



Application of GRACE Satellite Observations in Drought Monitoring (Case Study: Markazi Basin, IRAN)

S.M. Hosseini-Moghari¹, Sh. Araghinejad²
and K. Ebrahimi^{3*}

Abstract

Drought monitoring is one of the main pillars of drought management. Therefore, investigators are always seeking ways to improve the drought monitoring accuracy. The main purpose of this study was to investigate the efficiency of GRACE satellite observations in drought monitoring in the Markazi basin of Iran between 2002 and 2016. With the launch of this satellite, it has been possible to monitor total water storage anomalies (TWSA) for the entire world with high precision. Due to the significance of human activities impact on Total Water Storage Anomaly (TWSA), obtained from GRACE in the above mentioned basin, the common GRACE-based drought indices, such as Drought Severity Index (DSI), has not been efficient in this basin. Therefore, in this paper the newly Modified Drought Severity Index (MDSI) is introduced based on de-trended TWSA time series. Also, both Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) were used, as the criteria to assess the performance of DSI and MDSI. The results showed that the correlation coefficient between DSI and SPI12/SPEI12 were respectively equal to 0.42 and 0.26, while these values for MDSI were equal to 0.69 and 0.56. Calculated MDSI time series revealed that during the studied period, the most severe and longest drought occurred in 2008-09. During this period the basin faced a water deficit of 238 km³. On the basis of maximum and average rate of deficit changes in the basin, at least 21 and on average 91 months is needed for recovery of this deficit.

Keywords: Modified Drought Severity Index, Standardized Precipitation Index, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index.

Received: May 13, 2018
Accepted: October 11, 2018

کاربرد مشاهدات ماهواره‌ی GRACE در پایش خشکسالی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز مرکزی کشور)

سید محمد حسینی موعاری^۱، شهاب عراقی نژاد^۲
و کیومرث ابراهیمی^{۳*}

چکیده

پایش خشکسالی یکی از ارکان اصلی مدیریت خشکسالی است. از این رو محققان همواره به دنبال یافتن راهی برای پایش هرچه دقیق‌تر این پدیده هستند. هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی کارایی مشاهدات ماهواره‌ی بازایی گرانش و آزمایش اقلیمی (GRACE) در پایش خشکسالی در حوضه‌ی مرکزی ایران بین سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۱۶ است. با پرتاب این ماهواره امکان پایش بی‌هنجاری‌های ذخیره‌ی کل آب (TWSA) برای کل جهان با دقت بالا فراهم شد. با توجه به معنی‌دار بودن اثر فعالیت‌های انسانی بر TWSA در حوضه‌ی مذکور، شاخص‌های متداول خشکسالی GRACE مبناء مانند شاخص شدت خشکسالی (DSI)، در حوضه‌ی مرکزی کارایی مناسبی ندارند. از این رو در این مقاله شاخص شدت خشکسالی اصلاح شده (MDSI) با حذف روند از سری زمانی TWSA معرفی شد. همچنین، شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) نیز به عنوان مبنایی برای ارزیابی کارایی شاخص‌های DSI و MDSI بکار گرفته شدند. بر اساس نتایج، ضریب همبستگی بین DSI و شاخص‌های SPI12 و SPEI12 به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۲۶ به دست آمده است؛ در حالی که این مقادیر برای MDSI به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۵۶ می‌باشند. نتایج مربوط به MDSI نشان داد که در دوره‌ی مورد مطالعه، شدیدترین و طولانی‌ترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹ رخ داده است. در این دوره حوضه با کمبود ۲۳۸ کیلومتر مکعبی آب روبرو بوده است. بر اساس نرخ حداکثر و متوسط تغییرات کمبودها در حوضه، برای جبران این کمبود حداقل ۲۱ ماه و به طور متوسط ۹۱ ماه زمان لازم است.

کلمات کلیدی: شاخص شدت خشکسالی اصلاح شده، شاخص بارش استاندارد شده، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۷/۱۹

1- Ph.D. Graduate, Water Resources Engineering, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Ebrahimi@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

از سال ۲۰۰۲ به بعد، با پرتاب ماهواره‌ی بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی^۱ (GRACE) اطلاعات منحصر به فردی مهیا شد که قبل از آن امکان اندازه‌گیری مستقیم آن وجود نداشت. GRACE بی‌هنجاری‌های ذخیره کل آب^۲ (TWSA) را با دقت مناسبی اندازه‌گیری می‌کند، به نحوی که مشاهدات این ماهواره به عنوان مبنایی برای ارزیابی دقت مدل‌های هیدرولوژیکی شناخته می‌شود (Xie et al., 2012; Eicker et al., 2014). با طولانی شدن سری زمانی مشاهدات GRACE، استفاده از اطلاعات این ماهواره برای پایش خشکسالی افزایش پیدا کرد. در این زمینه Thomas et al. (2014) یک رویکرد ذخیره مینا را برای پایش خشکسالی با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ی GRACE معرفی کرد. در این رویکرد اختلاف TWSA هر ماه از میانگین بلندمدت آن ماه، به عنوان کمبود ذخیره در نظر گرفته می‌شود. ایشان با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ی GRACE به پایش خشکسالی در چهار منطقه شامل حوضه‌ی آمازون، حوضه‌ی زامبزی، تگزاس و جنوب شرق آمریکا بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج حاکی از پتانسیل مشاهدات GRACE در پایش خشکسالی بود.

Chao et al. (2015) به پایش خشکسالی بر اساس مشاهدات GRACE در چین بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ پرداختند. ایشان نتایج حاصل از GRACE را با شاخص شدت خشکسالی پالم^۳ (PDSI) و بی‌هنجاری بارش مقایسه کردند. نتایج نشان داد که GRACE توانایی شناسایی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی را دارد. Yi and Wen (2016) به توسعه شاخص خشکسالی تحت عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی GRACE مینا^۴ (GHDI) برای پایش خشکسالی در آمریکا بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ پرداختند. این شاخص با رویکرد محاسباتی‌ای مشابه شاخص PDSI توسعه یافت. نتایج ایشان نشان داد که بر اساس مشاهدات ماهواره‌ی GRACE و بدون هیچ اندازه‌گیری زمینی می‌توان خشکسالی را با دقت مناسب پایش نمود. Zhao et al. (2017) اقدام به پایش خشکسالی بر اساس مشاهدات ماهواره‌ی GRACE بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ در آمریکا کردند. آنها شاخصی تحت عنوان شاخص شدت خشکسالی^۵ (DSI) بر اساس مشاهدات ماهواره‌ی GRACE توسعه دادند. در این شاخص مشاهدات ماهواره‌ی GRACE به صورت ماه به ماه استاندارد شده بود. ایشان نتایج شاخص DSI را با نتایج شاخص PDSI، سامانه پایش خشکسالی آمریکا^۶ (USDM) و شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده^۷ (NDVI) مقایسه کردند. نتایج نشان دهنده‌ی کارایی شاخص DSI برای پایش خشکسالی بود. Sun et al. (2018) نیز عملکرد شاخص DSI را برای پایش

خشکسالی یک بلای طبیعی پیچیده است که با کاهش منابع آب در دسترس، باعث آسیب‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی می‌شود (Hosseini-Moghari and Araghinejad, 2015). این پدیده گرچه در تمام اقلیم‌ها رخ می‌دهد، اما تأثیرات منفی آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک به علت عدم وجود ذخایر آبی استاتیک قابل توجه، بیشتر است. بر اساس آمارهای مربوط به بلایای طبیعی، ۲۲ درصد از افراد متأثر از این بلایا و سه درصد از مرگ و میرهای ناشی از بلایای طبیعی مربوط به خشکسالی است (Wilhite et al., 2007). آمارها نشان می‌دهد که خشکسالی سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ در کالیفرنیا به ترتیب باعث خسارت ۲۲۰۰ و ۶۰۳ میلیون دلاری و از دست رفتن ۱۷۱۰۰ و ۴۷۰۰ شغل مربوط به کشاورزی شده است (Howitt et al., 2014; Medellín-Azuara et al., 2016). همچنین بر اساس گزارش‌های، خسارت خشکسالی در نیمه اول سال ۲۰۰۱ در ایران ۲۶۰۰ میلیون دلار تخمین زده شده است (MacFarquhar, 2001).

یکی از ارکان مدیریت خشکسالی پایش پیوسته این پدیده است (Hashemi Sheikhshabani et al., 2016; Byzedi, 2018). پایش خشکسالی می‌تواند به کمک اطلاعات ایستگاهی، اطلاعات سنجش از دور یا خروجی مدل‌های عددی انجام شود. پایش خشکسالی با استفاده از اطلاعات ایستگاهی گرچه در محل ایستگاه از دقت بالایی برخوردار است، اما با توجه به تعداد کم ایستگاه‌ها به خصوص در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، تعمیم نتایج آن به کل منطقه با خطا همراه است. برای رفع مشکل پایش مکانی خشکسالی، امروزه خروجی مدل‌های عددی و اطلاعات سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرند. سامانه پایش و پیش‌بینی جهانی خشکسالی (Hao et al., 2014) نمونه‌ای از کاربردهای مدل‌های عددی در پایش خشکسالی است. استفاده از اطلاعات سنجش از دور در پایش خشکسالی بسیار رایج‌تر از مدل‌های عددی است. در این زمینه می‌توان به پایش خشکسالی با استفاده از محصولات پوشش گیاهی (Bai et al., 2017)، محصولات بارش ماهواره‌ای (Bayissa et al., 2017) و محصولات رطوبت خاک (Park et al., 2017) اشاره کرد. گرچه پایگاه‌های اطلاعاتی اشاره شده، اطلاعات مورد نیاز برای پایش خشکسالی را به صورت مکانی فراهم می‌کنند، اما دقت این اطلاعات قبل از استفاده در هر منطقه باید بررسی گردد و در صورت امکان تصحیح گردد.

کمبودهای ناشی از خشکسالی‌ها در حوضه وجود ندارد، از این‌رو خشکسالی می‌تواند اثرات اقتصادی-اجتماعی فراوانی در این حوضه داشته باشد. از این‌رو این حوضه به عنوان مطالعه موردی در تحقیق حاضر انتخاب گردید.

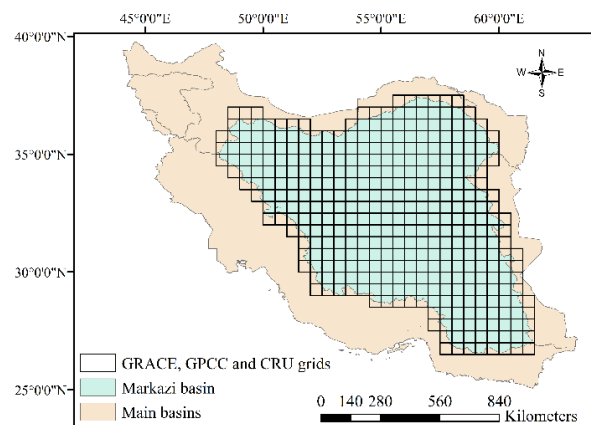


Fig. 1- Location of Markazi basin and grids of global data used in this research

شکل ۱- موقعیت حوضه مرکزی به همراه شبکه‌بندی اطلاعات جهانی استفاده شده در این تحقیق

۲-۲- اطلاعات GRACE

ماهواره‌ی GRACE در سال ۲۰۰۲ به منظور بررسی تغییرات گرانش زمین به فضا پرتاب شد (Farokhnia and Morid, 2014). این ماهواره یک پروژه مشترک بین آمریکا و آلمان است که سازمان‌های اصلی درگیر در آن سازمان فضایی آمریکا^{۱۱} (NASA)، مرکز مطالعات فضایی دانشگاه تگزاس^{۱۱}، مرکز هوا و فضای آلمان^{۱۲} (DLR) و مرکز تحقیقات زمین آلمان^{۱۳} (GFZ) هستند (Sakumura et al., 2014). GRACE در واقع از دو ماهواره تشکیل شده است که در یک فاصله تقریباً ثابت نسبت به هم در حرکت هستند. وقتی یکی از این دو ماهواره وارد یک منطقه با شتاب گرانشی بالاتر می‌شود، فاصله آن دو ماهواره از هم افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری فاصله دو ماهواره پایه اندازه‌گیری تغییرات گرانش زمین است (Missling et al., 2005). اندازه‌گیری فاصله با استفاده از امواج میکروویو توسط سامانه‌ی KBR^{۱۴} انجام می‌شود. GRACE بر خلاف ماهواره‌های معمول هیچ‌گونه اندازه‌گیری انرژی امواج مغناطیسی که از زمین بازتاب می‌شوند را انجام نمی‌دهد و فقط دو ماهواره به تنهایی به عنوان ابزار اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. فاصله این دو تقریباً ۲۲۰ کیلومتر بوده و در ارتفاع حدوداً ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین پشت سر یکدیگر حرکت می‌کنند (Tapley et al., 2004).

خشکسالی در حوضه‌ی یانگ‌تسه در چین ارزیابی کردند. ایشان نتایج خود را با شاخص PDSI، شاخص استاندارد شده بارش^۱ (SPI)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^۹ (SPEI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که DSI شاخصی مناسب و کاربردی در پایش خشکسالی در مقیاس بزرگ است.

بر اساس مطالعات انجام شده، توانایی مناسبی برای مشاهدات GRACE در پایش خشکسالی در مناطق مختلف جهان گزارش شده است. بنابراین با توجه به اهمیت خشکسالی در کشور و اینکه تاکنون دقت مشاهدات این ماهواره در پایش خشکسالی در کشور بررسی نشده است، در تحقیق حاضر دقت مشاهدات این ماهواره در پایش خشکسالی در حوضه‌ی مرکزی، به عنوان اولین تحقیق داخلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از اطلاعات TWSA حاصل از GRACE بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ استفاده شد؛ اما استفاده از مشاهدات GRACE در ایران و سایر مناطق با مصرف بالای آب، دارای یک محدودیت است. این محدودیت از آنجا ناشی می‌شود که مشاهدات GRACE هر دو عامل انسانی و اقلیمی را در بر می‌گیرد، بنابراین در مناطق با مصرف بالای آب این مشاهدات همواره دارای یک روند کاهشی است که مربوط به فعالیت‌های انسانی است. در تحقیق حاضر، به منظور غلبه بر این محدودیت از روش تجزیه سیگنال استفاده شد. همچنین به منظور در دست بودن یک مبناء برای ارزیابی کارایی مشاهدات GRACE در پایش خشکسالی، شاخص SPI و شاخص SPEI نیز برای حوضه‌ی مرکزی محاسبه شد و نتایج حاصل از GRACE با نتایج حاصل از این دو شاخص مقایسه شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مطالعه موردی

در این مطالعه حوضه‌ی مرکزی به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. این حوضه با مساحت ۳۵۶،۸۲۴ کیلومتر مربع بزرگ‌ترین حوضه‌ی آبریز اصلی ایران است. حوضه‌ی مرکزی بین عرض جغرافیایی ۲۶ تا ۳۷ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ تا ۶۰ درجه شرقی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه که ۵۲ درصد از مساحت کشور را پوشش می‌دهد، ۲۹ درصد از آب تجدیدپذیر ایران را دریافت می‌کند (Frenken, 2009). همچنین متوسط بارندگی سالانه این حوضه ۱۶۴/۹ میلی‌متر است (<http://wrs.wrm.ir/m3/gozaresh>). با توجه به اقلیم خشک حوضه و مصرف بالای آب در آن، ذخیره آب قابل توجهی برای جبران

مقایسه گردیدند. بر اساس نتایج این مقایسه، که در مقاله‌ی Hosseini-Moghari et al. (2018) منتشر شده است، اطلاعات GPCC به عنوان مناسب‌ترین پایگاه برای پایش خشکسالی در حوضه مرکزی انتخاب شد. پایگاه بارش GPCC در سال ۱۹۸۹ به درخواست سازمان جهانی هواشناسی^{۳۳} (WMO) تأسیس شد و توسط سازمان هواشناسی آلمان اداره می‌شود. این پایگاه اطلاعات بارش را با تفکیک‌های مکانی $2/5 \times 2/5$ ، 1×1 و $0/5 \times 0/5$ درجه در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد. در این مقاله از اطلاعات نسخه ۷ این پایگاه با تفکیک مکانی $0/5 \times 0/5$ درجه استفاده شد. اطلاعات این پایگاه در نسخه ۷، سال‌های ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۳ را شامل می‌شود که در این مقاله از اطلاعات بارندگی ماهانه GPCC مربوط به سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۳ استفاده شد. شبکه‌بندی اطلاعات این پایگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. اطلاعات بارندگی پایگاه GPCC بر روی درگاه اینترنتی به نشانی <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html> (last accessed 2 May 2018) به صورت رایگان در دسترس است.

۲-۴- اطلاعات تبخیر و تعرق پتانسیل

اطلاعات تبخیر و تعرق پتانسیل مورد استفاده در محاسبه شاخص SPEI از پایگاه CRU دریافت شد. این پایگاه اطلاعات اقلیمی مختلفی را با تفکیک‌های مکانی متفاوت برای کل جهان ارائه می‌دهد. CRU اطلاعات تبخیر و تعرق پتانسیل خود را به روش پنمن-مانتیت فائو (Allen et al., 1994) محاسبه و به صورت شبکه‌بندی شده در اختیار محققان قرار می‌دهد. در این مقاله از سری زمانی نسخه 4.01 CRU TS 4.01 تبخیر و تعرق پتانسیل این مرکز به نام CRU TS 4.01 استفاده شد. این اطلاعات با تفکیک مکانی $0/5 \times 0/5$ درجه از سال ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۶ برای کل جهان در دسترس است. داده‌های مربوط به سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۳ این مجموعه در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌بندی اطلاعات این پایگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. اطلاعات اقلیمی مختلف پایگاه CRU بر روی درگاه اینترنتی به نشانی <http://www.cru.uea.ac.uk/data> (last accessed 2 May 2018) در دسترس است.

۲-۵- شاخص خشکسالی DSI

Zhao et al. (2017) شاخصی تحت عنوان DSI را بر اساس مشاهدات ماهواره‌ی GRACE معرفی کرد که بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

تغییرات میدان گرانش زمین در مکان و زمان به عنوان نتیجه تغییرات توزیع جرم در سطح زمین متغیر است. تغییرات مکانی آن ناشی از خصوصیات ژئوفیزیکی مانند توپوگرافی است در حالی که تغییرات زمانی از پدیده‌های مختلفی نظیر چرخش زمین، جزر و مد و جابه‌جایی توده‌های زمینی ناشی می‌شود. در این جابجایی‌ها، هیدرولوژی نقش مهمی را بازی می‌کند. بنابراین بر اساس تغییرات گرانش در یک مکان خاص در طول زمان، بی‌هنجاری ذخیره کل آب یا TWSA در آن منطقه توسط GRACE اندازه‌گیری می‌شود. اطلاعات GRACE توسط سه مرکز CSR^{۱۵}، GFZ و JPL^{۱۶} پردازش و به صورت شبکه‌بندی شده برای کل جهان در اختیار قرار می‌گیرد. برای تبدیل مشاهدات GRACE به TWSA دو روش کلی SH^{۱۷} و Mascons^{۱۸} وجود دارد. تفاوت اصلی روش SH و Mascons در این است که روش SH تفاوتی بین خشکی و دریا قائل نمی‌شود، اما در روش Mascons خشکی‌ها و دریاها به صورت تفکیک شده در نظر گرفته می‌شوند. تا قبل از معرفی محصولات Mascons مرکز CSR توسط Save el al. (2016)، مشاهدات GRACE نیاز به پیش‌پردازش‌هایی به منظور کاهش خطا برای استفاده در مطالعات هیدرولوژی داشتند. این خطا به طور عمده مربوط به خطای نشت بود که توسط ضریبی تحت عنوان gain factor در محصولات SH اصلاح می‌گردید. از این‌رو در این مطالعه از اطلاعات TWSA حاصل از روش Mascons مرکز CSR به علت دقت مناسب و عدم نیاز به هیچ‌گونه پیش‌پردازش برای کاهش خطاهای GRACE (Save el al., 2016; Scanlon et al., 2016) بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ استفاده شد. این اطلاعات از طریق درگاه <http://www2.csr.utexas.edu/grace/> (last accessed 2 May 2018) در دسترس است. شبکه‌بندی اطلاعات این پایگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، برای سلول‌های که کامل در حوضه قرار نگرفته‌اند، با توجه به مساحتی از حوضه که در داخل آنها است وزنی در نظر گرفته شد و بر اساس یک میانگین وزن‌دار سری زمانی TWSA برای حوضه استخراج گردید.

۲-۳- اطلاعات بارش

در این مطالعه به منظور پایش خشکسالی در حوضه‌ی مرکزی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI، اطلاعات بارش شبکه‌بندی شده‌ی چهار پایگاه جهانی شامل CRU (Harris et al., 2014)^{۱۹}، نسخه ۷ اطلاعات بارش GPCC (Schneider et al., 2015)^{۲۰}، اطلاعات بارش PERSIANN-CDR (Ashouri et al., 2015)^{۲۱} و نسخه چهارم اطلاعات بارش UDEL^{۲۲} (Willmott and Matsuura, 2001) با اطلاعات مشاهداتی^{۳۱} ایستگاه همدیدی در سطح حوضه

$$MDSI_{i,j} = \frac{TWSA_{i,j}^{detranded} - \overline{TWSA_j^{detranded}}}{\sigma_j^{detranded}} \quad (3)$$

$$TWSA^{detranded} = TWSA - a \times t + b \quad (4)$$

که در آن $TWSA^{detranded}$ سری زمانی بدون روند مشاهدات GRACE، a و b ضرایب رابطه رگرسیونی و t گام زمانی (ماه) است. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص MDSI مشابه شاخص DSI می‌باشد. لازم به ذکر است که به منظور بررسی معنی‌دار بودن روند سری زمانی TWSA از آزمون من‌کندال استفاده شد. اطلاعات بیشتر در مورد این آزمون در مقاله‌ی (Hamed and Rao 1998) موجود است.

۲-۶- زمان ترمیم خشکسالی

یکی از مزیت‌های پایش خشکسالی با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ی GRACE، تخمین زمان ترمیم خشکسالی^{۲۵} است. (Thomas et al. 2014) برای تخمین زمانی ترمیم خشکسالی یک رویکرد احتمالاتی پیشنهاد دادند. در این رویکرد تغییرات کمبود در سری زمانی GRACE بر اساس رابطه ۵ به عنوان مبنایی برای محاسبه زمان ترمیم استفاده می‌شود:

$$\frac{dm}{dt}(t_i) = \frac{M(t_i) - M(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad i = 1 : N \quad (5)$$

که در این رابطه M کمبود ماهانه (صورت رابطه ۱ یا ۳)، t گام زمانی و N طول سری زمانی مشاهدات GRACE می‌باشد. (Thomas et al. 2014) پیشنهاد کرد که مقدار تغییرات متناظر با احتمال ۰/۹۵ و ۰/۶۸ می‌تواند به ترتیب به عنوان حداکثر و متوسط نرخ تغییرات کمبود بر اساس یک توزیع احتمال تجربی، در نظر گرفته شود. بنابراین در مرحله اول توزیع احتمال تجربی بر روی سری زمانی $\frac{dm}{dt}$ برازش می‌یابد و سپس مقدار معادل احتمال ۰/۹۵ و ۰/۶۸ به ترتیب به عنوان مقدار حداکثر و متوسط تغییرات محاسبه می‌شوند. در گام بعد، برای محاسبه زمان حداقل و متوسط ترمیم خشکسالی می‌بایست به ترتیب، مقدار کمبود در ماه مورد نظر را بر حداکثر و متوسط نرخ تغییرات احتمالی به دست آمده تقسیم شود. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه به (Thomas et al. 2014) مراجعه شود.

۲-۷- شاخص SPI و SPEI

شاخص SPI را شاید بتوان پرکاربردترین شاخص خشکسالی دانست. این شاخص که تنها به اطلاعات بارش نیاز دارد، می‌تواند در

$$DSI_{i,j} = \frac{TWSA_{i,j} - \overline{TWSA_j}}{\sigma_j} \quad (1)$$

که در این رابطه، i شمارنده سال (۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶)، j شمارنده ماه (۱ تا ۱۲)، $TWSA_{i,j}$ بی‌هنجاری ذخیره کل آب در ماه j ام و سال i ام، $\overline{TWSA_j}$ میانگین بی‌هنجاری ذخیره کل آب برای ماه j ام و σ_j انحراف معیار TWSA در ماه j ام است. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص DSI در جدول ۱ ارائه شده است:

Table 1- Drought classification based on DSI (Zhao et al., 2017)

Category	DSI value
Abnormally dry	$-0.5 \leq DSI < -0.8$
Moderate drought	$-0.8 \leq DSI < -1.3$
Severe drought	$-1.3 \leq DSI < -1.6$
Extreme drought	$-1.6 \leq DSI < -2$
Exceptional drought	$DSI \leq -2$

استفاده از شاخص DSI در حوضه‌ی مرکزی با توجه به مصرف بالای آب در حوضه، دارای محدودیت است. این محدودیت ناشی از تأثیر توامان عوامل انسانی و اقلیمی بر ذخیره‌ی کل آب در این حوضه‌ها است. در این شرایط سیگنال GRACE تحت تأثیر هر دو عامل است و تأثیر عامل انسانی قابل صرف‌نظر کردن نیست. بنابراین در این پژوهش اقدام به اصلاح شاخص DSI برای استفاده در حوضه‌ی مرکزی و حوضه‌های دیگر با ویژگی مشابه شد. بدین منظور سیگنال GRACE با هدف حذف مؤلفه‌های قطعی سیگنال تجزیه گردید. TWSA حاصل از GRACE از چهار مؤلفه‌ی زیر تشکیل شده است (Scanlon et al., 2016):

$$TWSA = \text{Trend} + \text{Annual signal} + \text{Semi - annual signal} + \text{residuals} \quad (2)$$

در روابط فوق، Trend نشان دهنده‌ی روند خطی سری زمانی، Annual signal و Semi-annual signal نشان دهنده‌ی رفتار فصلی سری زمانی و residuals باقی‌مانده سیگنال که نشان دهنده‌ی رفتار غیر قطعی آن است. اثرات Annual signal و Semi-annual signal در فرآیند نرمال‌سازی (رابطه‌ی ۱) حذف می‌شود، بنابراین تنها با حذف روند قبل از نرمال‌سازی، مؤلفه‌های قطعی سیگنال حذف خواهند شد. رابطه ۳ شاخص اصلاح شده‌ی شدت خشکسالی^{۲۴} (MDSI) را برای استفاده در حوضه‌ی مرکزی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، این رابطه هم برای حوضه‌ها با مصرف بالای آب و هم برای حوضه‌ها با مصرف کم آب قابل استفاده است:

دوم مربوط به نیمه‌ی سال ۲۰۰۵ تا مارچ سال ۲۰۱۶ است که نشان دهنده‌ی یک روند کاهشی شدید با نرخ ۱۳/۴۴- میلی‌متر بر سال است.

در ادامه، از سری زمانی TWSA برای محاسبه شاخص DSI و از سری زمانی بدون روند TWSA برای محاسبه MDSI استفاده شد. برای حذف روند، رابطه‌ی ۳ به صورت جداگانه بر روی سه سال اول سری زمانی و ادامه‌ی سری زمانی اعمال شد. شکل ۳ ضرایب همبستگی بین شاخص‌های DSI و MDSI را با شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه، نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳ شاخص MDSI در تمام مقیاس‌های زمانی همبستگی بهتری با شاخص‌های SPI و SPEI نسبت به DSI داشته است. همبستگی‌ها در مقیاس یک و سه ماهه‌ی SPI و SPEI که برای پایش خشکسالی‌های کوتاه‌مدت استفاده می‌شود (Mishra and Desai, 2005)، معنی‌دار نیست که نشان می‌دهد TWSA به تغییرات کوتاه مدت بارش حساسیت ندارد. بیشترین همبستگی مربوط به مقیاس ۱۲ ماهه‌ی SPI و SPEI بوده است (به جز همبستگی DSI با SPI که در مقیاس ۲۴ ماهه به ۰/۴۷ می‌رسد). این موضوع بیان‌کننده‌ی این است که GRACE برای پایش خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت مناسب است. مقدار همبستگی شاخص DSI با شاخص SPI12 و SPEI12 به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۲۶ بوده است و برای شاخص MDSI به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۵۶ بوده است. همبستگی مناسب سیگنال GRACE با شاخص SPI12 توسط Awange et al. (2016) که به پایش خشکسالی در آفریقا پرداخته بودند نیز گزارش شده است، که با نتایج تحقیق حاضر سازگار است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه اطلاعات بارش GPCP تا سال ۲۰۱۳ موجود است، شاخص SPI و SPEI تا انتهای سال ۲۰۱۳ محاسبه شده‌اند. بنابراین همبستگی‌ها مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳ می‌باشد.

مقیاس‌های مختلف زمانی محاسبه شود. از این‌رو امکان پایش خشکسالی‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت توسط این شاخص وجود دارد (Mishra and Desai, 2005). مراحل محاسبه این شاخص را می‌تواند در چند گام بیان نمود؛ ۱- برازش توزیع احتمالاتی مناسب بر روی اطلاعات بارش (Stagge et al., 2015)، ۲- محاسبه احتمال مربوط به هر داده بارش بر اساس توزیع برازش داده شده ۳- انتقال مقدار احتمال به دست آمده به توزیع احتمال نرمال استاندارد و ۴- قرائت مقدار معادل احتمال انتقال یافته در توزیع نرمال استاندارد که در واقع شاخص SPI است. در مورد شاخص SPEI نیز مراحل فوق طی می‌گردد با این تفاوت که توزیع احتمالاتی به جای اطلاعات بارش، بر روی تفاضل مقدار بارش از تبخیر و تعرق پتانسیل برازش داده می‌شود. در این تحقیق از اطلاعات بارش GPCP و اطلاعات تبخیر و تعرق CRU برای محاسبه شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده گردید. برای اطلاعات بیشتر در مورد شاخص SPI و SPEI به ترتیب به مقاله McKee et al. (1993) و Vicente-Serrano et al. (2010) مراجعه شود.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

شکل ۲ سری زمانی TWSA مربوط به حوضه‌ی مرکزی را بر اساس مشاهدات ماهواره‌ی GRACE نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، روند نزولی در ذخیره کل آب در حوضه کاملاً مشهود است. روند خطی مشاهدات GRACE بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶، کاهش ۱۱/۰۴- میلی‌متری در سال را نشان می‌دهد. این بدان معناست که سالانه حدود ۹/۱ کیلومتر مکعب از ذخایر آبی حوضه در حال کم شدن است؛ که این مقدار عمدتاً از ذخایر استاتیک آب زیرزمینی در حوضه کم می‌شود. رفتار سری زمانی TWSA مربوط به حوضه‌ی مرکزی را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول مربوط به سه سال اول سری زمانی که روند افزایشی در سری زمانی دیده می‌شود. البته این روند بر اساس آزمون من‌کنندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. بخش

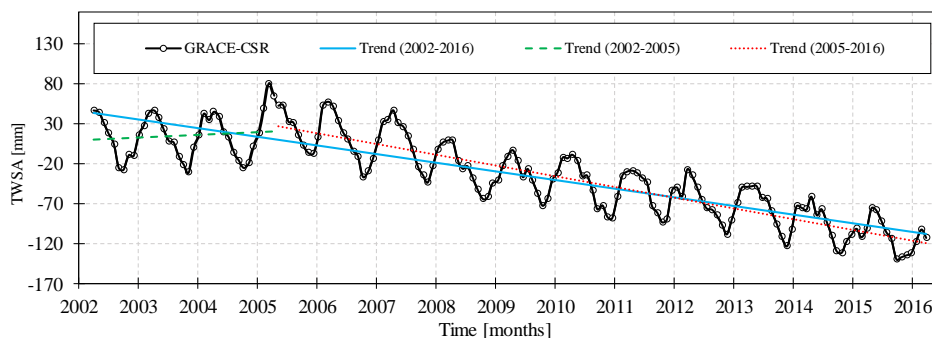


Fig. 2- The TWSA time series obtained from GRACE over Markazi basin
 شکل ۲- سری زمانی TWSA حاصل از GRACE مربوط به حوضه‌ی مرکزی

همچنین بر اساس (Shean 2008) خشکسالی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹ باعث کاهش تولید گندم در ایران شده است. بنابراین نتایج پایش خشکسالی در این سال‌های توسط GRACE با خشکسالی‌های گزارش شده تاریخی هم‌خوانی دارد. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه اطلاعات ورودی به شاخص MDSI با شاخص‌های SPI و SPEI متفاوت است، بنابراین وجود اختلاف بین سری زمانی این شاخص‌ها طبیعی است، اما الگوی رفتاری شاخص‌ها باید هم‌خوانی مناسبی با هم داشته باشند که در این مورد MDSI عملکرد خوبی داشته است.

در جدول ۲ تمام وقایع خشکسالی شناسایی شده توسط شاخص DSI و MDSI ارائه شده است. واقعه خشکسالی بازه‌ی زمانی‌ای در نظر گرفته شد که حداقل برای سه ماه پیاپی مقدار شاخص‌های DSI یا MDSI منفی و حداقل در یک‌ماه در آن دوره مقدار شاخص کمتر از ۰/۵- بوده است. بر اساس نتایج مربوط به شاخص DSI، یک واقعه خشکسالی بلند مدت به طول ۷۰ ماه در حوضه شناسایی شد که در این دوره حوضه با کمبود ۲۳۰۴ کیلومتر مکعبی آب روبرو بوده است. این نتایج که مربوط به سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ است، ناشی از روند منفی TWSA است که عمدتاً عامل انسانی در آن نقش دارد، بنابراین آن را نمی‌توان به عنوان یک دوره خشکسالی در نظر گرفت، بلکه روند کاهش ذخایر آبی استاتیک (آب زیرزمینی در حوضه‌ی مرکزی) را نسبت به میانگین بلند مدت نشان می‌دهد.

اما بر اساس شاخص MDSI، ۷ واقعه خشکسالی در حوضه شناسایی شد که از میان آنها تنها چهار مورد طولانی‌تر از ۵ ماه است. طولانی‌ترین خشکسالی مربوط به فوریه ۲۰۰۸ تا نوامبر ۲۰۰۹ به مدت ۲۲ ماه است که در طی این خشکسالی حوضه با کمبود ۲۳۸- کیلومتر مکعبی ذخیره کل آب نسبت به میانگین روبرو بوده است.

با توجه به اینکه بیشترین همبستگی شاخص‌های DSI و MDSI با شاخص SPI و SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه دیده شد، در شکل ۴ سری زمانی شاخص‌های DSI و MDSI با شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه ترسیم شده است. همچنین مقدار کمبود در دوره‌های خشک نیز در این شکل نشان داده شده است. مقدار کمبودها بر اساس حاصل ضرب ارتفاع کمبود آب نسبت به متوسط بلند مدت هر ماه، در مساحت حوضه به دست آمد.

با توجه به شکل ۴ سری زمانی شاخص DSI، یک سری زمانی کاملاً نزولی است که از روند سری زمانی TWSA تبعیت می‌کند. اما رفتار MDSI هماهنگی مناسبی با رفتار شاخص SPI و SPEI دارد. بر اساس شاخص DSI از ابتدای دوره تا سال ۲۰۱۰ هیچ واقعه‌ی خشکسالی در حوضه شناسایی نشده است و از سال ۲۰۱۱ به بعد حوضه همواره با خشکسالی مواجه بوده است. علت این موضوع را می‌تواند در روند منفی موجود در سری زمانی TWSA جستجو کرد، بر این اساس در سال‌های نخست مقدار TWSA نسبت به میانگین ماهانه بیشتر بوده است و در سال‌ها آخر در تمام ماه‌های مقدار TWSA از میانگین کمتر بوده است. (Chao et al. 2017) که به پایش خشکسالی با استفاده از GRACE در حوضه‌ی دجله و فرات پرداخته بود، بیان کردند که از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ (انتهای دوره مورد مطالعه) این حوضه همواره با خشکسالی روبرو بوده است، اما بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ هیچ واقعه‌ی خشکسالی در حوضه شناسایی نشده است. این نتایج که با نتایج شاخص DSI مطابقت دارد، نشان دهنده اثر برداشت‌های انسانی است که دید درستی از وقوع خشکسالی‌ها ارائه نمی‌دهد. اما نتایج شاخص MDSI با خشکسالی‌های تاریخی شناسایی شده توسط SPI و SPEI سازگاری خوبی دارد. به نحوی که واقعه خشکسالی شدید سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹ به خوبی توسط این شاخص شناسایی شده است که با نتایج SPI و SPEI سازگار است. خشکسالی سال ۲۰۰۸ توسط (Dezfuli et al. 2010) نیز گزارش شده است.

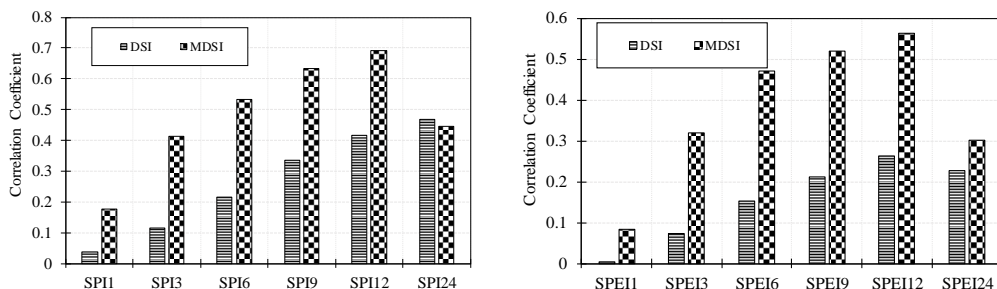


Fig. 3- Correlation coefficient between drought indices used in this study
 شکل ۳- ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی در این مطالعه

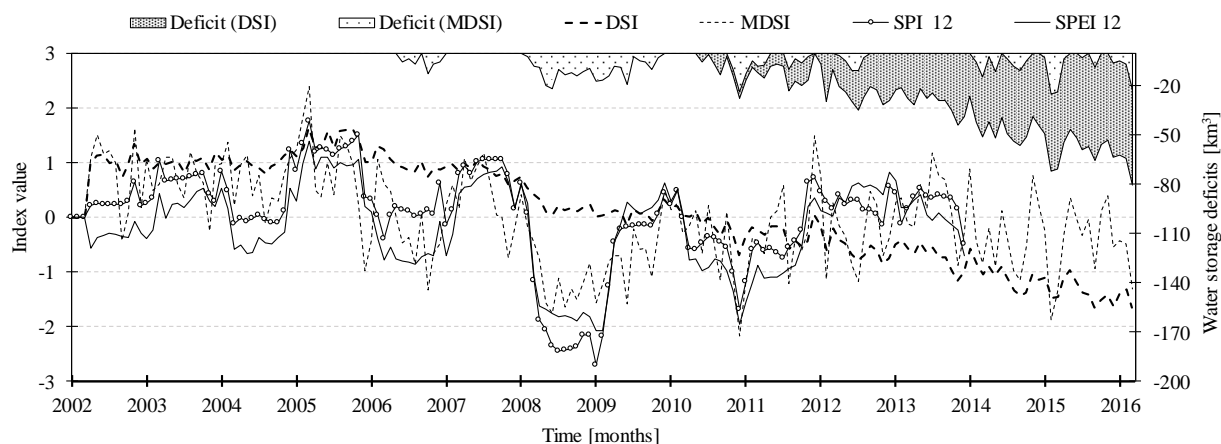


Fig. 4- Time series of DSI, MDSI, SPI12 and SPEI12
 شکل ۴- سری زمانی DSI، MDSI، SPI12 و SPEI12

Table 2- Drought events detected based on DSI and MDSI
 جدول ۲- وقایع خشکسالی شناسایی شده بر اساس DSI و MDSI

No. of events	Time period	DSI		No. of events	Time period	MDSI	
		Duration [months]	Total deficit [km ³]			Duration [months]	Total deficit [km ³]
1	Jun. 2010-Mar. 2016	70	-2304	1	Feb. 2006-Dec. 2006	7	-40
				2	Feb. 2008-Nov. 2009	22	-238
				3	Nov. 2010-Nov. 2011	7	-88
				4	Apr. 2012-Aug. 2012	5	-30
				5	Feb. 2014-Oct. 2014	9	-60
				6	Jan. 2015-Apr. 2015	4	-55
				7	Dec. 2015-Mar. 2016	4	-40

اساس نتایج، بعد از یکسال در نوامبر ۲۰۱۰ حوضه بار دیگر درگیر خشکسالی شده است؛ که این مسئله اثر تجمعی خشکسالی‌ها بر کاهش منابع آب حوضه را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، مشاهدات GRACE توانایی مناسبی در پایش خشکسالی دارد، اما محدودیت‌هایی در این زمینه وجود دارد، که باید از آنها آگاه باشیم. محدودیت اول: طول سری زمانی مشاهدات GRACE است؛ که با وجود اینکه استفاده از آن در خشکسالی بسیار مرسوم شده است اما بازه زمانی ۱۵ ساله برای انجام مطالعات اقلیمی همچنان کم است.

در گام آخر زمان ترمیم خشکسالی‌های شناسایی شده توسط شاخص MDSI تعیین شده است. بر اساس سری زمانی تغییرات کمبودها نسبت به زمان $(\frac{dm}{dt})$ ، حداکثر نرخ تغییرات (متناظر با احتمال ۰/۹۵)، برابر ۱۱/۴ کیلومتر مکعب بر ماه و متوسط نرخ تغییرات (معادل احتمال ۰/۶۸) برابر با ۲/۶۲ کیلومتر مکعب بر ماه بوده است. با تقسیم مقدار کمبودها در هر ماه (شکل ۵a) بر حداکثر و متوسط نرخ تغییرات کمبودها، حداقل و متوسط زمان ترمیم خشکسالی بر هر ماه به دست آمده است (شکل ۵b). بر اساس این نتایج، برای ترمیم خشکسالی شدید سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹، که باعث کمبود ۲۳۸ واحدی شده است، حداقل ۲۱ ماه و به طور متوسط ۹۱ ماه زمان لازم بوده است. اما بر

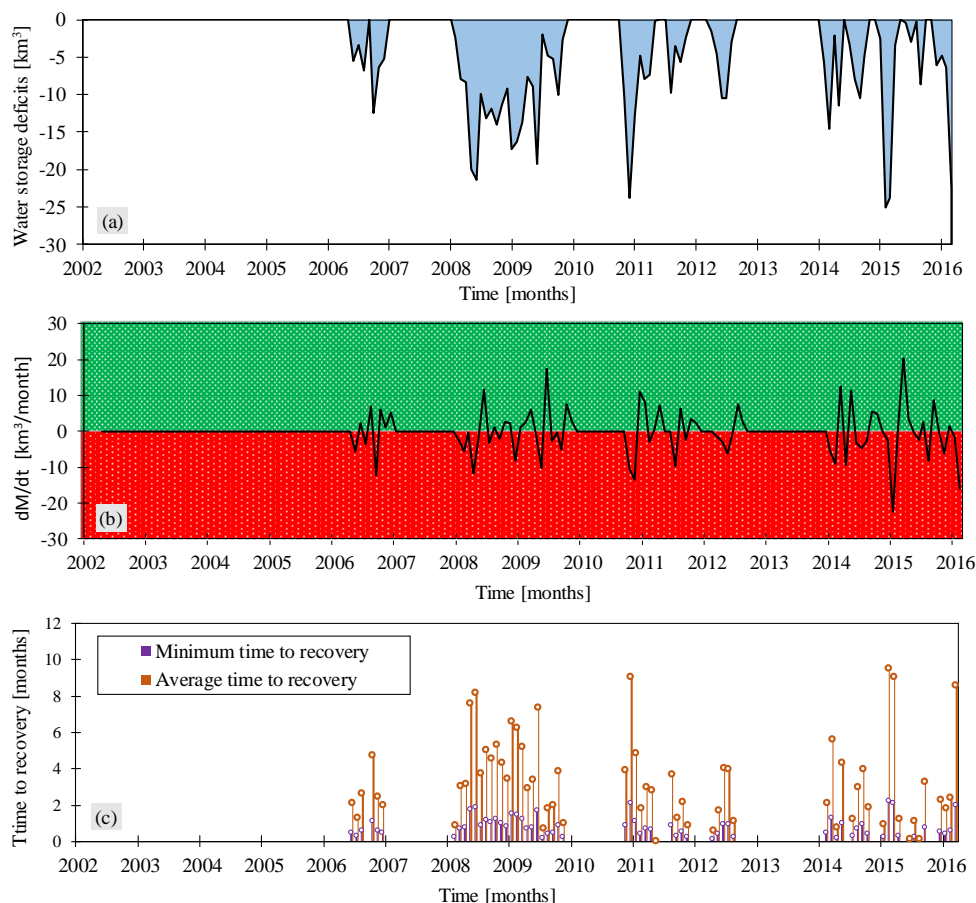


Fig. 5- Time series of deficits (a), monthly rate of change of deficits (b) and time to drought recovery (c)
 شکل ۵- سری زمانی کمبودها (a)، نرخ تغییرات ماهانه کمبودها (b) و زمان لازم برای ترمیم خشکسالی (c)

GRACE را برای توسعه یک سامانه‌ی عملیاتی پایش خشکسالی استفاده کرد. مورد دیگری که باید به آن اشاره شود این است که اطلاعات بارش GPCC و تبخیر و تعرق پتانسیل CRU که در این تحقیق استفاده شدند؛ دارای خطا هستند. اما فرض تحقیق حاضر بر آن است که دقت آنها در پایش خشکسالی قابل قبول است، به نحوی که می‌توان آنها را به عنوان یک مبنای صحیح برای ارزیابی دقت شاخص‌های خشکسالی GRACE مبناء در نظر گرفت.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

هدف از مقاله‌ی حاضر ارزیابی کارایی مشاهدات ماهواره‌ی GRACE در پایش خشکسالی در حوضه‌هایی با مصرف بالای آب بود. بدین منظور حوضه‌ی مرکزی به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب گردید و مشاهدات ماهواره‌ی GRACE بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ برای پایش خشکسالی در این حوضه استفاده گردید. بررسی سری زمانی TWSA حاصل از GRACE نشان داد که در طول دوره مورد بررسی

محدودیت دوم: با اینکه اطلاعات GRACE در سلول‌هایی با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه در دسترس است، اما قدرت تفکیک مکانی مناسب برای آن ۳۰۰ کیلومتر است (Scanlon et al., 2016) بنابراین استفاده از آن در مناطق کوچک احتمالاً با خطا همراه است. محدودیت سوم: با اینکه راه‌حل‌های Mascons دقت محصولات GRACE را افزایش داده است، اما تأثیر خطای نشت در مرزهای حوضه ممکن است وجود داشته باشد. بدین معنی که مقدار تغییر ذخیره‌ی آب در مرزهای حوضه از مناطق خارج از حوضه تأثیر پذیرد. در این رابطه با توجه نرمال‌سازی شاخص‌های خشکسالی، این خطا تأثیر چندانی بر مقادیر شاخص‌ها ندارد، اما ممکن است بر شدت خشکسالی تأثیرگذار باشد. با وجود محدودیت‌های اشاره شده، نتایج این تحقیق نشان داد که طول دوره آماری GRACE برای پایش خشکسالی در حوضه‌ی مرکزی کافی بوده است. همچنین حوضه‌ی مرکزی به قدر کافی وسعت دارد تا GRACE بتواند به خوبی تغییرات ذخیره آب در آن را اندازه‌گیری کند. از این رو با توجه به اینکه اطلاعات این ماهواره با تأخیر زمانی کم نسبت به اطلاعات ایستگاهی در دسترس است، می‌توان مشاهدات

9. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
10. National Aeronautics and Space Administration
11. University of Texas at Austin, Center for Space Research
12. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR)
13. GeoForschungs Zentrum (GFZ)
14. K-Band Ranging System
15. Center for Space Research
16. Jet Propulsion Laboratory
17. Spherical Harmonic Solutions
18. Mass Concentration Solutions
19. Climatic Research Unit
20. Global Precipitation Climate Centre
21. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks-Climate Data Record
22. University of Delaware
23. World Meteorological Organization
24. Modified Drought Severity Index
25. Drought Recovery Tim

۶- مراجع

- Allen R, Smith M, Pereira L, Perrier A (1994) An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2):35-92
- Ashouri H, Hsu KL, Sorooshian S, Braithwaite DK, Knapp K R, Cecil LD, Prat O P (2015) PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(1):69-83
- Awange JL, Schumacher M, Forootan E, Heck B (2016) Exploring hydro-meteorological drought patterns over the Greater Horn of Africa (1979–2014) using remote sensing and reanalysis products. *Advances in Water Resources* 94:45-59
- Bai J, Yuan Y, Di L (2017) Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 16(2):389-397
- Bayissa Y, Tadesse T, Demisse G, Shiferaw A (2017) Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing* 9(7):669
- Byzedi M (2018) Evaluation of drought in western synoptic stations using herbst and neuro-fuzzy method. *Iran-Water Resources Research* 14(1):278-284 (In Persian)

حوضه سالانه ۱۱/۰۴- میلی متر از آب خود را عمدتاً تحت تأثیر عوامل انسانی از دست داده است. به منظور حذف این اثر در پایش خشکسالی، روند سری زمانی مشاهدات این ماهواره حذف گردید. در ادامه بر اساس سری زمانی اصلی و سری زمانی بدون روند TWSA، شاخص‌های DSI و MDSI محاسبه شدند و نتایج آنها با شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های مختلف مقایسه گردید. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص DSI، حوضه تا سال ۲۰۱۰ هیچ خشکسالی را تجربه نکرده است ولی بعد از آن حوضه همواره با خشکسالی روبرو بوده است. این نتایج با نتایج شاخص‌های SPI و SPEI مغایرت داشت. اما نتایج شاخص MDSI هماهنگی خوبی با شاخص SPI و SPEI به خصوص در مقیاس ۱۲ ماهه داشت. به طوری که ضریب همبستگی MDSI با این دو شاخص در مقیاس ۱۲ ماهه به ترتیب به مقدار ۰/۶۹ و ۰/۵۶ رسید، که نشان می‌دهد شاخص MDSI برای پایش خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت مناسب است. شدیدترین خشکسالی شناسایی شده توسط MDSI مربوط به سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹ بود که در این دوره حوضه با کمبود ۲۳۸ کیلومتر مکعبی آب نسبت به میانگین روبرو بوده است. بر اساس نتایج، شاخص MDSI توانایی مناسبی در تشخیص وقایع خشکسالی در حوضه‌ی مرکزی داشته است. از این رو شاخص MDSI بر خلاف شاخص‌های زمینی (دقت بالا/پایش نقطه‌ای) و شاخص‌های ماهواره‌ای پیشین (دقت کم/تر/پایش منطقه‌ای) از هر دو ویژگی دقت بالا و پایش منطقه‌ای برخوردار است. بهره‌مندی از این دو ویژگی می‌تواند وجه تمایز شاخص‌های خشکسالی GRACE مینا از سایر شاخص‌های خشکسالی باشد. در انتها توصیه می‌شود که عملکرد شاخص ارائه شده در این تحقیق در مناطق دیگر کشور و با شاخص‌های خشکسالی دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

۵- تشکر

بدین وسیله از دانشگاه تهران به خاطر حمایت مالی و تهیه امکانات لازم برای انجام این تحقیق و همچنین از مراکز تهیه اطلاعات مورد استفاده تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Gravity Recovery and Climate Experiment
2. Total Water Storage Anomaly
3. Palmer Drought Severity Index
4. GRACE-Based Hydrological Drought Index
5. Drought Severity Index
6. U.S. Drought Monitor
7. Normalized Difference Vegetation Index
8. Standardized Precipitation Index

- time scales. In: Proc. of the 8th Conference on Applied Climatology, 17 January, Boston, USA 179-183
- Mishra AK, Desai VR (2006) Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological Modelling* 198(1-2):127-138
- Missling KD, Daedelow H, Maass H, Richter J, Schlage J (2005) Multimission raw data center for GRACE. *Acta Astronautica* 56(1-2):331-335
- Sakumura C, Bettadpur S, Bruinsma S (2014) Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models. *Geophysical Research Letters* 41(5):1389-1397
- Save H, Bettadpur S, Tapley BD (2016) High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121(10):7547-7569
- Scanlon BR, Zhang Z, Save H, Wiese DN, Landerer FW, Long D, Chen J (2016) Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications. *Water Resources Research* 52(12):9412-9429
- Schneider U, Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, Rudolf BZ (2015) GPCC full data reanalysis version 7.0 at 0.5: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historic data. Computational and Information System Lab, DOI: 10.5065/D6000072
- Shean M (2008) Iran: 2008/09 wheat production declines due to drought. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2015) Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35(13):4027-4040
- Sun Z, Zhu X, Pan Y, Zhang J, Liu X (2018) Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China. *Science of The Total Environment* 634:727-738
- Tapley BD, Bettadpur S, Watkins M, Reigber C (2004) The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters* 31(9):1-4
- Thomas AC, Reager JT, Famiglietti JS, Rodell M (2014) A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters* 41(5):1537-1545
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to
- Chao N, Luo Z, Wang Z, Jin T (2017) Retrieving groundwater depletion and drought in the tigris-euphrates basin between 2003 and 2015. *Groundwater* 1-13
- Chao N, Wang Z, Jiang W, Chao D (2016) A quantitative approach for hydrological drought characterization in southwestern China using GRACE. *Hydrogeology Journal* 24(4):893-903
- Dezfuli AK, Karamouz M, Araghinejad S (2010) On the relationship of regional meteorological drought with SOI and NAO over southwest Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 100(1-2):57-66
- Eicker A, Schumacher M, Kusche J, Döll P, Schmied HM (2014) Calibration/data assimilation approach for integrating GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) using an ensemble Kalman filter: first results. *Surveys in Geophysics* 35(6):1285-1309
- Farokhnia A, Morid S (2014) Assessment of GRACE and GLDAS capabilities for estimation of water balance in large scale areas, a case study of urmia lake watershed. *Iran-Water Resources Research* 10(1):51-62 (In Persian)
- Frenken K (2009) Irrigation in the Middle East region in figures AQUASTAT Survey-2008. *Water Reports* (34)
- Hamed KH, Rao AR (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204(1-4):182-196
- Hao Z, AghaKouchak A, Nakhjiri N, Farahmand A (2014) Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific Data* 1:140001
- Harris I, Jones P, Osborn T, Lister D (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34(3):623-642
- Hashemi Sheikhshabani SA, Morid S, Delavar M (2016) Linking drought monitoring systems to management actions. *Iran-Water Resources Research* 12(1):29-39 (In Persian)
- Hosseini-Moghari SM, Araghinejad S (2015) Monthly and seasonal drought forecasting using statistical neural networks. *Environmental Earth Sciences* 74(1):397-412
- Hosseini-Moghari SM, Araghinejad S, Ebrahimi K (2018) Spatio-temporal evaluation of global gridded precipitation datasets across Iran. *Hydrological Science Journal* 1-20
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to

- Xie H, Longuevergne L, Ringler C, Scanlon B, (2012) Calibration and evaluation of a semi-distributed watershed model of Sub-Saharan Africa using GRACE data. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(9):3083-3099
- Yi H, Wen L (2016) Satellite gravity measurement monitoring terrestrial water storage change and drought in the continental United States. *Scientific Reports* 6:19909
- Zhao M, Velicogna I, Kimball JS (2017) Satellite observations of regional drought severity in the continental United States using GRACE-based terrestrial water storage changes. *Journal of Climate* 30(16):6297-6308
- global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7):1696-1718
- Wilhite DA, Svoboda MD, Hayes MJ (2007) Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21(5):763-774
- Willmott C, Matsuura K (2001) Terrestrial air temperature and precipitation: Monthly and annual time series (1950–1999)(Version 1.02). Center for Climatic Research Department of Geography University of Delaware Newark