

# ارائه شاخصی کارا مبتنی بر تلفیق داده‌های ثقل سنجی ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی برای پایش خشکسالی در کشور ایران

سعید فرزانه<sup>۱</sup>

رضا شاه‌حسینی<sup>۲</sup>

ایمان کردپور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۰۶

\*\*\*\*\*

## چکیده

در سال‌های اخیر کشور ایران با خشکسالی‌های متعددی مواجه بوده است، لذا برآورد دقیق میزان خشکسالی به منظور پیش‌بینی و مدیریت بهینه منابع طبیعی امری اجتناب‌ناپذیر است. بدین منظور روش‌های مرسوم برآورد خشکسالی که مبتنی بر مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی هستند، به کار گرفته می‌شوند. یکی از مشکلات اصلی این روش‌ها در نظر نگرفتن تغییر شرایط اقلیمی و آب و هوایی در مناطق بزرگ است و معمولاً این روش‌ها در مناطق محلی جواب مناسبی به دست می‌دهند. به منظور بهبود دقت برآورد میزان خشکسالی در سطوح وسیع، استفاده تلفیقی از داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و ایستگاه‌های زمینی ضرورت خواهد داشت. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های ثقل سنجی ماهواره‌ای و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ابزاری مفید برای پایش مکانی و زمانی خشکسالی در مناطق وسیع، مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این مطالعه استفاده از داده‌های ماهواره بازتابی گرانش و آب و هوا (GRACE) و محصول شاخص پوشش گیاهی سنجنده MODIS و مشاهدات زمینی ایستگاه‌های سینوپتیک برای ارزیابی خشکسالی در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ در کل کشور ایران است. بدین منظور در مقاله حاضر شاخصی کارا با عنوان شاخص خشکسالی داده‌های ادغام‌شده (MDI) مبتنی بر تصاویر شاخص پوشش گیاهی یکنواخت شده (NDVI) حاصل از سنجنده مادیس، داده‌های محتوی آب زمین (TWS) استخراج شده از ماهواره GRACE و داده‌های بارندگی استخراج شده از ایستگاه‌های سینوپتیک ارائه شده است. نتایج به دست آمده همبستگی ۷۵٪ با شاخص استاندارد جهانی شدت میزان خشکسالی پالمر (PDSI) را نشان می‌دهد. نتایج شاخص MDI و PDSI روند خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در ایران را به خوبی نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، ایران، بارندگی، MODIS، GRACE، MDI

\*\*\*\*\*

۱- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران farzaneh@ut.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) rshahosseini@ut.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران iman.kurdpour@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

لانگ و همکاران در راستای بررسی خشکسالی سال ۲۰۱۱ در منطقه تگزاس نشان دادند که تغییرات ذخیره آب زمینی ( $TWS^2$ ) نسبت به تغییرات رطوبت خاک و آب‌های زیر زمینی دقت بالاتری دارد.

در این تحقیق به بررسی خشکسالی منطقه تگزاس مبتنی بر مشاهدات GRACE TWS پرداخته شده است و نتایج به دست آمده نشان‌دهنده حصول دقت بالاتر در مشاهدات GRACE TWS است (Long et al, 2003, 3295-3401). یرداو و همکاران در منطقه پراید نشان دادند که شاخص GRACE TWS شاخص قابل اطمینان برای مطالعات خشکسالی در این منطقه می‌باشد (Yirdaw et al, 2008). چن و همکاران نشان دادند که شاخص‌های GRACE TWS در شناسایی خشکسالی در حوضه رودخانه آمازون نسبت به تابستان پنج سال قبل در سال ۲۰۰۵ کاملاً دقیق ارائه شده است، به طوری که خشکسالی شدیدتری در این حوضه اتفاق افتاده و در مقایسه با مدل‌های هواشناسی از دقت زمانی و مکانی مناسب‌تری برخوردار بوده است (Chen et al, 2009).

لی و همکاران با بررسی و مقایسه داده‌های GRACE TWS و شاخص تفاضلی پوشش گیاهی یکنواخت شده ( $NDVI^3$ ) نشان دادند که همبستگی بالایی بین این دو مجموعه داده وجود دارد و هر دو توانایی برآورد خشکسالی را دارند، با این تفاوت که GRACE TWS خشکسالی‌های طولانی‌تر (هیدرولوژی) و  $NDVI$  خشکسالی‌های کوتاه‌تری (در مناطق کشاورزی) را شناسایی می‌کند (Lie et al, 2012). کاو و همکاران در سال ۲۰۱۵ در منطقه شمال شرقی چین با استفاده از شاخص کل کسر ذخیره‌سازی ( $TSDI^4$ ) که به داده‌های ماهواره Grace، ماهواره آلتیمتری، داده‌های مدل هیدرولوژیکی سیستم جهانی تلفیق داده‌های زمین ( $GLDAS^5$ ) و داده‌های بارندگی نیاز دارد، نشان داد که در ماه می ۲۰۰۸ تا ماه دسامبر در این منطقه خشکسالی

خشکسالی یکی از گسترده‌ترین بلایای طبیعی است که از نظر خسارت، رتبه دوم را به خود اختصاص می‌دهد (McCandless, 2014). با توجه به پیچیدگی ارتباط پارامترهای چرخه آب و مشاهدات اتمسفری سطح زمین، پیش‌بینی یا مدل کردن خشکسالی از دقت لازم برخوردار نخواهد بود. با توجه به این که از بارزترین مشکلاتی که در پایش خشکسالی با آن سروکار داریم، نبود پوشش مکانی مناسب داده‌ها (به جهت این که داده‌های میدانی در هر منطقه وجود ندارد) و همین‌طور عدم وجود مقیاس زمانی مناسب (به طوری که در هر زمانی مشاهدات برای برآورد خشکسالی موجود نیست) می‌باشد، لذا امروزه با به روی کار آمدن ماهواره‌های سنجش‌ازدوری می‌توان برآورد بهتری از خشکسالی داشت، زیرا در مشاهدات ماهواره‌ای، از نظر مکانی با چالش‌های مشاهدات میدانی از جمله فقدان مقیاس مکانی مواجه نیستیم (McCandless, 2014).

با این وجود، این مشاهدات هم به‌تنهایی قادر به برآورد دقیق از رویداد طبیعی در زمینه خشکسالی نمی‌باشند. به همین دلیل در سال‌های اخیر برای برآورد بهتر مسائل هیدرولوژی از تلفیق مشاهدات زمینی و مشاهدات ماهواره‌ای بهره برده‌اند (Doell et al, 2014, 5689-5725, Robison and Clark, 2019, 1021-1045).

منشاء خشکسالی می‌تواند از ناحیه کمبود منابع آب در بسیاری از منابع مختلف از قبیل آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک و غیره باشد. در این راستا اندازه‌گیری هر یک از این مؤلفه‌ها به‌طور مستقل و تجمیع و یکپارچه‌سازی آن‌ها در قالب اندازه‌گیری حجم کل ذخیره شده آب در بازه زمانی مداوم و مستمر توأم با صحت و دقت کافی، امری دشوار است. به همین دلیل مقیاس‌های اندازه‌گیری با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط ماهواره‌های بازیابی گرانش و آب و هوا ( $GRACE^1$ ) اهمیت پیدا می‌کند (Yirdaw et al, 2008).

2- Terrestrial Water Storage

3- Normalized Difference Vegetation Index

4- Total Storage Deficit Index

5- Global Land Data Assimilation System

1- Gravity Recovery and Climate Experiment

ایران و ارائه شاخص خشکسالی ادغام شده (MDI<sup>۱</sup>) استفاده شده است. بدین منظور از مشاهدات ماهواره GRACE و سنجنده MODIS و همین‌طور از مشاهدات زمینی ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شده است، که شاخص‌های استخراج شده از هر کدام به ترتیب GRACE TWS، NDVI و داده‌های بارندگی است. دلیل استفاده از این سه دسته مشاهده، همبستگی هر کدام با چرخه هیدرولوژی است، به‌طوری که هرکدام از مشاهدات نشان‌دهنده خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی است. خشکسالی هواشناسی، می‌تواند با انحرافات مطلق بارندگی از مقادیر متوسط در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه مرتبط شوند. خشکسالی کشاورزی ناشی از تعاملاتی است که بین فعالیت‌های کشاورزی (تقاضا و رویدادهای طبیعی عرضه) اتفاق می‌افتند که در نتیجه آن، آب موجود در گیاه کافی نخواهد بود و در آخر خشکسالی هیدرولوژیکی را دوره‌ای در نظر می‌گیرند که طی آن جریان‌ات آب برای تأمین مصارف مشخص شده در یک سیستم مدیریت آب ناکافی باشد (Swain, 2017, 5505-5507, Wang, 2015, 3760-3765). در این تحقیق، برای پایش خشکسالی در ایران در یک بازه زمانی ۱۴ ساله، از ادغام داده‌ها با روش MDI استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی دقت نقشه‌های خشکسالی به‌دست آمده، از شاخص جهانی پالمر استفاده شده و در نهایت به بررسی مزایای روش ارائه شده نسبت به شاخص‌های رایج خشکسالی پرداخته شده است.

## ۲- روش شناسی

پیچیدگی زمانی و مکانی خشکسالی نیاز به یک شاخص جهانی جدید بر مبنای مشاهدات زمینی و ماهواره‌ای دارد. با توجه به داده‌های استفاده شده در شاخص MDI، نمی‌توان انتظار یک شاخص جهانی را داشته باشیم. با این حال، برای رژیم‌های زیست محیطی و آب و هوایی مشابه، این شاخص هنوز هم عملکرد قابل قبولی دارد، به‌طوری که این شاخص

شدیدی اتفاق افتاده است و همین‌طور همبستگی ۸۶٪ را با شاخص خشکسالی پالمر نشان داد (Cao et al, 2015, 179-183). توماس و همکاران در سال ۲۰۱۷ شاخص جدیدی با نام شاخص خشکسالی آب‌های زیرزمینی GRACE (GGDI<sup>۲</sup>) معرفی کردند. این شاخص در منطقه کالیفرنیا ارزیابی شده است. در داده‌های استفاده شده در این تحقیق می‌توان به داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های مدل هیدرولوژیکی GLDAS اشاره کرد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص جدید معرفی شده نسبت به شاخص خشکسالی پالمر، از دقت بالاتری برخوردار بوده است (Thomas et al, 2017, 386-391).

عراقی‌نژاد و همکاران در حوضه مرکزی ایران با استفاده از شاخص کل کسر ذخیره‌سازی اصلاح شده (MTSDI<sup>۳</sup>) خشکسالی را ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از داده سطح ۳ ماهواره GRACE، شاخص MTSDI را برآورد کردند. نتایج این تحقیق خشکسالی در حوضه مرکزی ایران در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۱، ۲۰۱۰-۲۰۱۱، ۲۰۱۰-۲۰۱۳ را نشان داد (Hosseini-Moghari, 2019, 465-475).

سلیمانی و همکاران به بررسی خشکسالی در استان کرمان با استفاده از شاخص بارش استاندارد در بازه زمانی ۲۰۰۷-۱۹۸۶ پرداختند. در این بررسی شدیدترین خشکسالی در سال ۲۰۰۴ را در استان کرمان شناسایی کردند (سلیمانی ساردو، ۱۳۸۷).

هاشمی و عطایی خشکسالی را به‌صورت موردی در استان چهارمحال و بختیاری در بازه زمانی ۲۰۰۸-۱۹۷۹ بررسی کردند. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۸، تمام پهنه‌های استان شرایط خشکی را تجربه کرده است (هاشمی و عطایی، ۱۳۹۰). در این تحقیق خشکسالی ایران با استفاده همزمان از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین از تلفیق داده‌های مختلف ماهواره‌ای و زمینی به‌صورت همزمان برای کل

1- GRACE Groundwater Drought Index

2- Modified Total Storage Deficit Index

3- Merged Dataset Drought Index

## ۲-۱- محاسبه شاخص MDI

قبل از هرگونه تحلیلی بر روی داده‌ها، باید آن‌ها را استاندارد کرد. به‌خصوص زمانی که داده‌ها چندبعدی باشند. استفاده از داده‌های استاندارد نشده ممکن است روی نتایج حاصل از تحلیل‌ها اثر نامناسبی داشته باشد. نرمال‌سازی داده‌ها کمک می‌کند که اهمیت آن‌ها به واحد اندازه‌گیری‌شان بستگی نداشته باشد. در نتیجه در مواردی مانند تحلیل داده‌های چندمتغیره از داده‌های استاندارد شده استفاده می‌شود. گفتنی است استانداردسازی برای داده‌های کمی و کیفی قابل اجرا است. در این مقاله به بررسی روش استانداردسازی Z برای داده‌های کمی می‌پردازیم. در این بین ما با استفاده از روش استانداردسازی نمره استاندارد Z داده‌های بارندگی، GRACE TWS و MODIS NDVI را استاندارد می‌کنیم به این ترتیب اقدامات اولیه برای محاسبه شاخص MDI براساس روش استانداردسازی نمره استاندارد Z فراهم گردید.

شاخص خشکسالی MDI به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

(McCandless, 2014, Sinha, 2018, 383-388)

$$Z_{TWS} = \frac{TWS(k) - \overline{TWS}}{\sigma_{TWS}} \quad (1)$$

$$Z_{NDVI} = \frac{NDVI(k) - \overline{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} \quad (2)$$

$$Z_{Precipitation} = \frac{Precipitation(k) - \overline{Precipitation}}{\sigma_{Precipitation}} \quad (3)$$

$$Z_C = Z_{TWS} + Z_{NDVI} + Z_{Precipitation} \quad (4)$$

$$MDI = \frac{Z_C(k) + \overline{Z_C}}{\sigma_{Z_C}} \quad (5)$$

برای محاسبه ماهیانه شاخص MDI، یک ماه از سال

به‌عنوان مثال ماه می انتخاب می‌شود:

$Z_{TWS}$  نشان‌دهنده استاندارد شده TWS در ماه می؛

$Z_{Precipitation}$  نشان‌دهنده استاندارد شده NDVI در ماه می؛

نشان‌دهنده استاندارد شده Precipitation در ماه می است.

در کشور آمریکا (ایالت تگزاس) مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه داده‌هایی که برای این مطالعه انتخاب شده‌اند، مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت دارند که باید قبل از محاسبه شاخص هم‌مقیاس شوند.

داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های سنجنده MODIS به‌صورت ماهیانه دانلود شده است، اما داده‌های بارش به‌صورت روزانه بود که با میانگین‌گیری در طول یک ماه به داده‌های ماهیانه تبدیل گردید. در مقیاس مکانی داده‌های ماهواره‌های GRACE و سنجنده MODIS به‌صورت یک درجه، اما داده‌های بارش که از ایستگاه‌های سینوپتیک استخراج شده‌اند به‌صورت نقطه‌ای بوده که با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله وزن‌دار (IDW) محاسبه و شبکه یک درجه تولید گردید. در نگاره (۱) چرخه کار الگوریتم پیشنهادی جهت پایش خشکسالی در ایران ارائه شده است.



نگاره ۱: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

کشور در حدود ۲۵۰ میلی‌متر و حداکثر بارش در دامنه‌های البرز و زاگرس به ترتیب بیش از ۱۶۰۰ و ۴۸۰ میلی‌متر است. در دشت‌های مرکزی و شرقی، دامنه بارندگی بسته به موقعیت به کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر نیز می‌رسد. با توجه به میانگین بارش در سطح کشور ایران، در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار می‌گیرد.

از نظر خصوصیات زمین‌شناسی، سرزمین ایران فلات نسبتاً مرتفعی است که در بخش میانی کمربند چین خورده آلپ-همالیا قرار دارد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل سه نوع داده به ترتیب داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی، داده‌های ماهواره ثقل‌سنجی GRACE و داده‌های سنجنده MODIS می‌باشد. این داده‌ها به‌منظور شناسایی خشکسالی در سری زمانی ۱۴ سال انتخاب و دانلود شدند.

جدول ۱: کلاس بندی خشکسالی براساس مرجع (کاندلس، ۲۰۱۴)

مقادیر شاخص MDI	طبقه‌بندی	درجه خشکسالی
۰ تا ۰/۴۵-	-	نرمال
۰/۴۵- تا ۰/۹۰-	$D_1$	خشکسالی خفیف
۰/۹۰- تا ۱/۳۵-	$D_2$	خشکسالی متوسط
۱/۳۵- تا ۱/۸۰-	$D_3$	خشکسالی شدید
۱/۸۰- تا ۲/۲۰-	$D_4$	خشکسالی حاد
۲/۲۰- تا کمتر	$D_5$	خشکسالی استثنایی

### ۳-۱- داده GRACE\_TWS

داده‌های ماهواره Grace شامل سه سطح مختلف از داده می‌باشد. سطح صفر دربرگیرنده داده‌های خام اخذ شده توسط ماهواره است که با پردازش‌های اولیه داده‌ها به سطح دو تبدیل می‌شوند. داده‌های سطح دو به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول ضرایب هارمونیک کروی میدان ثقل متوسط چندساله یا چندماهه زمین که بخش استاتیک

به ترتیب میانگین  $\overline{Z_c}$  و  $\overline{TWS}$ ،  $\overline{NDVI}$ ،  $\overline{Precipitation}$  بارندگی، TWS، NDVI و  $Z_c$  است.  $\sigma_{TWS}$  نشان‌دهنده انحراف معیار مشاهدات TWS در ماه می،  $\sigma_{NDVI}$  نشان‌دهنده انحراف معیار مشاهدات NDVI در ماه می؛  $\sigma_{Precipitation}$  نشان‌دهنده انحراف معیار مشاهدات Precipitation در ماه می است.  $Z_c$  نشان‌دهنده میانگین NDVI، Precipitation، TWS است. برای سایر ماه‌ها نیز می‌توان شاخص‌ها را به‌صورت بالا محاسبه کرد (McCandless, 2014).

محدوده تغییرات شاخص MDI در بازه [۳+ و ۳-] است، که مقادیر مثبت نشان از ترسالی (مازاد رطوبت)، مقادیر منفی (کمبود رطوبت) و مقدار صفر شرایط طبیعی منطقه را نشان می‌دهد. خشکسالی به‌عنوان یک دوره خشک طولانی مدت تعریف شده است. با استفاده از مقادیر شاخص MDI برای ۱۴ سال گذشته، یک سیستم طبقه‌بندی براساس شاخص خشکسالی MDI ارائه شده است.

### ۲-۲- طبقه‌بندی خشکسالی

برای مقایسه مقادیر شاخص MDI به‌صورت مکانی و زمانی، یک طرح طبقه‌بندی معرفی شده است. این طبقه‌بندی در (McCandless, 2014) معرفی شده و براساس شاخص‌های شدت خشکسالی پالمر و خشکسالی هیدرولوژی پالمر ارزیابی شده است. طبقه‌بندی شاخص MDI در جدول (۱) ارائه شده است.

### ۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه به مختصات ۲۵،۰۵ تا ۴۰،۳۸ عرض جغرافیایی و ۴۴،۰۵ تا ۶۳،۳ طول جغرافیایی محدود شده است و کشور ایران را در برمی‌گیرد. این کشور ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع وسعت دارد. ارتفاع متوسط ایران از سطح دریا حدود ۱۲۰۰ متر می‌باشد.

پست‌ترین نقطه داخلی کشور با ارتفاع ۵۶ متر در دشت لوت و بلندترین آن قله دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ در میان رشته‌کوه‌های البرز قرار دارد. به‌طور میانگین بارش سالانه

سال ۲۰۱۶ جمع‌آوری شدند. بانک داده‌های مورد استفاده شامل بارش، دما، رطوبت خاک و بخار آب است که از داده‌های بارندگی در طول ۱۴ سال استفاده شده است.

### ۳-۴- شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)

شاخص شدت خشکسالی پالم توسط پالم برای ارزیابی میزان تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در آمریکا توسعه یافته و به‌طور گسترده در سایر کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفت. اساس این شاخص مبتنی بر معادله تعادل آب و خاک می‌باشد و داده‌های ورودی مورد نیاز آن را بارندگی و دمای هوا در مقیاس زمانی ماهیانه تشکیل می‌دهد (Palmer, 1965).

این داده‌ها به‌صورت جهانی (۲/۵×۲/۵) درجه برای سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۳ تهیه شده و از طریق سایت ([www.esrl.noaa.gov/psd](http://www.esrl.noaa.gov/psd)) در دسترس هستند. جهت مطالعه چگونگی تولید شاخص شدت خشکسالی پالم به مرجع (Dia et al, 2011, 1323-1327, 2004) مراجعه شود. این شاخص برای صحت‌سنجی شاخص MDI ارائه شده و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۴- نتایج

#### ۴-۱- بررسی نتایج و خشکسالی‌ها

در این تحقیق شاخص خشکسالی MDI با استفاده از داده‌های TWS، NDVI، Precipitation در مقیاس مکانی ۱ درجه و مقیاس زمانی ماهیانه، برای ۱۶۸ ماه محاسبه شده است. در نگاره (۲) شاخص MDI جهانی به‌صورت ماهیانه نشان داده شده است که با استفاده از معادله (۵) به‌دست آمده‌اند. مقادیر منفی MDI نشان‌دهنده شرایط خشک‌تر از حد نرمال و مقادیر مثبت شرایط نسبتاً مرطوب را نشان می‌دهند. ابتدا عملکرد شاخص MDI در منطقه مرکزی و شمال‌غربی (نگاره ۳) بررسی خواهد شد. در نگاره (۳) مقدار شاخص MDI برای ماه ۶ میلادی از سال ۲۰۱۶-

میدان ثقل زمین را نشان می‌دهد و بخش دوم شامل ضرایب هارمونیک کروی ماهیانه میدان ثقل زمین که بخش دینامیک زمین را نشان می‌دهد. داده‌های سطح صفر شامل داده‌های خام و پردازش‌نشده دریافتی از ماهواره است. داده‌های سطح ۱ شامل داده‌های GPS و طول کالیبره و تصحیح‌شده بین دو ماهواره و تغییرات آن می‌باشد، که با فاصله زمانی حدود ۲ ماه و با اعمال تصحیحات در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. داده‌های سطح دو شامل تخمین‌هایی از ضرایب هارمونیک کروی ثقل زمین و پروفیل‌های تأخیر و حالت انکسار اتمسفری می‌باشد. در این مطالعه از ضرایب ماهیانه از آخرین به‌روزرسانی داده‌های ماهواره Grace یعنی Release\_05 در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۶ از مرکز مطالعاتی UTCSR استفاده شده است. این داده‌ها برای بازه ۱۵۲ ماه استخراج گردیده‌اند.

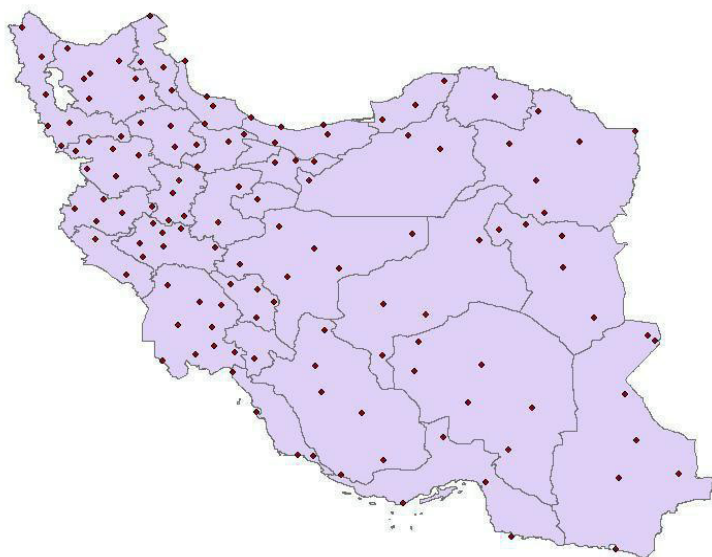
#### ۳-۲- داده MODIS\_NDVI

ماهواره‌های سنجنش‌ازدور، امواج الکترومغناطیس بازتابی از عوارض سطح زمین را اندازه‌گیری و امکان دسترسی به بسیاری از اطلاعات سطح زمین را فراهم می‌آورند. در این تحقیق، داده‌های سنجنش‌ازدوری مورد استفاده، شامل شاخص محصول NDVI سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره TERRA می‌باشد. بدین منظور از محصولات ماهیانه شاخص گیاهی تفاضلی یکنواخت شده در قالب فایل MOD13A3 با فرمت HDF و قدرت تفکیک مکانی یک درجه استفاده شده و در بازه زمانی آوریل ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۶ تهیه و پردازش گردیده است.

#### ۳-۳- داده‌های هواشناسی

داده‌های ایستگاه‌های زمینی برخلاف داده‌های ماهواره‌ای که از راه دور اندازه‌گیری می‌شوند، در سطح زمین توسط ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری می‌شوند. داده‌های مورد نیاز از گزارش‌های ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور برای ۱۳۵ ایستگاه سینوپتیک ایران از سال ۲۰۰۳ تا





نگاره ۲: محل ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی در ایران

آب دریاچه ارومیه شده است. نتایج خشکسالی شاخص MDI با شاخص خشکسالی بارش-تبخیر تعرق استاندارد در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ که برای کل ایران محاسبه شده است مطابقت بالایی دارد (اقتدارنژاد، ۱۳۹۶).

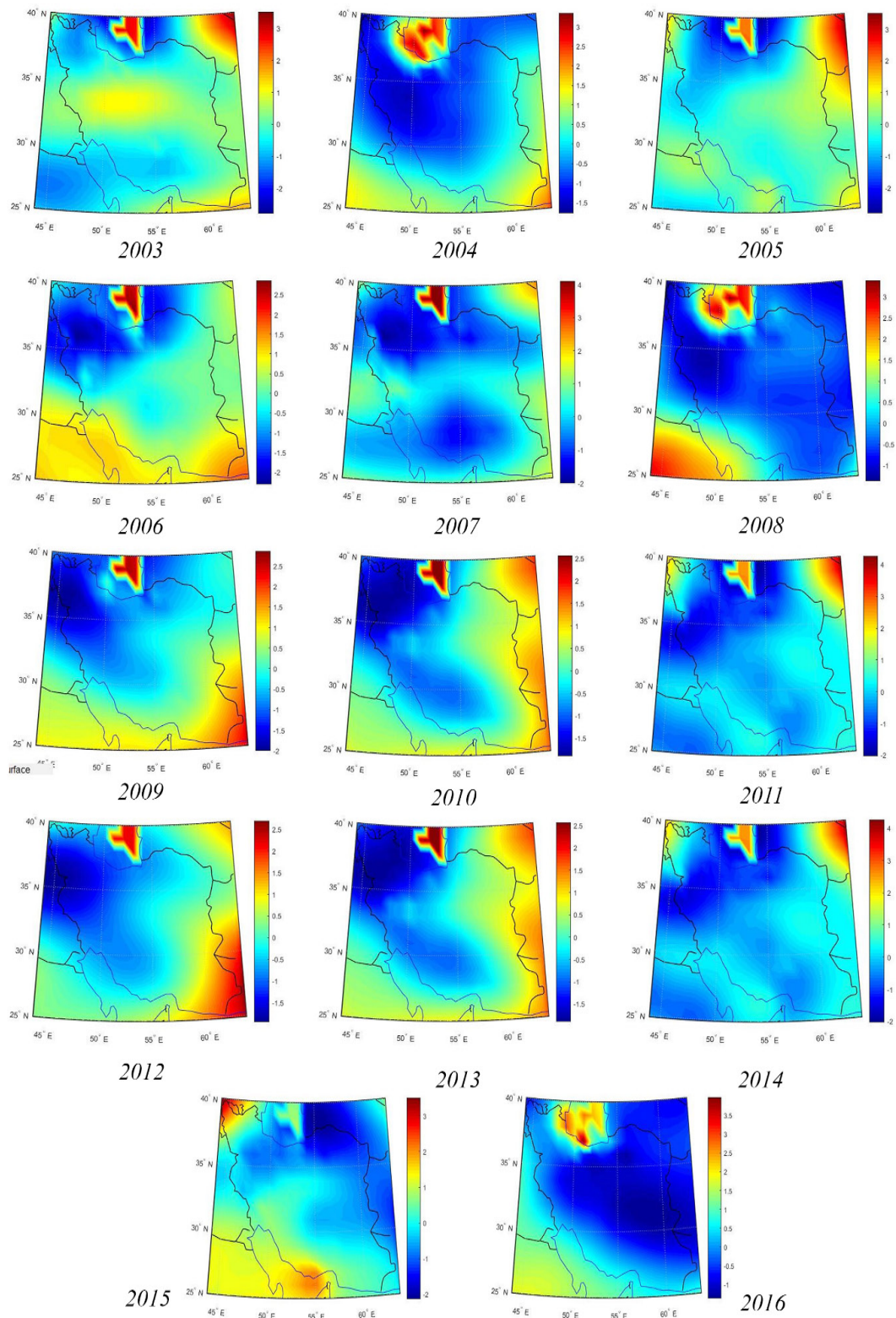
۴-۲-۱- ارزیابی مقایسه‌ای با شاخص‌های خشکسالی استاندارد موجود  
 ۴-۲-۱- مقایسه شاخص MDI با شاخص خشکسالی بارش استاندارد

تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) در استان‌های کرمان و فارس بررسی شده است که نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۴ در استان فارس و کرمان خشکسالی شدید اتفاق افتاده است.

۲۰۰۳ به صورت ماهیانه در کل ایران محاسبه شده است. خشکسالی به صورت متناوب در طول سری زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ ادامه پیدا می‌کند که در فصل تابستان (ماه ۶ میلادی) این خشکسالی شدیدتر می‌شود. بیشترین مقدار خشکسالی در مناطق مرکزی و مناطق شمال‌غربی اتفاق افتاده است. شدیدترین خشکسالی را می‌توان در سال ۲۰۰۸ در (نگاره ۳) مشاهده کرد. خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ در منطقه شمال‌غربی و مرکز ایران موجب کمبود آب ذخیره‌شده مخازن سدها شده است. درکنار خشکسالی، برداشت بی‌رویه آب در منطقه شمال‌غربی ایران باعث افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش سطح آب زیرزمینی شده که این امر موجب برداشت بی‌رویه از رودخانه‌ها و کانال‌های انتقال آب به دریاچه ارومیه و باعث کاهش تراز

جدول ۲: اطلاعات مشاهدات اولیه

مشاهدات	مقیاس مکانی	مقیاس زمانی	بازه زمانی	توضیحات
GRACE	۱ درجه	ماهیانه	۲۰۰۳-۲۰۱۶	<a href="ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/land_mass">ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/land_mass</a>
NDVI	۱ درجه	ماهیانه	۲۰۰۳-۲۰۱۶	<a href="https://earthdata.nasa.gov">https://earthdata.nasa.gov</a>
Precipitation	نقطه‌ای	روزانه	۲۰۰۳-۲۰۱۶	سازمان هواشناسی ایران
PDSI	۲/۵ درجه	ماهیانه	۲۰۰۳-۲۰۱۰	<a href="http://www.esrl.noaa.gov/psd">www.esrl.noaa.gov/psd</a>



نگاره ۳: نتایج ماهیانه شاخص خشکسالی MDI ( ماه ۶ ام هر سال )



حساسیت بالایی دارد که در نتیجه با توجه به استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، مادیس و ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی، انتظار همبستگی خوبی با شاخص MDI داریم. باید توجه داشته داشت که در منطقه ایران شاخص PDSI مقدار بزرگ‌تری از شاخص MDI دارد، هرچند هر دو روند خشکسالی را به خوبی نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال شدیدترین خشکسالی در دو دهه اخیر ایران در سال ۲۰۰۸ اتفاق افتاده است که شاخص MDI هم این خشکسالی را نشان می‌دهد. برآورد مقدار ضریب همبستگی بین شاخص MDI با شاخص PDSI ۷۵/۱۱٪ به‌دست آمده است. در فرمول‌بندی شاخص‌های خشکسالی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، محدودیت‌هایی وجود دارد، به‌طوری که در شاخص SPI براساس بارش محاسبه می‌شود. اما محاسبه PDSI شامل یک سری از پارامترهای تجربی هیدرولوژیکی آب است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

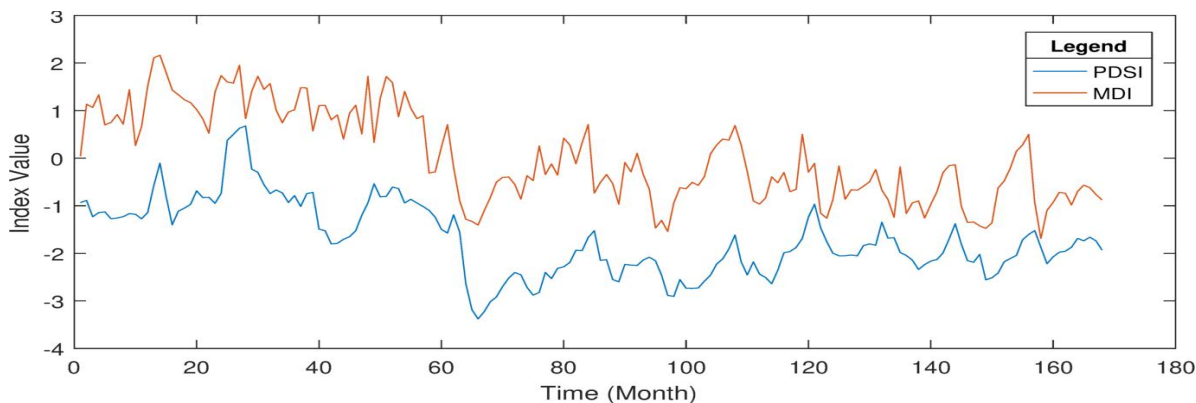
در این پژوهش از تلفیق داده‌های بارندگی، GRACE\_ TWS و NDVI، شاخص خشکسالی جدیدی ارائه شده است. هر یک از این داده‌ها به‌دلیل حساسیت بالایی که به خشکسالی نشان می‌دهند، انتخاب شده‌اند. مشاهدات GRACE\_TWS شامل منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی است که این مشاهدات به نظارت بر خشکسالی

پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی بارش استاندارد (SPI) در استان چهارمحال بختیاری در سال ۲۰۰۸ نشان‌دهنده وقوع خشکسالی شدید در این منطقه است که با توجه به نتایج ماهیانه شاخص MDI نشان از خشکسالی در این منطقه دارد (ماشمی، ۱۳۹۰). خشکسالی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS در مناطقی از استان اصفهان ارزیابی شده که نتایج نشان‌دهنده ترسالی است. نتایج شاخص خشکسالی MDI نشان‌دهنده مقادیر مثبت است که با نتایج این نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد (فاضل دهمردی، ۱۳۹۴).

#### ۴-۲-۲- نتایج براساس شاخص خشکسالی پالم

در نگاره (۴) مقایسه بین سری زمانی شاخص خشکسالی MDI و شاخص خشکسالی جهانی (PDSI) در منطقه ایران نشان داده شده است. برای ارزیابی مقایسه‌ای در مقیاس سالیانه، میانگین سالیانه شاخص‌ها برای ۱۴ سال تهیه و در نگاره (۴) نشان داده شده است. بازه زمانی شاخص PDSI تا سال ۲۰۱۶ تهیه و مقایسه صورت گرفته است.

در نگاره (۴) سری زمانی شاخص‌های MDI و PDSI نشان داده شده‌اند. با توجه به داده اولیه استفاده شده برای محاسبه شاخص MDI، انتظار همبستگی مناسبی با شاخص PDSI وجود دارد، چراکه این شاخص نسبت به میزان بارندگی، دمای منطقه و میزان رطوبت خاک



نگاره ۴: مقایسه میانگین مقادیر شاخص‌های MDI PDSI

فیزیکی و مرتبط نمودن آن‌ها با شاخص‌ها، حساسیت لازم در کار لحاظ شده و این خلأ علمی تا حدودی رفع گردد.

از آنجایی که شاخص شدت خشکسالی پالمر به منظور ارزیابی میزان تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در کشور آمریکا توسعه یافته و براساس معادله تعادل آب و خاک است و داده‌های ورودی این شاخص صرفاً داده‌های بارش و دمای هوا در مقیاس زمانی ماهیانه می‌باشد و براساس توضیحات فوق، سایر فاکتورهای مؤثر در خشکسالی را در نظر نمی‌گیرد. لذا در این مقاله سعی گردید تا با ارائه شاخصی با عنوان شاخص خشکسالی داده‌های ادغام شده (MDI)، علاوه بر اطلاعات بارش، میزان محتوای آب زمین (TWS) استخراج شده از ماهواره GRACE و میزان پوشش گیاهی منطقه با شاخص پوشش گیاهی یکنواخت شده (NDVI) در نظر گرفته شود تا مدل‌سازی خشکسالی در منطقه با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مؤثر در برآورد خشکسالی، با دقت بالاتری انجام شود. در شاخص پیشنهادی به منظور مدل‌سازی اثر رطوبت از پارامتر محتوای آب معادل استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE استفاده شد که به دلیل این‌که از منابع سنجش‌ازدوری استخراج می‌شود، پیوستگی مکانی مناسبی در مدل‌سازی رطوبت زمین به دست می‌دهد. از طرفی دیگر، در شاخص خشکسالی پیشنهادی در این مقاله، از داده‌های ماهواره‌ای سری زمانی که برای کل دنیا در اختیار هستند، استفاده شده است و به این ترتیب اثر خطاهای درون‌یابی اطلاعات ایستگاهی تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

با توجه به این‌که پوشش گیاهی در میزان رطوبت خاک و حتی میزان بارش تأثیر گذار است، لذا به نظر می‌رسد که برآورد میزان خشکسالی با استفاده از شاخص پیشنهادی نسبت به شاخص پالمر کارایی قابل قبولی داشته باشد. به منظور توسعه الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق، می‌توان به بررسی اثر پهنه‌بندی‌های مختلف منطقه مورد مطالعه در محاسبه شاخص MDI اشاره کرد.

هیدرولوژیکی می‌پردازند. مشاهدات NDVI بیشتر برای شناسایی فعالیت‌های فتوسنتزی پوشش‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند و به همین دلیل برای شناسایی خشکسالی کشاورزی بسیار مناسب است. مقادیر بارندگی شامل مقدار آب سطحی در منطقه مورد مطالعه است.

بارندگی‌ها می‌تواند اثرات نسبتاً سریع در منطقه داشته باشند و به همین دلیل برای پایش خشکسالی هواشناسی مفید هستند. به منظور محاسبه شاخص MDI، میانگین و انحراف معیار برای هر مجموعه داده محاسبه شد و این مقادیر به نمره استاندارد Z تبدیل شده‌اند. شاخص MDI به صورت ماهیانه برای منطقه ایران محاسبه گردید. این شاخص همبستگی بالایی با شاخص خشکسالی PDSI دارد. شاخص MDI از نظر محاسبات ساده‌تر از محاسبه شاخص PDSI است.

نتایج نشان داد که شاخص خشکسالی MDI یک شاخص قابل قبول برای مناطقی که در آن شاخص PDSI یا شاخص‌های دیگر قابل محاسبه نیستند، می‌باشد. شاخص MDI، چندین پدیده خشکسالی را در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ در هر منطقه از کشور شناسایی کرده است. خشکسالی‌های مشخص شده برای کشور به طور کلی در طول زمان در سراسر مناطق رخ داده است. هر چند تأثیر این خشکسالی‌ها بر اکوسیستم متفاوت است. شدیدترین خشکسالی در ایران در بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ اتفاق افتاده است.

همان‌طور که شاخص MDI با شاخص PDSI همبستگی خوبی دارند هر دو در این سال‌ها خشکسالی را نشان می‌دهند. شاخص‌های مختلف خشکسالی تنها براساس یک سری فرضیات اولیه و براساس داده‌های خود محاسبه شده‌اند که در یک منطقه خاص ممکن است نتایج متفاوتی را نشان دهند. اگر خصوصیات و شرایط فیزیکی یک منطقه وارد محاسبات شاخص شود می‌تواند باعث ارائه نقشه‌هایی با دقت بسیار بهتری شود، از این رو در این مقاله سعی شد تا با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و

of the Royal Meteorological Society, 24(11), 1323-1331.

9- Doell, P., Mueller Schmied, H., Schuh, C., Portmann, F. T., & Eicker, A. (2014). Global scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50(7), 5698-5720.

10- Hosseini-Moghari, S. M., Araghinejad, S., Ebrahimi, K., & Tourian, M. J. (2019). Introducing modified total storage deficit index (MTSDI) for drought monitoring using GRACE observations. *Ecological indicators*, 101, 465-475.

11- Long, D., Scanlon, B. R., Longuevergne, L., Sun, A. Y., Fernando, D. N., & Save, H. (2013). GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters*, 40(13), 3395-3401.

12- 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* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

13- McCandless, S. E. (2014). Utilizing GRACE TWS, NDVI, and precipitation for drought identification and classification in Texas (Doctoral dissertation).

14- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*, Research paper no. 45. US Weather Bureau, Washington, DC, 58.

15- Robinson, E. L., & Clark, D. B. (2019). Using GRACE to derive corrections to precipitation data sets and improve modelled snow mass at high latitudes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.

16- Sinha, D., Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., & Thomas, R. C. (2017). Characterizing drought in India using GRACE observations of terrestrial water storage deficit. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 381-396.

17- Swain, S., Patel, P., & Nandi, S. (2017, July). Application of SPI, EDI and PNPI using MSWEP precipitation data over Marathwada, India. In *2017 IEEE International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS)* (pp. 5505-5507).

18- Thomas, B. F., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Molotch, N. P., & Argus, D. F. (2017). GRACE groundwater drought index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. *Remote Sensing of Environment*, 198, 384-392.

19- Wang, Q., Shi, P., Lei, T., Geng, G., Liu, J., Mo, X., & Wu, J. (2015). The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI. *International Journal of Climatology*, 35(13), 3760-3769.

20- 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.

## منابع و مآخذ

- ۱- اقتدارنژاد، بذرافشان، بذرافشان؛ مینا، ام‌البنین، جواد. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی براساس شاخص بارش - تبخیر تعلق استاندارد شده در ایران. *هواشناسی کشاورزی*، ۵(۲)، ۳۵-۴۶. doi: ۲۰۱۸.۰۵۹۷۱۹.agmj/۱۰.۲۲۱۲۵
- ۲- سلیمانی ساردو، سلطانی کوپایی، سرحدی؛ فرشاد، سعید، علی، ۱۳۸۷، پهنه‌بندی و تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) در استان کرمان، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، [https://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03\\_576.html](https://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03_576.html)
- ۳- فاضل دهکردی، سهرابی، قنایزباف، قضاوی؛ لیل، طیب‌السادات، محمدحسین، رضا. (۱۳۹۵). پایش خشکسالی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) در مناطق خشک، مطالعه موردی مراتع استان اصفهان. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۷(۳)، ۱۷۷-۱۹۰. doi: ۱۰.۲۲۱۰۸/۲۰۱۷.۹۸۰۶۷.gcp
- ۴- هاشمی، عطایی؛ زینب، هوشنگ. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و بررسی اثرات آن بر محیط‌زیست (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری)، فصلنامه علوم و مهندسی محیط‌زیست، ۵۱، ۱۳. [magiran.com/p1۰۷۷۱۰۳](http://magiran.com/p1۰۷۷۱۰۳)
- 5- Cao, Y., Nan, Z., & Cheng, G. (2015). GRACE gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China. *Remote Sensing*, 7(1), 1021-1047.
- 6- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Yang, Z. L., & Niu, G. Y. (2009). 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B5).
- 7- Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- 8- Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., & Xie, P. (2004). The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology: A Journal*

