیستان و بلوچستان، شرایط خشک و بیابانی دارد که اثر پس‌زمینه خاک را در خروجی‌ها دخیل می‌کند؛ به همین دلیل، مناطق دارای پوشش گیاهی از مناطق فاقد گیاه جداسازی شدند. به‌منظور انجام‌شدن فرایند کار، طبقه‌بندی جهانی پوشش زمین که محصول سنجنده مادیس است (MCD12Q1) و سیستم طبقه‌بندی UMD استفاده شد و مناطق بدون پوشش گیاهی از مناطق دارای پوشش گیاهی جدا و در راهنمای نقشه‌ها، به‌منزله مناطق بدون پوشش گیاهی<sup>۱</sup> تعریف شدند. شایان ذکر است که VHI رابطه‌ای منفی بین NDVI و LST فرض می‌کند. اگر رابطه مثبت در منطقه مورد مطالعه یافت شود، باید انتظار عدم قطعیت در نتایج خشکسالی را داشت. شکل ۳ نشان می‌دهد، بین اجزای VHI، همبستگی منفی بیش از ۸۰/۲۳٪ وجود دارد که این همبستگی منفی بالا عدم قطعیت را در پایش خشکسالی، تا حد زیادی کاهش می‌دهد. فقط ۱۹/۸۸٪ همبستگی مثبت در منطقه یافت شده است که علت آن را می‌توان به نوع پوشش گیاهی، اعم از شوری یا خشکی‌پسند و استفاده از آبیاری در کشاورزی نسبت داد.



شکل ۳. ضریب همبستگی میان NDVI و LST

#### 1. Non Vegetated

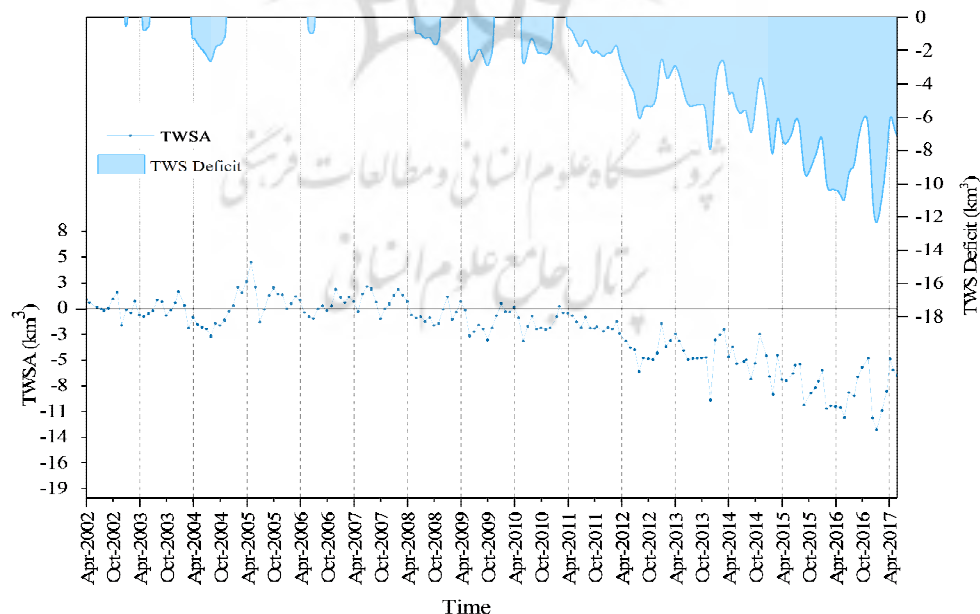


شکل ۴. VHI در ماه‌های آوریل، طی شانزده سال دوره مطالعه

## ۲-۳- شاخص کسری ذخیره کلی آب (TSDI)

این مرحله از تحقیق، با هدف بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی از طریق شاخص کسری ذخیره کل در جنوب شرق ایران، با تأکید بر استان سیستان و بلوچستان (شامل پنجاه حوضه آبریز درجه ۳)، انجام شد (شکل ۱). برای محاسبه تغییرات ذخیره کلی آب در حوضه‌های آبریز درجه ۳ مورد مطالعه، از آخرین داده‌های به‌روزشده ماهیانه CSR GRACE RL06 با عنوان TWSA، از آوریل ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۷ و با تفکیک مکانی  $(0.25^\circ \times 0.25^\circ)$  استفاده شد. شایان ذکر است که طی سال‌های اخیر، به‌منظور افزایش عمر باتری‌های ماهواره گریس، در برخی ماه‌ها اندازه‌گیری با این ماهواره انجام نمی‌شود و می‌توان داده‌های این ماه‌ها را با روش‌های درون‌یابی جایگزین کرد (Ramillien et al., 2004). بعد از درون‌یابی داده‌های مفقودشده، شاخص کسری ذخیره کل برای هر پنجاه حوضه محاسبه شد. در این تحقیق، کسری خشکسالی

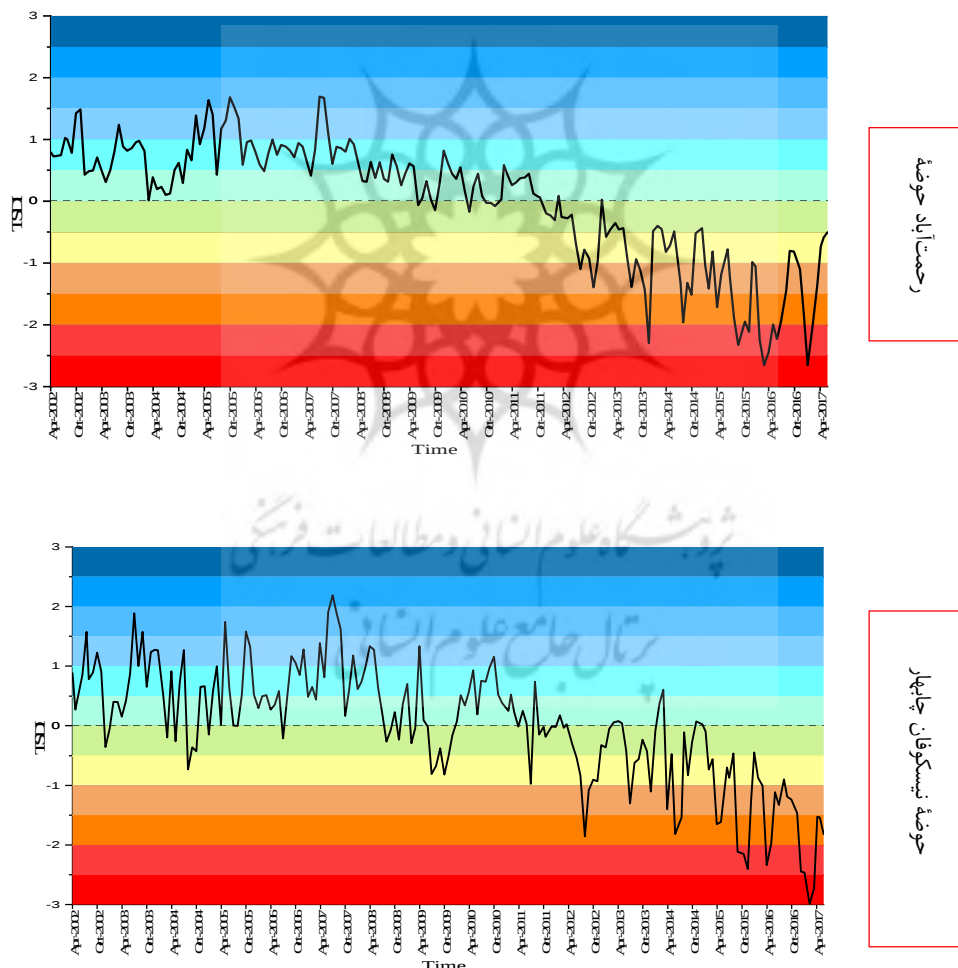
به‌صورت ماه‌هایی با TWSA منفی تعریف شد و رویدادهای خشکسالی کمتر از چهار ماه به‌منزله خشکسالی در نظر گرفته نشد. مازادهای TWSA کمتر از سه ماه نیز به‌منزله ترسالی در نظر گرفته نشده است. در نظر نگرفتن کسری‌ها و مازادهای کمتر از چهارماه در پایش خشکسالی هم‌راستا با دیدگاه‌های برخی محققان دیگر است (Parry et al., 2016; Thomas et al., 2014; Zhang et al., 2016)، که هدف از آن جلوگیری از تغییرات جزئی در TWSA، مثلاً کسری یا مازاد در رویدادهای مهم خشکسالی است. در شکل ۵، خط آبی میزان TWSA به‌دست‌آمده از ماهواره گریس و بخش سایه‌دار آبی میزان کسری محاسبه‌شده رویدادهای خشکسالی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، استان مورد نظر، از آوریل ۲۰۱۲ تا پایان دوره مطالعاتی با کسری‌های بزرگی مواجه بوده است؛ برای نمونه، به‌طور متوسط، این استان در سال ۲۰۱۶ دارای کسری  $12/2$  کیلومتر مکعب بوده است.



شکل ۵. محاسبه میانگین کسری حوضه‌های استان سیستان و بلوچستان

رحمت‌آباد در شمال استان، با بیشترین مجموع شدت خشکسالی ۶۶۵/۹۹- (کیلومترمکعب در ماه) و نمودار حوضه نيسکوفان چابهار در جنوب استان، با کمترین مجموع شدت خشکسالی ۱۱۱/۲۱۴- (کیلومترمکعب در ماه)، به نمایش گذاشته شد. سپس طبقات TSDI دو حوضه با رنگ‌های متفاوت مشخص شد. آنچه در همه حوضه‌های مورد مطالعه دیده می‌شود این نکته مهم است که میزان کسری ذخیره آب‌های زمینی همه حوضه‌ها، با شیب تندی، از متوسط به خشکی بسیار شدید و استثنایی متمایل شده است (شکل ۶).

برای محاسبه TSDI، باید کمبود ذخیره کلی آب را به‌صورت تجمعی محاسبه کرد. بدین‌منظور ناهنجاری‌های میانگین و حداکثر و حداقل هر ماه محاسبه شد. میزان TSDI بین ۱۰۰- تا ۱۰۰+ تغییر می‌کند که این مقادیر، به ترتیب، نشان‌دهنده وضعیت بسیار خشک و بسیار مرطوب است (Yirdaw et al., 2008). بعد از محاسبه شاخص، مشخص شد که رفتار خشکسالی هیدرولوژیکی با شدت و ضعف متفاوتی، در تمامی پنجاه حوضه آبریز، یکسان بوده است. به همین دلیل برای طولانی‌نشدن مقاله، نمودار TSDI حوضه



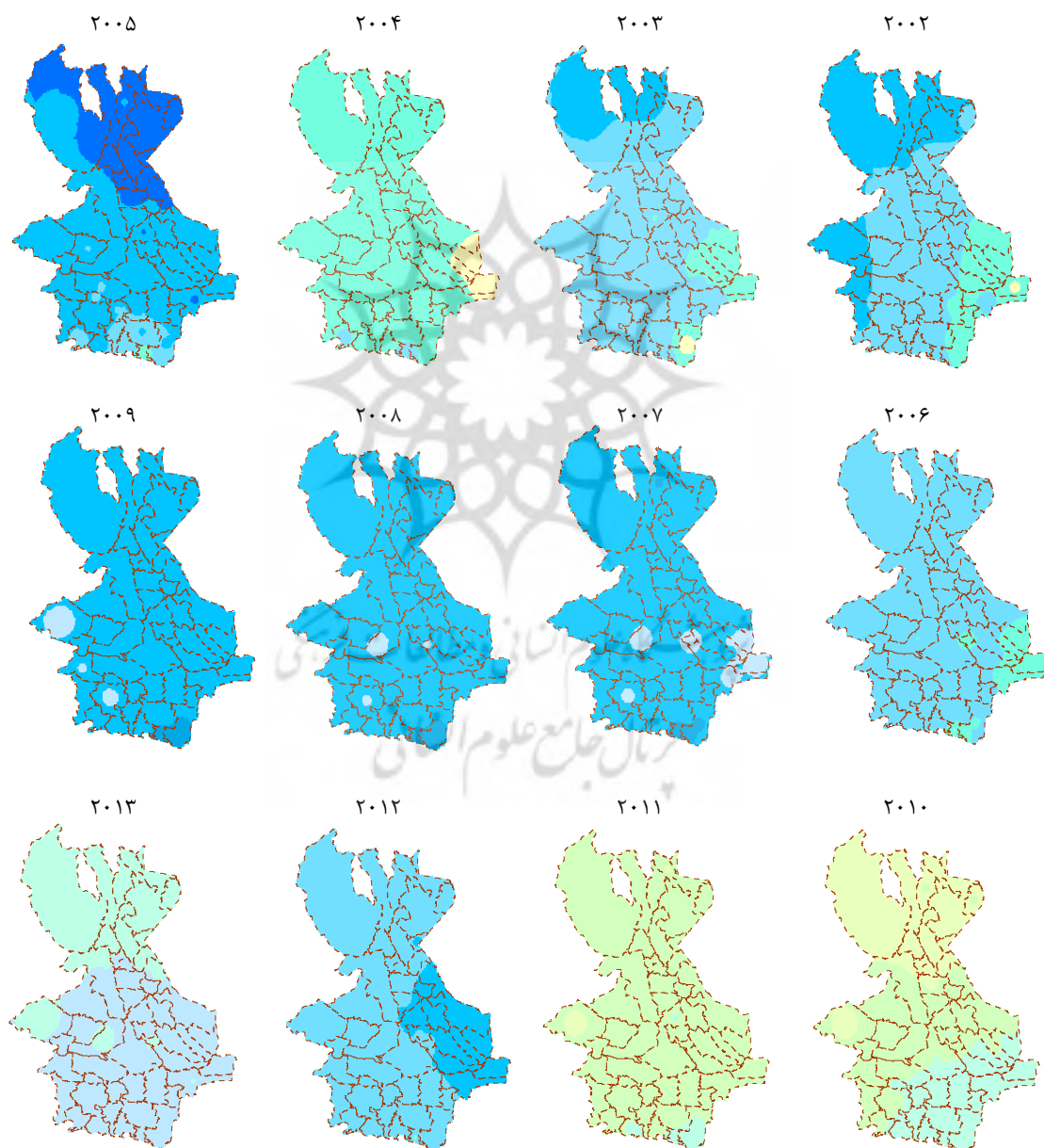
شکل ۶. طبقه‌بندی شدت خشکسالی با استفاده از TSDI

## نمونه‌ای از مجموعه کامل سالیانه نقشه‌های TSDI در

## مقیاس ماهیانه آوریل

در این بخش به منظور ایجاد دید بصری و مکانی بهتر، TSDI که در شکل ۶ به صورت نمودار نمایش داده شده بود، به صورت نقشه‌ای در مقیاس ماهیانه آوریل تنظیم شده است (شکل ۷). حداکثر مازادهای ذخیره کل در طبقه با رطوبت متوسط، طی آوریل ۲۰۰۵ و در ناحیه شمالی استان، مشاهده شد که ناشی از ورود آب‌های

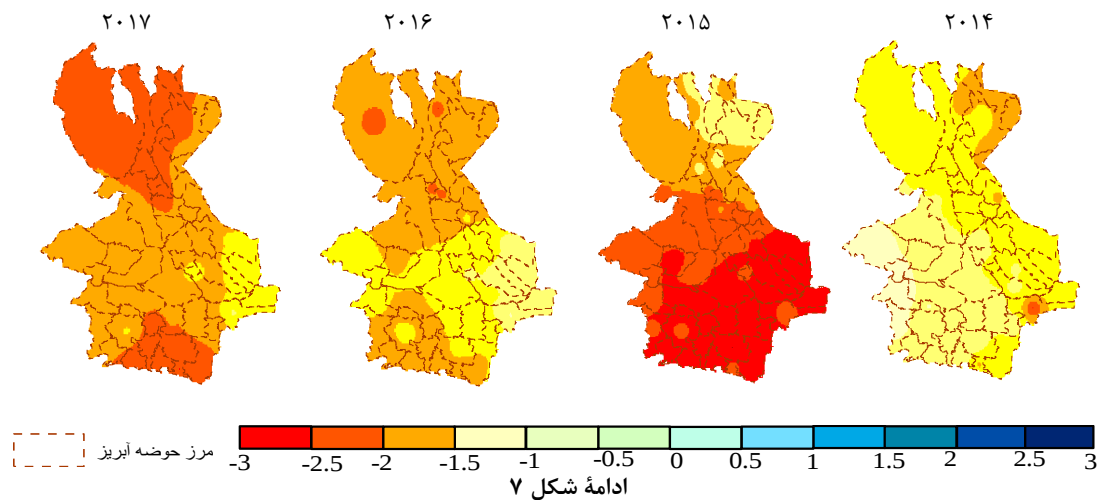
فرامرزی است. از سال ۲۰۱۲ تا پایان دوره مطالعاتی، شاخص کسری ذخیره کل به شدت بحرانی شده است و در نتیجه، در آوریل ۲۰۱۶ تمامی استان با کسری شدید و خشکی استثنایی مواجه بوده است. طی چهار سال منتهی به دوره مطالعاتی در این تحقیق، وضعیت آب‌های زیر زمینی در شرایط بحرانی بسیار شدیدی قرار دارد. این وضعیت زنگ خطری بسیار جدی برای منابع آب و پوشش گیاهی منطقه شمرده می‌شود.



شکل ۷. نمونه‌ای از مجموعه کامل سالیانه نقشه‌های TSDI در مقیاس ماهیانه مارس

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

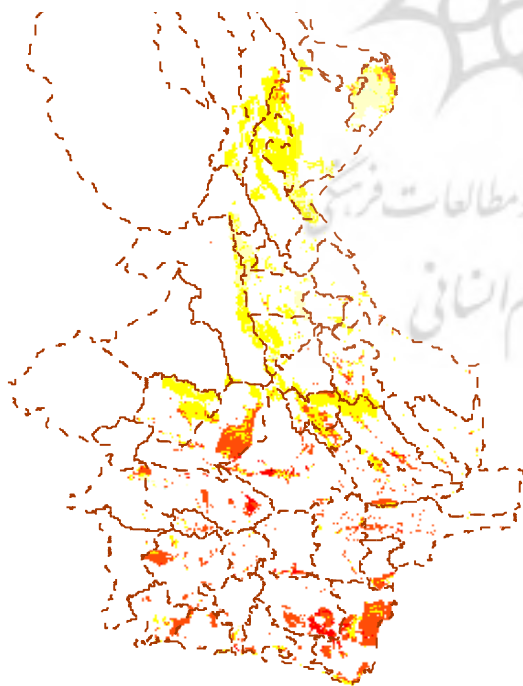
سال ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳



محدودیت منابع آب و نابهنگام‌بودن آورده‌های سطحی رودخانه هیرمند و نداشتن انطباق با نیازهای آبی گیاهان ترکیب کشت منطقه سبب چالش جدی در امکان برنامه‌ریزی طرح‌های توسعه کشاورزی در منطقه و کاهش عملکرد محصولات شده است.

#### ارزیابی همبستگی شدت خشکسالی پوشش گیاهی با هیدرولوژیکی براساس VHI و TSDI

برای بررسی رابطه شدت خشکسالی پوشش گیاهی با کمبود ذخیره کل، از ضریب همبستگی پیرسون به‌صورت نقطه‌ای استفاده شد؛ بدین‌شویه که هر نقطه دارای طول و عرض جغرافیایی مشخصی بود (شکل ۸). میزان توزیع همبستگی‌ها در ماه آوریل نشان داد خشکی پوشش گیاهی، در نیمه جنوبی استان، همبستگی بیشتری با کسری ذخیره کل دارد و در مقابل، بخش‌های شمالی همبستگی ضعیفی با میزان کاهش کسری ذخیره کل نشان داده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان کردیم، مهم‌ترین منبع تأمین آب در این حوضه رودخانه هیرمند، به‌طول ۱۰۵۰ کیلومتر است. آب‌دهی این رودخانه بسیار متغیر است و رودخانه مورد نظر جریان طبیعی ندارد. در بالادست آن، چندین سد تنظیمی وجود دارد و آب ورودی به شمال ازطریق سدهای هیرمند کاملاً کنترل می‌شود. اما در برخی مواقع، با توجه به بارش‌های بالادست حوضه آبریز شمالی استان، سدها سرریز می‌شوند؛ بدین‌ترتیب آب‌های کنترل‌نشده‌ای به‌سمت سیستان روانه و آب‌های سیلابی به‌صورت مقطعی وارد استان می‌شود که افزایش رطوبت در این بخش را در پی دارد. البته نزول بارش‌ها نیز مزید بر علت‌اند.



شکل ۸. میزان همبستگی میان VHI و TSDI

## ۳-۳- پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارش-

## تبخیر و تعرق استاندارد شده

می‌توان گفت یکی از محدودیت‌های SPI در نظر نگرفتن بیلان آب بر اساس میزان تبخیر و تعرق است اما SPEI، بیلان آب را طی محاسبات خود در نظر گرفته می‌گیرد. از دیگر سو، تمرکز TSDI و VHI نیز بر رطوبت خاک و گیاه است به همین دلیل، در این تحقیق از SPEI برای پایش خشکسالی هواشناسی و اعتبارسنجی شاخص‌های مورد مطالعه، استفاده شد. در این راستا، داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان (زاهدان، ایرانشهر، چابهار، سراوان، خاش، زابل) که دارای آمار بلندمدت (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸) هستند، جمع آوری گردید و SPEI بلندمدت محاسبه شد برای تطابق با دوره زمانی شاخص‌های مورد مطالعه این تحقیق، دوره شانزده ساله، از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ از نمودار اصلی SPEI جدا شد. (شکل ۹).

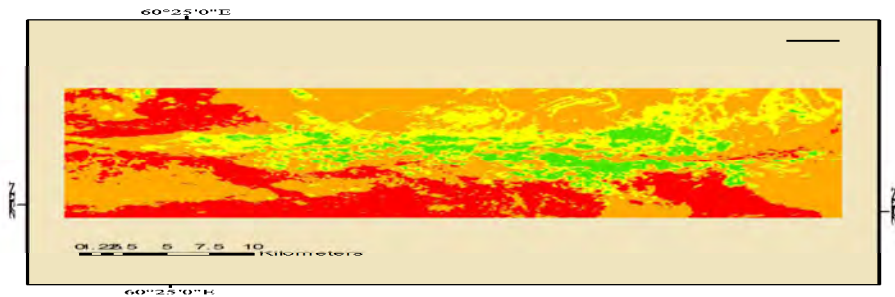
با هدف درک و تفسیر بهتر نتایج و ارتباط بین خروجی‌ها، پهنابودن استان و طولانی‌نشدن مطلب، یک منطقه، مثلاً حوضه آبریز ایرانشهر از استان جدا شد. پس از کاسته شدن وسعت منطقه، به علت قدرت تفکیک مکانی متوسط تصاویر مادیس، VHI بار دیگر از طریق تصاویر لندست ۸ در منطقه ایرانشهر محاسبه شد و برای نمونه، خروجی VHI در آوریل ۲۰۱۵ و

خشکسالی هیدرولوژیکی همان حوضه در جدول ۶ آمده است. خروجی VHI، به غیر از مزارع و موتورهای آب ایرانشهر که از آبیاری استفاده می‌کنند و با رنگ سبز مشخص شده‌اند، نشان می‌دهد این حوضه دچار خشکسالی ملایم تا شدید است. از نظر هیدرولوژیکی هم، از ۲۰۱۱ به بعد، حوضه ایرانشهر با شش دوره خشکسالی مواجه بوده که خشکسالی منتهی به پایان دوره، ۷۶ ماه متوالی طول کشیده است. بر اساس جدول ۶ و نمودار SPEI ایرانشهر در شکل ۹، هر سه نوع خشکسالی مورد اشاره نتایج خروجی‌های یکدیگر را تأیید می‌کنند.

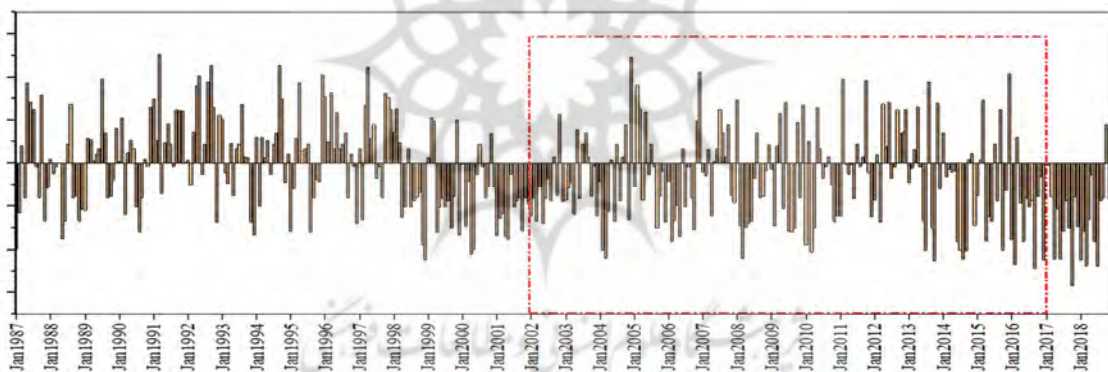
مطابق نمونه‌ای که در سطرهای پیشین مطرح شد و نیز تصاویر و جدول‌های این تحقیق، کل استان با هر سه نوع خشکسالی روبه‌روست و خروجی‌های شاخص‌های اشاره شده، در دوره‌های منتهی به آخر دوره مطالعاتی، نمایانگر خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی و هیدرولوژیکی و نیز افزایش شدت آن در محدوده بسیار خشک و استثنایی است. برای تأیید این مطلب، می‌توان گفت که بسیاری از مطالعات انجام شده در سطح استان سیستان و بلوچستان به وجود خشکسالی‌های شدید اذعان کردند (Kahkhakohan et al., 2019; Khosravi, 2009; Piri & Ansari, 2013; Zare-Abianeh et al., 2015).

جدول ۶. مشخصات خشکسالی هیدرولوژی حوضه آبریز ایرانشهر- بمپور

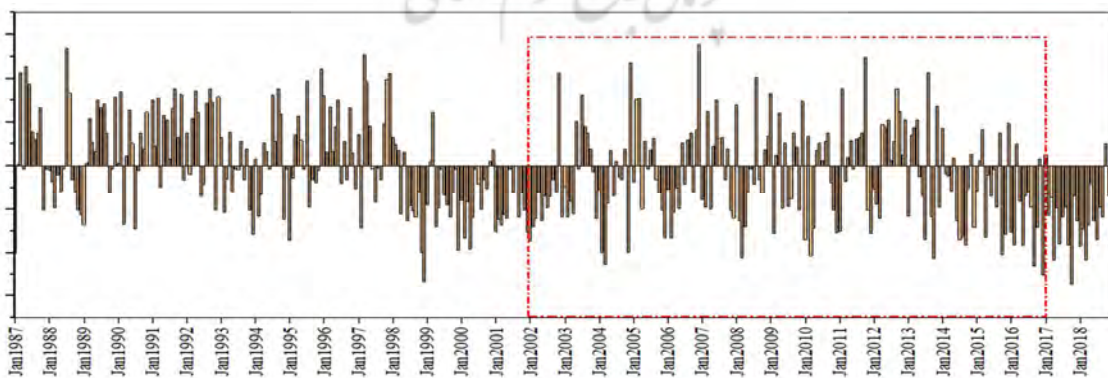
| مساحت (km) | تعداد دوره‌های خشکسالی طولانی‌تر از چهار ماه | مدت زمانی هر دوره | هم‌زمانی با خشکسالی هواشناسی | دوره (ماه) | میانگین کمبودها km <sup>3</sup> | مجموع شدت خشکسالی (Total Severity) (km <sup>3</sup> : months) |
|------------|----------------------------------------------|-------------------|------------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| نام حوضه   |                                              |                   |                              |            |                                 |                                                               |
| ۱۰۰۵۳/۹۸   |                                              | مارس ۲۰۱۱         |                              |            |                                 |                                                               |
| ایرانشهر   | ۶                                            | تا جون ۲۰۱۷       | *                            | ۷۶         | -۵/۸۶                           | -۴۴۵/۰۶                                                       |
| - بمپور    |                                              |                   |                              |            |                                 |                                                               |



در ادامه، خروجی SPEI در ایستگاه‌های سینوپتیک استان مورد مطالعه، به صورت نمودار، به نمایش گذاشته شده است.

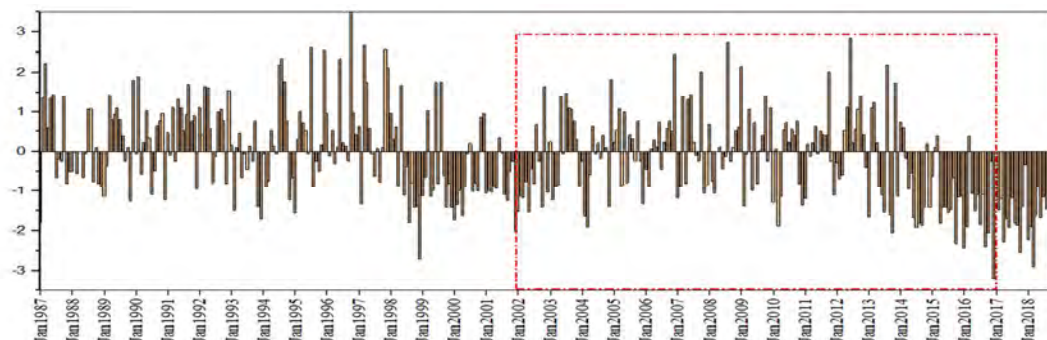


زاهدان

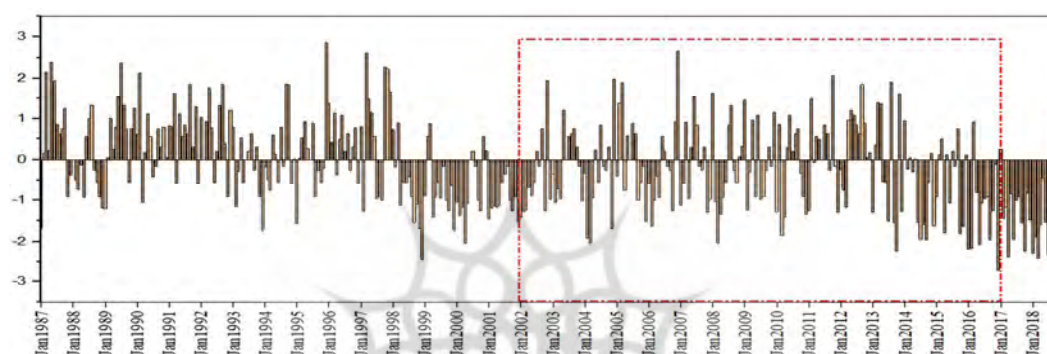


ایرانشهر

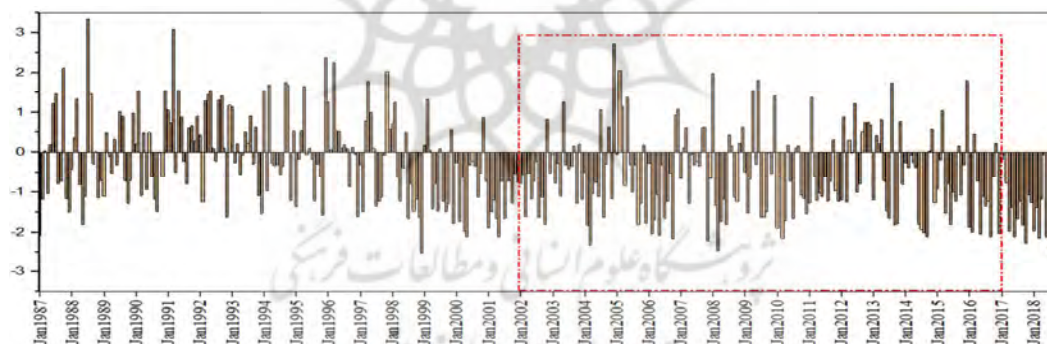
شکل ۹. میزان SPEI در ایستگاه‌های سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان



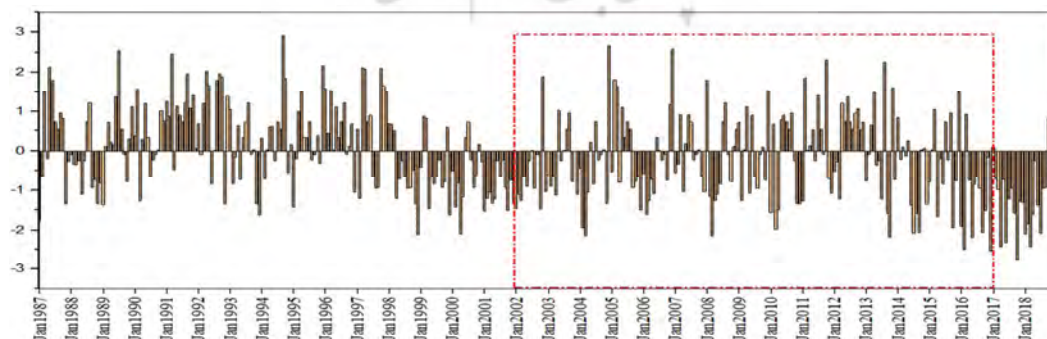
چابهار



سراوان



زابل



خاش

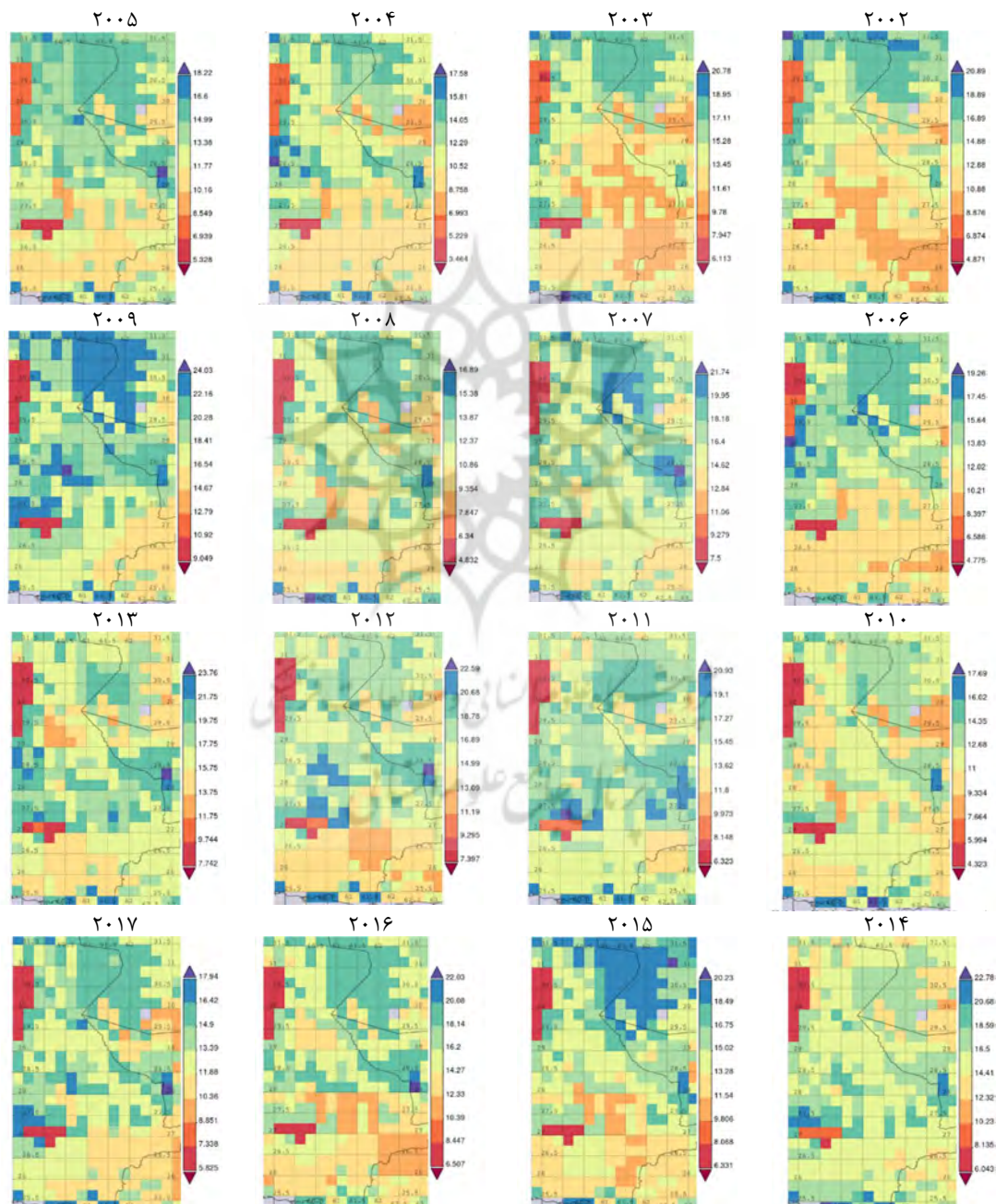
ادامه شکل ۹

## ۳-۴- پایش با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده

## زمین در پوشش جهانی GLDAS

پس از تهیه نقشه‌های VHI، TSDI و SPEI، برای اعتبارسنجی کامل‌تر، از داده‌های مدل جهانی رطوبت خاک عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری GLDAS که برای ریشه گیاهان اهمیت بسیاری دارد، استفاده شد (شکل ۱۰).

رنگ قرمز، طبق راهنمای سمت راست تصویر، از کم (قرمز) به زیاد (آبی)، رطوبت خاک را برحسب واحد کیلوگرم بر مترمکعب نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها، همانند نقشه‌های VHI، رطوبت خاک در بخش‌های جنوبی و مرکزی کمتر از شمال استان است. برای نمونه، سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در شکل‌های ۴ و ۱۰ کاملاً با هم تطابق دارند.



شکل ۱۰. میزان رطوبت خاک (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) در ماه آوریل، از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳

## ۴- نتیجه‌گیری

براساس گزارشی (UNESCO, 2022) از سوی GDACS (سیستم جهانی هشدار و هماهنگی بلایای طبیعی)، ایران در کنار کشورهای همسایه در سطح نارنجی قرار گرفته است. میزان بارندگی در استان خراسان جنوبی، در قیاس با میانگین بلندمدت، نزدیک به ۵۰ درصد و در جنوب‌شرق استان سیستان و بلوچستان، تا ۸۰٪ کاهش داشته است. خشکسالی‌های مداوم، در این بخش از جهان، لزوم فراتر رفتن از راه‌وروش‌های اضطراری و تمرکز بیشتر بر آمادگی، پیش‌بینی و برنامه‌ریزی پیشرفته برای کاهش خشکسالی را ایجاب می‌کند و باید، با شناسایی و به‌کارگیری فناوری‌های پایدار مبتنی بر جامعه و مدیریت جامعه، برای کاهش خشکسالی و مدیریت آب و خاک اقداماتی انجام داد. این تحقیق با هدف پایش سه نوع خشکسالی انجام شده است. انتخاب ماه آوریل به‌علت سبزی‌نگی بیشتر و صاف‌بودن غالب آسمان، به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها در خروجی نقشه‌های شاخص‌های پایش خشکسالی بود و انتخاب دوره زمانی، از آوریل ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۷، در بخش پایش خشکسالی هیدرولوژیکی به‌علت آغاز به کار این ماهواره از ۲۰۰۲ بوده است.

از لحاظ جغرافیایی، نقشه‌های خشکسالی VHI نشان داد استان سیستان و بلوچستان، در تمامی سال‌ها، با خشکسالی متوسط و ملایم روبه‌رو بوده و در سال‌های آخر دوره مطالعاتی، بر شدت خشکسالی‌ها افزوده شده است. به‌منظور پایش خشکسالی هیدرولوژیکی، از محصول ماهواره‌ای گریس استفاده شده است که تغییر در مقدار آب زمینی را اندازه‌گیری می‌کند. این کار اقدام مهمی برای درک جامع از خشکسالی هیدرولوژیکی در استان مورد مطالعه شمرده می‌شود. نتایج مطالعه TSDI مفهوم کمی خشکسالی را پوشش می‌دهد. محاسبه این شاخص با هدف پایش خشکسالی هیدرولوژیکی تمامی حوضه‌های آبخیز درجه ۳ (پنجاه حوضه) انجام شد. فرایند پایش خشکی، در

گام نخست، کسری خشکسالی به‌صورت ماه‌هایی با TWSA منفی تعریف شد. میزان افزایش کسری خشکسالی، از جنوب به شمال استان مورد مطالعه، در نتایج این پژوهش به‌وضوح مشخص است. تمامی حوضه‌ها، تقریباً از ۲۰۱۱، با کسری‌های بزرگی مواجه بودند. این مطالعه، از طریق برآورد کسری و کاهش ذخیره کلی آب زمینی در ماه آوریل، نشان داد تمامی حوضه‌ها در سال‌های منتهی به پایان دوره مطالعاتی، شاهد کمبود ذخیره آب، آن هم در محدوده خطرناک و استثنایی‌اند.

این مطالعه، با ارائه شواهدی از کمبود آب و وقوع خشکسالی‌های استثنایی و بحرانی هیدرولوژیکی در منطقه، می‌تواند ابزار و زنگ خطری برای توجه مسئولان باشد تا مذاکراتی در زمینه حقایق رودخانه فرامرزی هیرمند، جلوگیری از استفاده بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و جایگزینی کشت‌های با نیاز آبی کمتر انجام شود. در تأیید دو شاخص یادشده، داده‌های شبکه‌بندی‌شده جهانی رطوبت خاک و SPEI برگرفته از آمار بارش ایستگاه‌های سینپوتیک منطقه نیز بر مطالب بیان‌شده صحت گذاشتند و نتایج تحقیق را تأیید کردند.

## ۵- تشکر و قدردانی

این مقاله از رساله دوره دکتری مصوب و دفاع‌شده در دانشگاه یزد استخراج شده است و نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه‌شان را از «صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوری‌ان کشور» (INSF) که با حمایت مالی خود باعث ارتقای کیفی این پژوهش شده است، اعلام کنند.

## ۶- منابع

Agboma, C., Yirdaw, S., & Snelgrove, K. (2009). Intercomparison of the total storage deficit index (TSDI) over two Canadian Prairie catchments. *Journal of hydrology*, 374(3-4), 351-359. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.034>

- Ahmadi\_baseri, N., Sabziparvar, A., & Arboledas, M. K. A. (2020). Assessment of the Performance of the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) in Estimating Daily Surface Solar Radiation in Iran. *Water and soil magazine*, 34(2), 501-513. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82848>
- Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of arid environments*, 63(3), 596-614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>
- Bajgiran, P. R., Darvishsefat, A. A., Khalili, A., & Makhdoum, M. F. (2008). Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran. *Journal of arid environments*, 72(6), 1086-1096. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.12.004>
- BAJGIRAN, P. R., Shimizu, Y., Hosoi, F., & OMASA, K. (2009). MODIS vegetation and water indices for drought assessment in semi-arid ecosystems of Iran. *Journal of Agricultural Meteorology*, 65(4), 349-355. <https://doi.org/10.2480/agrmet.65.4.4>
- Cao, Nan, Z., & Cheng, G., 2015, "GRACE Gravity Satellite Observations of Terrestrial Water Storage Changes for Drought Characterization in the AridLand of Northwestern China", *Remote Sensing*, 7(1), 1021–1047. <https://doi.org/10.3390/rs12030530>
- Chen, J., Wilson, C., Tapley, B., Longuevergne, L., Yang, Z., & Scanlon, B. (2010). Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D22). <https://doi.org/10.1029/2010JD014689>
- Faraji, Z., Kaviani, A., & Shakiba, A. (2017). Evaluation of Evapotranspiration, Precipitation and Air Temperature from Global Land Data Assimilation System (GLDAS) by Lysimeter Data in Qazvin. *Journal of water and soil protection research*, 24(3), 283-297. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11535.2630>
- Han, Y., Li, Z., Huang, C., Zhou, Y., Zong, S., Hao, T., Niu, H., & Yao, H. (2020). Monitoring droughts in the Greater Changbai Mountains using multiple remote sensing-based drought indices. *Remote Sensing*, 12(3), 530. <https://doi.org/10.3390/rs12030530>
- Kahkhakohan, M. S., Fardoie, A. R., Mousavi, S. H., & Vali, A. (2019). Assessment of drought dynamics in Sistan and Baluchestan province using MODIS satellite data (2000-2015).
- Khosravi, M. (2009). The environmental effects of the interaction of Hirmand river fluctuations with the 120-day winds of Sistan. *Publication: Geographical Research*, 19-48. [https://doi.org/https://www.iwrr.ir/article\\_15984.html](https://doi.org/https://www.iwrr.ir/article_15984.html)
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Liu, W. T., Massambani, O., & Nobre, C. A. (1994). Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of climatology*, 14(3), 343-354. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140307>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of hydrology*, 386(1-4), 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>
- Mahmoudi, P., Shirazi, S. A., Firoozi, F., Jahanshahi, S. M. A., & Mazhar, N. (2020). Detection of land cover changes in Baluchistan (shared between Iran, Pakistan, and Afghanistan) using the MODIS Land Cover Product. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06284-9>
- Malo, A. R., & Nicholson, S. E. (1990). A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of arid environments*, 19(1), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30825-5](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30825-5)

- Miri, M., Azizi, G., Mohammadi, H., & Pourhashemi, M. (2018). Introduction and Evaluation of Global Model of Land Data Assimilation. *Sepehr scientific-research quarterly magazine of geographical information*, 26(104), 5-17. <https://www.sid.ir/paper/253233/fa>
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(7), 971-985. <https://doi.org/10.1002/joc.1264>
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and forest meteorology*, 133(1-4), 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>
- Nasr-Azadegan, A., Shams, S., & Fardl, H. K. (2014). *Investigating changes in soil moisture and precipitation and their impact on dust production in Mesopotamia between 2001 and 2014*. The third regional conference on climate change and global warming, <https://civilica.com/doc/732049>
- Niazi, Y., Talebi, A., & Doust, M. H. M. M. V. (2018). Agricultural drought monitoring and analysis using NOAA-AVHRR satellite products. *Geographic information (sephar)*, 107(27), 179-192. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.33574>
- Pakdel\_Khosmakhi, H., Tizrou, A. T., Maarofi, S., & Dost, M. V. (2014). *Evaluation of precipitation and runoff product from GLDAS global land data assimilation system* The second national conference on engineering and management of agriculture, environment and sustainable natural resources, <https://civilica.com/doc/357788>
- Parry, S., Wilby, R. L., Prudhomme, C., & Wood, P. J. (2016). A systematic assessment of drought termination in the United Kingdom. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(10), 4265-4281. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4265-2016>
- Piri, H., & Ansari, H. (2013). Studying the drought of the Sistan plain and its impact on Hamon International Wetland. *Wetland ecobiology*, 15, 74-63. <https://www.sid.ir/paper/174970/fa>
- Piri, H., Rahdari, V., & Maleki, S. (2013). Study and compare performance of four meteorological drought index in the risk management droughts in Sistan and Baluchestan province. *Irrigation and Water Engineering*, 3(3), 96-114.
- Ramillien, G., Cazenave, A., & Brunau, O. (2004). Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry. *Geophysical Journal International*, 158(3), 813-826. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02328.x>
- Swenson, S., & Wahr, J. (2002). Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9), ETG 3-1-ETG 3-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2001JB000576>
- Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Rodell, M., Chen, J., & Wilson, C. R. (2008). Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resources Research*, 44(2). <https://doi.org/10.1029/2006WR005779>
- Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2014). A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1537-1545. <https://doi.org/10.1002/2014GL059323>
- UNESCO. (2022). Integrated drought risk management, DRM: national framework for Iran, an analysis report (Tech. Rep.). *Situation Report* <https://reliefweb.int/report/iran-islamic-republic/iran-droughts-operation-update-report-n-1-dref-n-mdrir005>
- Vicente-Serrano, S. M., Pons-Fernández, X., & Cuadrat-Prats, J. (2004). Mapping soil

- moisture in the central Ebro river valley (northeast Spain) with Landsat and NOAA satellite imagery: a comparison with meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), 4325-4350. <https://doi.org/10.1080/01431160410001712990>
- Wanders, N., van Lanen, H. A., & van Loon, A. F. (2010). *Indicators for drought characterization on a global scale*.
- Yirdaw, S. Z., Snelgrove, K. R., & Agboma, C. O. (2008). GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie. *Journal of hydrology*, 356(1-2), 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.004>
- Zare-Abianeh, H., Sabzi-Parvar, A. A., Maroufi, S., Qiami, F., & Kazemi, S. S. M.-M. A. (2015). Meteorological drought analysis and monitoring in Sistan and Baluchistan region. *Environmental Science and Technology Quarterly*, 3(15), 49-61. <https://doi.org/10.22034/GAHR.2020.109953>
- Zhang, D., Zhang, Q., Werner, A. D., & Liu, X. (2016). GRACE-based hydrological drought evaluation of the Yangtze River Basin, China. *Journal of Hydrometeorology*, 17(3), 811-828. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0084.1>

