مقاله پژوهشی

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۲۹، سال هشتم، زمستان ۱۴۰۰، صص ۴۳-۲۳
Hydrogeomorphology, Vol. 8, No. 29, Winter 2022, pp (23-43)


# ارزیابی تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی با ترکیب داده‌های ماهواره GRACE و مدل هیدرولوژیکی GLDAS نواحی خشک و نیمه‌خشک

## مطالعه‌ی موردی: آبخوان دشت روانسر در استان کرمانشاه

**علیرضا دنیائی**[1]

دکتری مهندسی عمران، کارشناس حفاظت و بهره‌برداری، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، ایران

وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

## چکیده

بررسی تغییرات آب‌زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه‌خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افت سطح آب در آبخوان‌های استان کرمانشاه به‌قدری شدید بوده به‌طوری که در دهه‌های اخیر به حدود۱۰ متر در برخی نقاط رسیده است. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE جهت برآورد ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی آبخوان روانسر در استان کرمانشاه می‌باشد. لذا در این پژوهش ضمن بررسی سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی آبخوان روانسر و نیز پهنه‌بندی مکانی این تغییرات با استفاده از روش کریجینگ در نرم‌افزار GIS وضع موجود منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به‌منظور ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE کدنویسی الگوریتم‌های JPL,GFS,CSR,CRI در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌اینجین صورت گرفت و پس از آن تغییرات ماهانه و سالانه‌ی آب معادل مایع (LWE) محاسبه‌گردید. همچنین مقدار رطوبت خاک(SM) از مدل هیدرولوژیکی GLDAS برآورد گردید و با کسر مقدار رطوبت خاک از مقادیر برآوردی ماهواره GRACE میزان تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی آن به‌دست‌آمد. این پژوهش نشان داده است که نه تنها می‌توان از داده‌های ماهواره GRACE در برآورد میزان تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در آبخوان‌ها استفاده نمود بلکه داده‌های مذکور از دقت قابل قبولی نیز برخوردار مـی‌باشند. مقایسه‌ی نتایج الگوریتم‌های مختلف نشان داد که الگوریتم JPL با ضریب همبستگی ۰/۷۳، بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داراست. ضمناً مقادیر تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی برآوردی از ماهواره GRACE در مقایسه با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده‌ی کاهش ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی معادل ۱/۸- سانتی‌متر بر اساس الگوریتم JPL بوده است.

**کلمات کلیدی**: آب معادل مایع، کریجینگ، GLDAS، ماهواره GRACE، آبخوان روانسر و ایران

* نویسنده‌ی مسئول

**E-mail**:ar.donya@gmail.com

**۱-مقدمه**

نیاز محصولات کشاورزی به آب‌زیرزمینی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده‌ی آب، به‌ویژه در استان کرمانشاه بسیار حائز اهمیت است. در این راستا پایش آب‌های زیرزمینی از طریق ارزیابی داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای امکان‌پذیر است (صراف و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۱۶). در سال‌های اخیر، علم سنجش از دور که در حال حاضر به‌منظور بررسی پوشش گیاهی، منابع آب سطحی، بررسی نوع و بافت خاک، رطوبت خاک، میزان بارش، دما و دیگر پارامترهای مؤثر در مطالعات کشاورزی، هیدرولوژیکی و ... کاربرد دارد در زمینه‌ی سنجش تغییرات ذخیره آب‌زیرزمینی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (دنیائی و صراف، ۲۰۲۱: ۱۸۳). اگرچه شبکه‌های پایش زمینی، اطلاعات زیادی را در اختیار قرار می‌دهد، اما تنها منبع اطلاعاتی برای ارزیابی منابع آب در مناطق کم پایش، داده‌های سنجش از دور است (السدورف و همکاران[1] ۲۰۰۷: ۳۱).

از جمله ماهواره‌هایی که داده‌های سنجش از دور را در اختیار پژوهشگران در سراسر جهان قرار می‌دهد ماهواره ثقل‌سنجی GRACE[2] است. دانشمندان زیادی از داده‌های ماهواره GRACE برای سنجش آب‌زیرزمینی استفاده کرده‌اند. یکی از وظایف این ماهواره ردیابی تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی[3](ΔTWS) است. لذا تاکنون، محبوب‌ترین روش برای ثبت تغییرات ذخیره آب‌زیرزمینی در ماهواره GRACE ثبتΔTWS بوده است. سایر اجزای ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE با استفاده از اطلاعات کمکی یا مدل‌های سطح زمین قابل دسترسی است. ماهواره GRACE و مدل همسان‌سازی داده‌های جهانی[4](GLDAS) دو تکنیک مکانی هستند که اطلاعات مفیدی را درباره‌ی نوسانات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در اختیار محققان قرار می‌دهند. ماهواره GRACE با ارائه ارزیابی کمی از تغییر جامع توده آب در طول زمان، به بیلان منابع آب‌زیرزمینی کمک می‌کند (ترگونینگ و همکاران[5]، ۲۰۲۰: ۵۳). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه‌ی ارزیابی تغییرات آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف با استفاده از ماهواره GRACE انجام شده است.

از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه‌ی حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی (رودل و چن[6]، ۲۰۰۷)، شمال هند (بانجا و موخرجی[7]، ۲۰۱۶؛ رودل و ولیکوگنا[8]، ۲۰۰۹) ، منطقه آتلانتیک میانی (ژیائو و هه[9]، ۲۰۱۵)، آفریقای شرقی (نانتزا و لیناگه[10]، ۲۰۱۶)، حوضه‌ی سند در پاکستان (اقبال و حسین[11]ریال ۲۰۱۶)، فلات تبت (ژیانگ

1- Alsdorf et al.
2- Gravity Recovery and Climate Experiment
3- Terrestrial Water Storage
4- Global Land Data Assimilation System
5- Tregoning et al.
6- Rodell and Chen
7- BhanjaandMukherjee
8- Rodell and Velicogna
9- Xiao and He
10- Nanteza and Linage
11- Iqbal and Hossain

و ونگ[1]، ۲۰۱۶)، مخزن تری گرجس[2] چین (ونگ و لیناگه[3]، ۲۰۱۱)، دشت شمال چین (مویوو و یانگ[4]، ۲۰۰۹؛ فنگ و ژونگ[5]، ۲۰۱۳)، آلبرتا در کانادا (هوانگ و پاولیک[6]، ۲۰۱۶) اشاره کرد.

با مقایسه‌ی تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی حاصل از داده‌های ماهواره GRACE با داده‌های زمینی در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ معلوم گردید که آبخوان‌ها در مناطق مختلف جهان از روند منفی برخوردار خواهند بود (چن و همکاران[7]، ۲۰۱۴). به‌علاوه نتایج حاصل از بررسی تغییرات محلی آب‌زیرزمینی در ایستگاه ووهان چین نشان داد که عملکرد ماهواره GRACE در تخمین تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در منطقه‌ی مناسب بوده است (ژو و همکاران[8]، ۲۰۱۶). از سوی دیگر استفاده از داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های سازمان آب ایالتی مکزیک برای تخمین میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی در این منطقه نشان داد که تخمین ماهواره GRACE با داده‌های زمینی سازگار بوده و برای برنامه‌های مدیریت آب مناسب بوده به‌گونه‌ایکه نتایج این تحقیق مبین تخلیه فزاینده آب‌های زیرزمینی در زمین‌های کشاورزی واقع در شمال مکزیک بوده است (کاستلازی و همکاران[9]، ۲۰۱۸) . در افریقا نیز جهت مطالعه‌ی جامع رودخانه‌ی نیل، تغییرات ذخیره‌ی آب در این رودخانه توسط ماهواره GRACE و اندازه‌گیری بارش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که یک ارتباط قوی بین تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی و میزان تغذیه از طریق بارش وجود دارد (خاکی و همکاران[10]، ۲۰۱۸). مطالعه‌ی داده‌های ماهواره GRACE در مناطق مرکزی و جنوبی هند نیز نشان داد نه تنها داده‌های این ماهواره برای شناسایی فرآیند ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی به اندازه‌ی کافی کارآمد می‌باشد، بلکه پارامتر بارش مهم‌ترین علت در ذخیره‌ی آب در بیشتر این مناطق می‌باشد (بانرجی و کومار[11]، ۲۰۱۸). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که داده‌های ماهواره GRACE به‌گونه‌ای هستند که از آن‌ها می‌توان در ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی و تغییرات آب‌های زیرزمینی نیز استفاده نمود (سان و همکاران[12]، ۲۰۱۸). به‌علاوه بررسی ارتباط بین تغییرات تراز آب‌زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE و میزان بارش در کشور ایران نشان داد که تراز آب‌زیرزمینی در وضع موجود حوضه‌ی آبریز زاینده‌رود به بارش‌های سال قبل بستگی داشته؛ زمانی که بارش روند نزولی دارد، روند نوسانات ذخیره آب‌زیرزمینی به طور گسترده‌تری تحت تاثیر بارش قرار می‌گیرد (آراست و همکاران[13]، ۲۰۲۰). در پژوهشی دیگر از ترکیب داده‌های مدل GLDAS و ماهواره GRACE برای تجزیه و تحلیل تغییرات ذخیره‌ی آب مایع[14] (LWE) در ایران استفاده شد. نتایج نشان‌داد که اولاً کاهش زیاد ذخیره‌ی

1- Xiang and Wang
2- Three Gorges Reservoir
3- Wang and Linage
4- Moiwo and Yang
5- Feng and Zhong
6- Huang and Pavlic
7- Chen et al.
8- Zhou et al.
9- Castellazziet.al.
10- Khaki et al.
11- Banerjee and Kumar
12- Sun et al.
13- Arast et.al.
14- Liquid Water Equivalent

آب و نوسانات شدید سطح آب در شمال ایران در امتداد ساحل دریای خزر محرز می‌باشد، ثانیاً پدیده‌ی تغییراقلیم و پیامد آن فشار جوامع انسانی باعث شده که بیشترین میزان کاهش ذخیره‌ی آب LWE در استان کرمانشاه رخ داده که یک سلسله زمین لرزه در سال‌های (۲۰۱۷، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹) را نیز تجربه کرده‌است (مقیم ۲۰۲۰). در این راستا پردازش داده‌ها در سامانه گوگل‌ارث‌اینجین با استفاده از سه الگوریتم JPL، GFZ و CSR برای آبخوان دشت بیرجند و مقایسه‌ی آن‌ها با داده‌های مشاهداتی (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷) نشان داد که متغیرهای به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های سنجنده GRACE و داده‌های مشاهداتی دارای ضریب همبستگی۶۹ درصدی بوده، به‌علاوه در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ به‌دلیل کمبود بارش‌ها، تغذیه نشدن آبخوان، و اضافه برداشت، سطح ایستابی افت بسیاری کرده است (افتخاری و همکاران ۱۳۹۸). همچنین در پژوهشی دیگر با عنوان ارزیابی منابع آب‌زیرزمینی با استفاده از داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره GRACE در خراسان رضوی، تغییرات سطح آب‌زیرزمینی ماهواره GRACE را در بازه اگوست ۲۰۰۲ تا ژوئن۲۰۱۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های GRACE(CENS) کمترین تخمین و داده‌های GRACE(JPL) بهترین تخمین را بر اساس معیارهای خطا با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. همچنین داده‌های GRACE(CSR) با ارائه روند ۰/۰۸۹- سانتی‌متر در ماه، مطلوب‌ترین پیش‌بینی روند تغییرات ماهانه سطح آب‌زیرزمینی را نشان می‌دهد (نبوی و همکاران، ۱۳۹۹).

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده‌ی توانایی ماهواره GRACE در تحلیل و پایش خشکسالی و همچنین بررسی تغییر تراز آب‌زیرزمینی در مناطق مختلف بوده‌است. لذا، در این پژوهش باتوجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه‌ی مطالعاتی روانسر-که جزء دشت‌های خشک تا نیمه‌خشک کشور بوده و از دیدگاه کشاورزی و باغداری بسیار حائز اهمیت است، ارزیابی و شناسایی تغییرات تراز آب‌زیرزمینی، اهمیت ویژه‌ای دارد، نوسانات آب‌زیرزمینی آبخوان روانسر در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ با ماهواره GRACE پایش و تحلیل شد. برای تحلیل مکانی نوسان آبخوان روانسر، نقشه‌ی پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان تهیه شد.

در این راستا به‌منظور ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در منطقه‌ی مورد مطالعه کدنویسی الگوریتم‌های JPL,GFS,CSR,CRI در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌اینجین صورت گرفت. سپس تغییرات ماهانه و سالانه آب معادل مایع (LWE) محاسبه‌گردید. پس از آن مقدار رطوبت خاک (SM) از مدل هیدرولوژیکی GLDAS برآورد گردید و در نهایت با کسر مقدار رطوبت خاک از مقادیر برآوردی ماهواره GRACE میزان تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی آن به‌دست‌آمد. نکته‌ی حائز اهمیت استفاده ترکیبی کدنویسی الگوریتم‌ها در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌اینجین، محاسبه‌ی تغییرات ماهانه و سالانه‌ی آب معادل مایع و رطوبت خاک منتج از مدل هیدرولوژیکی GLDAS بوده در راستای تعیین میزان تغییرات ذخیره‌ی

آب‌زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی به نوعی نوآوری به‌شمار می‌رود و در پژوهش‌های پیشین به‌چشم نمی‌خورد.

این پژوهش نشان می‌دهد که همانگونه که از علم سنجش از دور و تداخل‌سنجی راداری می‌توان در پهنه‌بندی مناطق مختلف به لحاظ فرونشست حاصل از استفاده بی‌رویه از آب زیرزمینی و پدیده‌ی لوله‌زایی بهره‌برد، با ترکیب روش‌های مشروحه در این پژوهش نیز می‌توان به تغییرات سطح ایستابی آبخوان‌ها پی برد که به لحاظ اقتصادی در کاهش هزینه‌های پژوهشی می‌تواند اثرگذار باشد.

## ۲-مواد و روش

### ۲-۱- منطقه‌ی مطالعاتی

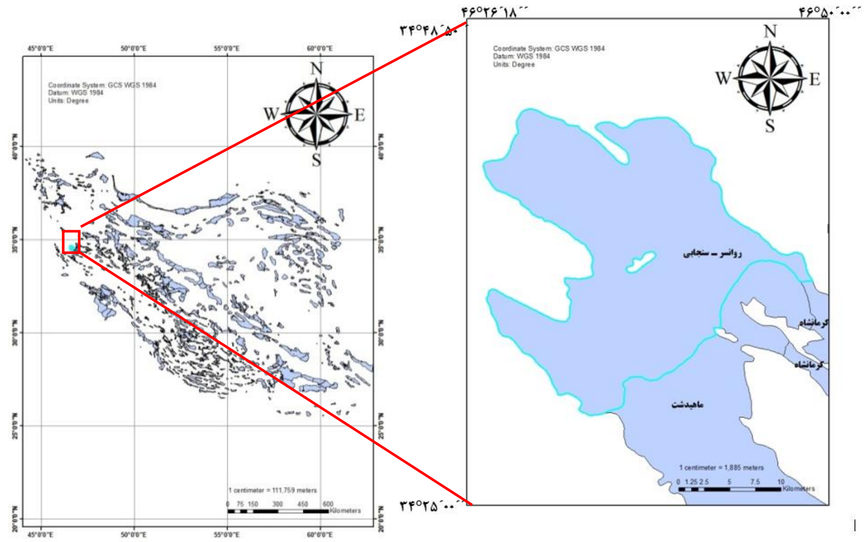
محدوده‌ی مورد مطالعه در شمال غربی شهرستان کرمانشاه (مرکز استان کرمانشاه) بین طول‌های جغرافیایی ″۱۸′۲۶°۴۶ تا ″۰۰′۵۰°۴۶ شرقی و عرض جغرافیایی″۰۰′۲۵°۳۴ تا ″۵۰′۴۸°۳۴ گسترده شده است. این محدوده به صورت یک دشت نسبتاً مستطیلی شکل با کشیدگی شمالی- جنوبی تحت عنوان دشت روانسر-سنجابی شناخته می‌شود.

این محدوده از مرزهای غربی به خطالرأس کوه نواوله، از شمال‌غرب به خطالراس کوه گل‌سفید، از شمال به ارتفاعات مشرف به روستاهای گراب و فیروزه، از شمال شرق به ارتفاعات کوه دزان و ماه زرد، از شرق به ارتفاعات کوه باباحیران و کوه خرانه، از جنوب شرق به خطالراس کوه کوچک و کوه گرده‌حاجی و از ناحیه جنوب در همسایگی دشت ماهیدشت قرار دارد (صراف و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۲).

پست‌ترین نقطه‌ی ارتفاعی این محدوده در مرز جنوب و جنوب شرق با کمتر از ۱۳۲۰ متر ارتفاع از سطح دریا قرار داشته و بلندترین نقطه‌ی آن در ارتفاعات شمال شرق به ارتفاع ۲۶۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است. عمده‌ترین رودخانه‌های حوضه‌ی آبریز محدوده روانسر-سنجابی که از ارتفاعات مشرف به محدوده‌ی طرح سرچشمه می‌گیرد، رودخانه‌های روانسر، میریان، باباعزیز، قره‌دانه، گراب، زردآب و مرک می‌باشند (دنیائی و صراف، ۲۰۲۱d: ۱۱۳).

اقلیم منطقه، نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد است و درجه حرارت متوسط آن بین ۳°C- تا ۱۶°C متغیر است(دنیائی و صراف، ۲۰۲۱c: ۷۲۲). وسعت این حوضه در حدود ۵۶۰ کیلومترمربع است. متوسط بارندگی و دمای سالانه در منطقه به ترتیب ۵۰۷ میلی‌متر و ۱۴/۹ °C است. تعداد ۲۳ حلقه چاه مشاهده‌ای نیز در محدوده موجود است (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰ a: ۸۶).

تعداد ۱۱۹۱ حلقه چاه بهره‌برداری شامل چاه‌های کشاورزی، شرب و صنعتی در دشت روانسر حفاری شده (شکل ۲) که جهت مطالعه تأثیرات اینگونه چاه‌ها بر آبخوان مذکور از تعداد ۲۳ حلقه چاه مشاهده‌ای محفوره در این آبخوان استفاده می‌گردد.




**شکل (۱): آبخوان روانسر  در استان کرمانشاه**

**Fig (1):** Ravansar aquifer in Kermanshah province


**شکل (۲): موقعیت و شبکه چاه‌های بهره‌برداری آبخوان روانسر**

**Fig (2):** Location and network of Ravansar aquifer’s operating wells

### ۲-۲-هیدروگراف معرف

با توجه به حاکم بودن شرایط هیدرولوژیکی متفاوت و همچنین وجود اختلاف شدید در میزان برداشت در نقاط مختلف دشت، هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای بر یکدیگر منطبق نبوده و هیدروگراف هر چاه فقط معرف منطقه محدودی در اطراف همان چاه است. برای رفع این مشکل و محاسبه‌ی تغییرات سطح آب متوسط کل حوضه لازم است از ابزاری که معرف میانگین هیدروگراف تمام چاه‌های حوضه است استفاده کرد، این هیدروگراف میانگین را هیدروگراف معرف می‌نامند. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها جهت رسم هیدروگراف معرف روش تیسن[1]می‌باشد (دنیائی و صراف، ۲۰۲۰b: ۷۲۴ ). در این روش فرض بر این است که ارتفاع آب اندازه‌گیری شده در هر چاه مشاهده‌ای یا پیزومتر معرف سطح نسبتاً وسیعی است. دقت هیدروگراف رسم شده از این روش به فاکتورهای گوناگونی مانندالگوی توزیع چاه‌ها در حوضه، دقت اندازه‌گیری سطح آب و مثلث‌بندی و پلیگون‌بندی بستگی دارد. در ابتدا باید چاه‌های مشاهده‌ای یا پیزومترها را بر روی این نقشه پیاده کرد. سپس با استفاده از GIS شبکه‌ی تیسن رسم شده و مساحت‌های مؤثر هر پیزومتر مشخص می‌گردد. میزان سطح متوسط آب در یک زمان مشخص با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_I * a_i}{A} \quad (۱)$$

که در آن $a_i$ مساحت چند ضلعیiام، $h_i$رقوم سطح آب در هر چاه مشاهده‌ای یا پیزومتر نسبت به سطح مبنا $A$ مجموع مساحت چندضلعی‌ها و n تعداد چاه‌های مشاهده‌ای یا پیزومترها می‌باشند .با محاسبه H برای زمان‌های مختلف می‌توان هیدروگراف **معرف** حوضه را رسم کرد (هنری و همکاران[2] ۲۰۱۱: ۱۳۶)

### ۲-۳- ماهواره GRACE

این ماهواره دوقلو، تغییرات میزان آب را در سطح زمین به صورت غیرمستقیم و با تخمین تغییرات میدان ثقل زمین اندازه‌گیری می‌نماید. داده‌های این ماهواره به صورت ماهانه، با حرکت دو ماهواره که در امتداد یکدیگر حرکت مـی‌نمایند، به‌دست مـی‌آیند. داده‌های ماهواره GRACE به چهار دسته داده‌های سطح صفر، سـطح A-1، سطح B-1 و سطح دو تقسیم می‌شوند. وظیفه پردازش و ذخیره‌سازی این داده‌ها توسط سه مرکز JPL[3] در ناسا، موسسه GFZ[4] در آلمان و مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس آمریکا (UTCSR)[5]صورت می‌گیرد. داده‌های سطح صفر اطلاعات خام و پردازش نشده‌ای است که توسط مرکز RDC[6] در موسسهDLR[7] آلمان

1-Thiesen
2- Henry et al.
3- Jet Propulsion Laboratory
4- Geo Forschungd Zentrum
5- University of Texas at Austin - Center for Space Research
6- Raw Data Center
7- Deutsches Zentrumfür Luft- und Raumfahrt

بایگانی می‌شود. سپس این داده‌ها به واحدهای مهندسی معناداری از قبیل طول کالیبراسیون و فاصله بین دو ماهواره و تغییرات آن‌ها، شـتاب‌های غیرجاذبی و داده‌های جی‌پی‌اس تبدیل شده که به آن‌ها داده‌های سطح A-1 می‌گویند، تبدیل می‌شود. مسئولیت پردازش این دو مرحله بر عهده‌ی JPL و GFZ است. در داده‌های سطح B-1 مشاهدات به صورت صحیح و یکسان زمان‌بندی می‌شوند. داده‌های سطح دو که به علت سختی کار با داده‌های سطح یک اغلب در مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند، از محاسبات پیچیده خاصی بهره می‌برند که با اوصافی نظیر درجه و مرتبه تعریف می‌شود. ماهواره‌های GRACE می‌توانند هرگونه تغییر در جاذبه نقاط مختلف زمین را تشخیص دهند (اشرف‌راده و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۹). ازآنجاییکه با کاهش میزان آب در یک آبخوان، نیروی جاذبه آن نقطه در کره‌ی زمین کاهش می‌یابد (مقیم ۲۰۲۰). ماهواره‌های GRACE با برآورد تغییرات جاذبه‌ی زمین در نقطه مورد نظر توانایی تشخیص تغییرات حجم آبخوان ها را دارند. بر اساس یافته‌های ماهواره‌های GRACE، تعداد ۱۳ عدد از ۳۷ آبخوان بزرگ دنیا، درحال تمام شدن هستند بطوری که، هشت عدد از این سفره‌های آب‌زیرزمینی دیگر توانایی پر شدن به صورت طبیعی را ندارند (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰b: ۳).

جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی از کدنویسی در محیط محاسبات ابری گوگل ارث اینجین استفاده شد. بدینگونه که آبخوان روانسر را به صورت یک شیپ‌فایل در این محیط وارد کرده و سری زمانی داده‌ها و نمودارهای تغییرات ساطح آب زیرزمینی استخراج گردید. نتایج این پژوهش در قسمت ۳ به تفصیل تشریح گشته است.

**۲-۴- مدل همسان‌سازی داده‌های جهانی (GLDAS)**

مدل همسان‌سازی داده‌های جهانی (GLDAS) از داده‌های مشاهده‌ای ماهواره‌ای و همچنین تحقیقات هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی پیشرفته آب و هوا استفاده می‌کند. این مدل درواقع باهدف ادغام محصولات ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی با استفاده از مدل‌سازی و تکنیک‌های پیشرفته همسان‌سازی به‌منظور برآوردهای مطلوب از منابع آب و انرژی طراحی شده است. رطوبت خاک، رواناب و تبخیر-تعرق حاصل از مدل GLDAS تخمینی واقعی از اجزای اصلی ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی برآورد شده توسط ماهواره GRACE را فراهم می‌کند. در واقع ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS مجموع رطوبت لایه‌های از خاک، مقدار تجمعی برف و مجموع آب ذخیره شده در گیاه است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۶۵).

روش‌های متعددی برای مقایسه‌ی نتایج ماهواره GRACE با داده‌های مشاهداتی وجود دارد که در برخی از روش‌ها، بیلان آب با استفاده از خروجی مدلGLDAS محاسبه شده و با خروجی ماهواره GRACE مقایسه می‌گردد. در این پژوهش از روش ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی منتج از مدلGLDAS و خروجی ماهواره‌های GRACE به‌صورت رابطه استفاده شد (دنیائی، ۲۰۲۱: ۴۱۵):

$$GW = TWS - SM \tag{۲}$$

که در آن TWS ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از ماهواره GRACE برحسب سانتی‌متر، SM داده رطوبت خاک حاصل از مدل GLDAS بر حسب سانتی‌متر است – که شامل آب معادل برف[۱] و آب موجود در پوشش گیاهی[۲] می‌باشد که منتج از مدل GLDAS است- و GW سطح آب‌زیرزمینی بر حسب سانتی‌متر است. شبکه‌های ماهانه GRACE و GLDAS برای برآورد GW به صورت ماهانه برای دوره‌ی ۲۰۰۵-۲۰۲۰ و داده‌های مشاهداتی از ۲۳ چاه پیزومتری در آبخوان روانسر برای بررسی صحت‌سنجی داده‌های ماهواره GRACE برداشت شد.

از آنجایی که اصولاً داده‌های ماهواره GRACE مطابق با مختصات جغرافیایی حوضه برای پوشش کامل منطقه در نظر گرفته می‌شود، با توجه به عدم وجود پهنه‌های آبی وسیع در منطقه از رابطه‌ی ۲ در این پژوهش استفاده شده است.

**۲-۵-معادل آب مایع[۳] (LWE)**

یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های ماهواره GRACE این است که این ماهواره توانایی اندازه‌گیری میدان گرانش وابسته به زمان را داراست به‌طوری که با ارزیابی تغییرات جرم سطح کره زمین می‌تواند تغییرات ذخیره آب را برآورد نماید. از بررسی این تغییرات نسبت به زمان می‌توان ضخامت معادل آب مایع (LWE) را برآورد نمود. به بیان ساده‌تر، اندازه‌گیری انحراف جرم از خط پایه، می‌تواند تغییرات ذخیره‌ی آب را نشان دهد. بنابراین می‌توان گفت که ماهواره GRACE توانایی تشخیص میزان تغییرات سطح آب‌زیرزمینی را – حتی بر حسب سانتی‌متر- در نقاط مختلف جهان داراست (مقیم، ۲۰۲۰: ۱۹).

**۲-۶- معیارهای ارزیابی آماری**

در این پژوهش از شاخص‌های عددی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین ($R^2$) به‌منظور تحلیل عددی تغییرات تراز آب‌زیرزمینی استفاده گردید (آراست و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۸).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{n}} \tag{۳}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}|(X_i - Y_i)|}{n} \tag{۴}$$

1- Snow Water Equivalent
2- plant canopy surface water
3- Liquid Water Equivalent

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y}))^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2(Y_i - \overline{Y})^2} \quad (۵)$$

که در آن‌ها $X_i$ مبین iامین داده مشاهداتی، $Y_i$ مبین iامین داده حاصل از شبیه‌سازی، $\overline{X}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\overline{Y}$ میانگین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و $n$ مجموع کل داده‌ها است.

## ۳-یافته‌ها و بحث

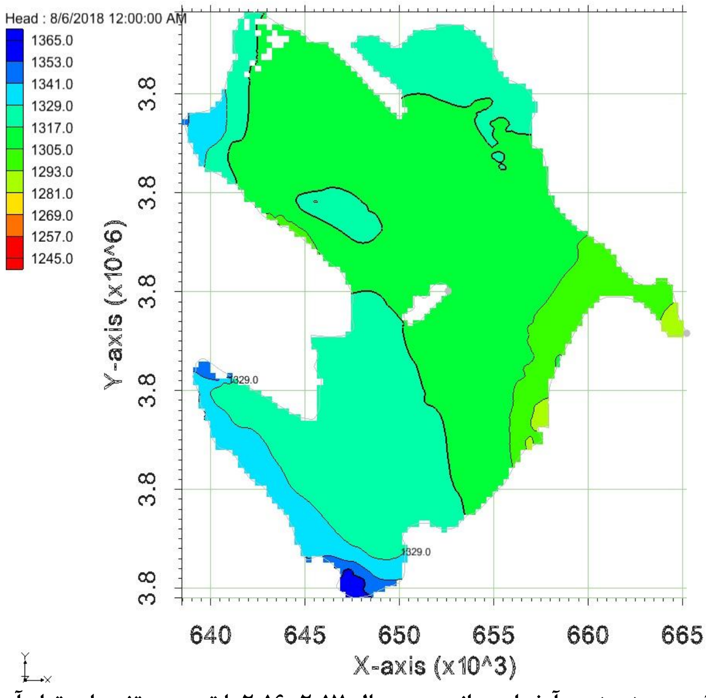
هیدروگراف معرف آبخوان روانسر برای سال ۲۰۰۷-۲۰۱۷ با توجه به مساحت‌های محاسبه شده در پلیگون‌بندی تیسن در منطقه و میزان تراز سطح آب ۲۳ چاه پیزومتری محاسبه‌گردید و در شکل ۳ نشان داده شده‌است.


**شکل(۳): هیدروگراف معرف آبخوان روانسر سال ۲۰۱۷-۲۰۰۷**

**Fig (3):** Ravansar aquifer unit hydrograph (2017-2007)

همانگونه که در هیدروگراف مذکور مشخص است از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ سیر سطح ایستابی آبخوان نزولی بوده و از سال ۲۰۱۵ به بعد تراز آبخوان سیر صعودی از خود نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان در اجرای طرح احیا و تعادل‌بخشی آب زیرزمینی در این آبخوان از سال ۲۰۱۵ به بعد دانست (صراف و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۲). چرا که با اجرای پروژه‌هایی نظیر پر و مسلوب‌المنفعه نمودن چاه‌های غیرمجاز محفوره در آبخوان روانسر و نیز کنترل برداشت از چاه‌های مجاز با نصب تجهیزات کنترلی برداشت آب نظیر کنتورهای حجمی هوشمند و یا کنتورهای هوشمند آب و برق، علیرغم منفی بودن بیلان آب زیرزمینی میزان استحصال آب زیرزمینی مدیریت گشته به طوری که امید است در آینده‌ای نزدیک مجدداً برگشت به تراز ابتدایی دوره محقق گردد.

در نگاه کلی بدیهی است که تاکنون با عنایت به هیدروگراف معرف آبخوان روانسر، تراز سطح آب‌زیرزمینی در این آبخوان روند نزولی داشته بطوری‌که چاه‌های منطقه در اگوست ۲۰۱۵ به شدت دچار کاهش سطح آب شده که معادل ۱۳۰۵ متر می‌باشد. این درحالیست که بیش‌ترین تراز سطح آب ریرزمینی که معادل ۱۳۲۰ متر است در نوامبر ۲۰۰۷ رخ داده است. لذا به‌منظور تعیین تغییرات مکانی سطح آب چاه‌های پیزومتری آبخوان روانسر از روش کریجینگ در نرم‌افزار ARC GIS استفاده‌گردید و این تغییرات در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۶ در شکل ۴ به صورت نقشه‌ی پهنه‌بندی آبخوان روانسر نشان داده شده‌است.



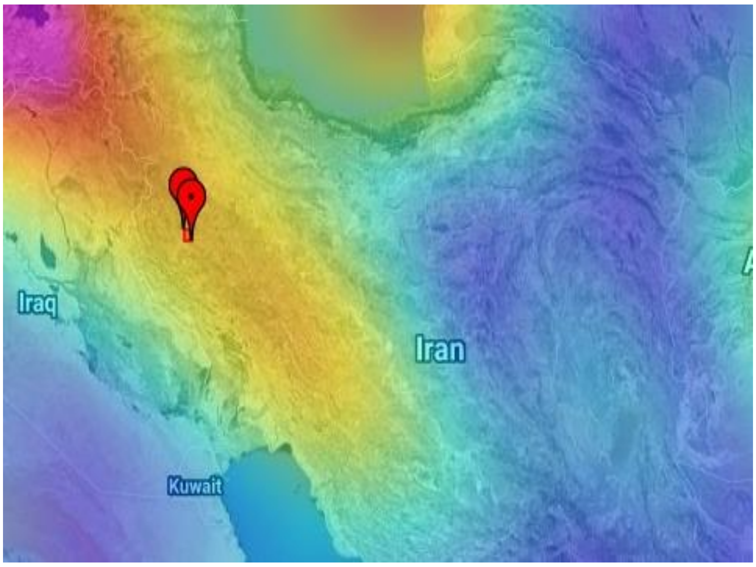

**شکل(۴): نقشه‌ی پهنه بندی آبخوان روانسر در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۶ با توجه به تغییرات تراز آب زیرزمینی**

**Fig (4):** Ravansar aquifer zoning map in 2017-2016 based on changes in groundwater level

همانطور که در نقشه‌ی پهنه‌بندی آبخوان روانسر مشاهده می‌گردد، قسمت‌های جنوبی تا جنوب غرب آبخوان روانسر دارای شرایط مساعدتر و سطح آب بالاتری نسبت به بقیه‌ی قسمت‌های آبخوان است. قسمت مرکزی آبخوان دارای شرایط حادتری می‌باشد. علت این پدیده تراکم چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی است که در فصول خشک به ویژه تابستان استحصال آب می‌نمایند. جهت بررسی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی از کدنویسی در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌اینجین استفاده شد و ضمن تعریف آبخوان روانسر به

صورت یک شیپ فایل در محیط گوگل‌ارث‌اینجین، سری زمانی داده‌ها و نمودارهای تغییرات ذخیره‌ی آب زیرزمینی استخراج گردید.

به‌منظور تحلیل داده‌های ماهواره GRACE در منطقه‌ی مطالعاتی سری‌های زمانی ماهانه این ماهواره در الگوریتم‌های مختلف استخراج گردید و میانگین‌های درازمدت سالانه و ماهانه این مقادیر با مقادیر مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که تحلیل نتایج مکانی تغییرات آب‌زیرزمینی آبخوان روانسر از ماهواره GRACE در الگوریتم‌های مختلف به دلیل قرارگرفتن در یک سلول قابل مقایسه نمی‌باشد به همین دلیل از وبسایت thegraceplotter که قابلیت نمایش این تغییرات را در کل دنیا -با بارگزاری فایل‌های منطقه‌ی مطالعاتی و انتخاب الگوریتم مورد نظر- به صورت نقشه و نمودار داراست، استفاده گردید (شکل ۵).



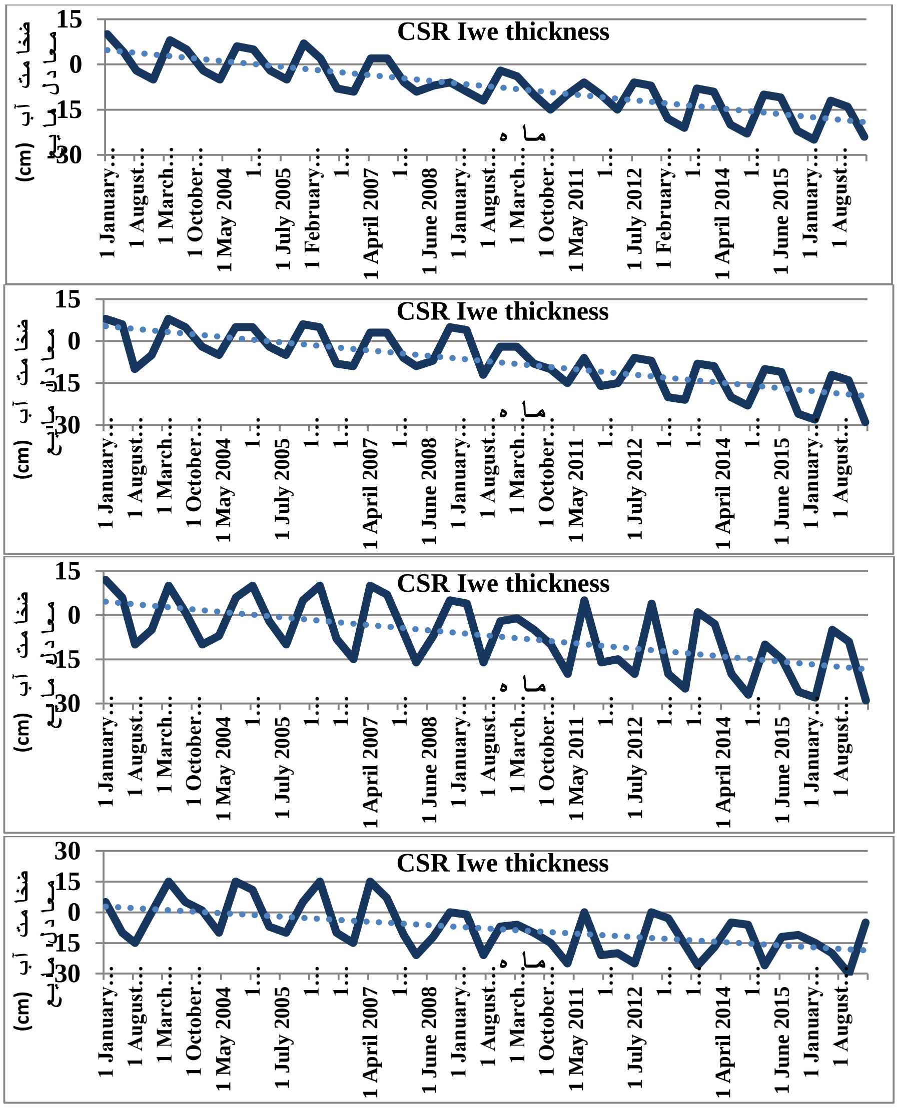

**شکل(۵):. تغییرات سالانه‌ی ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در منطقه‌ی مطالعاتی نسبت به مناطق حاشیه‌ی آن**

**Fig (5):** Groundwater storage annual changes in the study area compared to its marginal area

### ۳-۱- خروجی ماهواره GRACE

تغییرات ضخامت معادل آب مایع (LWE) در نرم‌افزار گوگل‌ارث‌اینجین برای الگوریتم‌های مختلف در منطقه مطالعاتی محاسبه شده و نمودار تغییرات زمانی این پارامتر از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ در شکل ۶ ارائه شده‌است. همانگونه که نمودارهای مندرج در شکل ۶ نشان می‌دهند، در تمامی الگوریتم‌های CSR، GFZ، JPL و CRI از سال ۲۰۰۷ تا انتهای سال ۲۰۱۶ ضخامت معادل آب مایع روند کاملاً نزولی را طی نموده که این مهم با مطالعات آب زیرزمینی طی این سنوات که در هیدروگراف معرف آبخوان روانسر به دست‌آمد کاملاً منطبق می‌باشد. به

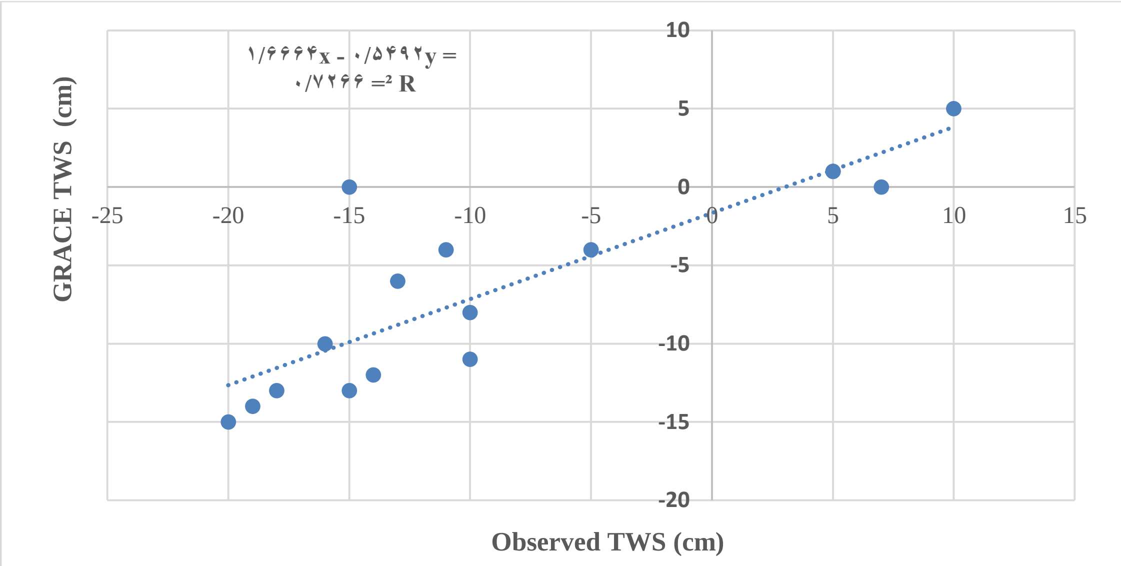
عبارت دیگر داده‌های مشاهداتی کاملاً داده‌های منتج از ماهواره GRACE در خصوص کاهش حجم ذخیره‌ی آب تأیید می‌نمایند.




**شکل(۶): تغییرات ضخامت معادل آب مایع (LWE) حاصل از الگوریتم های مختلف در آبخوان روانسر**

**Fig (6):** Liquid water equivalent variations of Ravansar aquifer resulted by different algorithms

در بین الگوریتم‌های مختلف ماهواره GRACE که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، الگوریتم JPL با مقدار ضریب همبستگی ۰/۷۳ بیش‌ترین شباهت و بهترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی از خود نشان می‌دهد (شکل ۷).

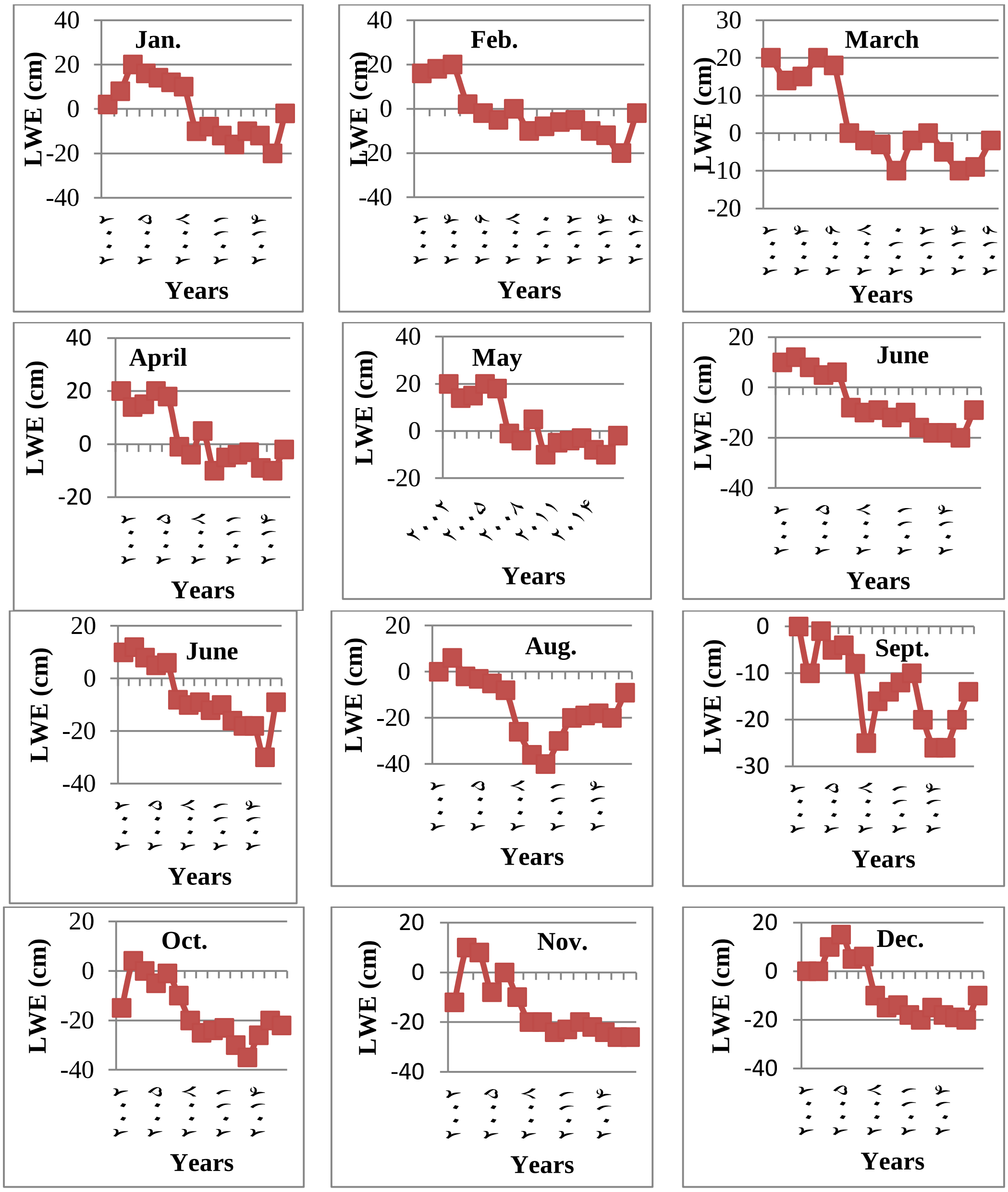



**شکل (۷): همبستگی مقادیر مشاهداتی و برآوردی تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در الگوریتم JPL**

**Fig (7):** Correlation of observational and estimated values of groundwater storage changes in JPL algorithm

میانگین درازمدت ماهانه LWE بر اساس مرکز پردازش داده JPL استخراج شده و در شکل ۸ تغییرات ماهانه ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی آبخوان روانسر را از سال ۲۰۰۲-۲۰۱۶ نشان می‌دهد.

تغییرات ماهانه معادل آب مایع نشان می‌دهد در ماه آگوست بیشترین کمبود تا ۴۰- سانتی‌متر و سپس در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و سپتامبر کمبودها تا ۳۰- سانتی‌متر وجود دارد. در ماه‌های مارس، آوریل و می بهترین شرایط آبخوان در این دوره‌ی زمانی وجود داشته‌است. به عبارت دیگر، کاملاً مشخص است که فصل تابستان کمترین معادل آب مایع در آبخوان روانسر مشاهده می‌شود و با گذر از فصل خشک و شروع فصل بارش در فصل پاییز و زمستان افزایش محسوس معادل آب مایع در آبخوان روانسر کاملاً مشهود است.

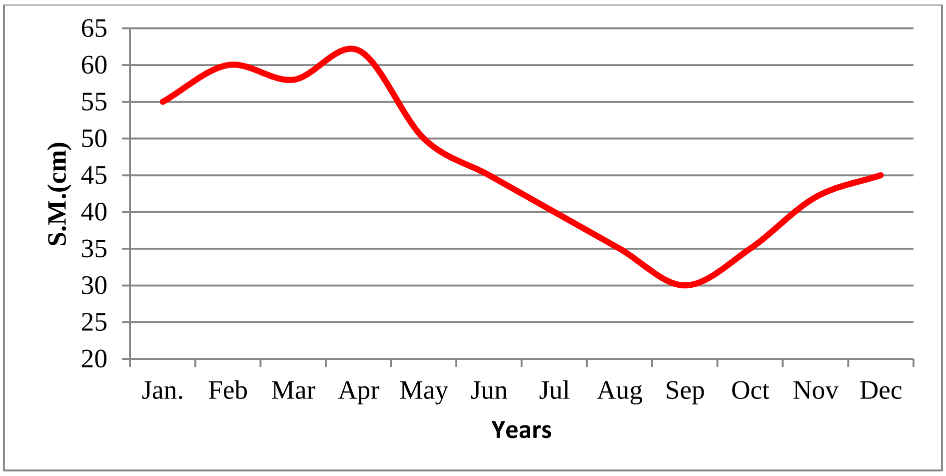



**شکل(۸): دامنه‌ی تغییرات درازمدت معادل آب مایع (LWE) در ماه‌های مختلف در الگوریتم JPL**

**Fig (8):** long-term changes of liquid water equivalent of different months in JPL algorithm

**۳-۲- مقادیر رطوبت خاک (SM)**

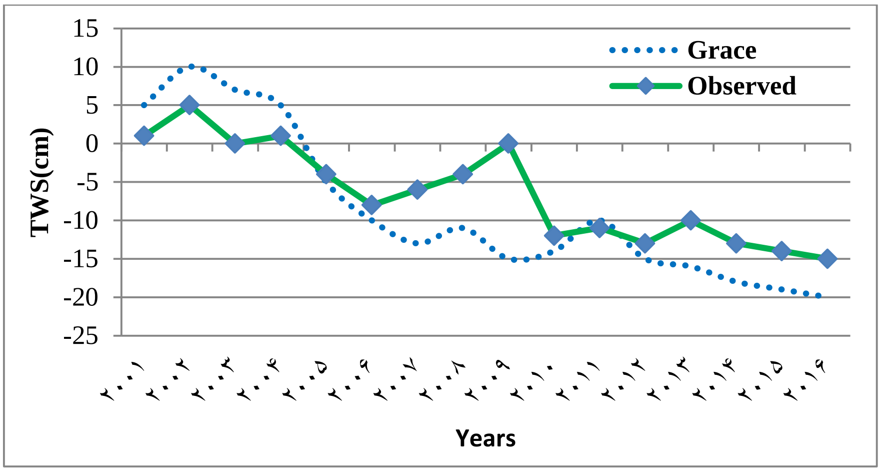
با استفاده از مشاهدات مدل هیدرولوژی GLDAS رطوبت موجود در لایه‌های خاک از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ در منطقه‌ی مطالعاتی با یکدیگر جمع شده و سپس میانگین این مجموع برای ماه‌های سال تحت عنوان مقادیر رطوبت خاک(SM) بدست آمد. همانگونه که از شکل ۹ بر می‌آید، بیشترین رطوبت خاک در ماه آوریل است که این ماه معادل فروردین و شامل بارش‌های بهاری است و نیز مقدار رطوبت خاک از فصل زمستان و ذوب شدن برف‌ها نیز تأثیرگذار است. پس از آن به‌تدریج رطوبت خاک کم شده و در فصل تابستان به حداقل رسیده به‌طوری که کمترین مقدار آن در آخرین ماه فصل تابستان یعنی در ماه سپتامبر به‌وقوع پیوسته است. علت این پدیده‌ی گرم شدن هوا، کاهش بارش، افزایش تبخیر و استفاده از آب موجود در آبخوان در راستای کشت محصولات کشاورزی است که به‌تدریج با ورود به فصل بهار و ورود به تابستان آغاز شده و در انتهای فصل تابستان به حداکثر شدت خود می‌رسد. در نیمه‌ی اول سال آبی از ابتدای فصل پاییز مجدداً میزان رطوبت خاک با افزایش بارش، کاهش دما و تبخیر و از همه مهم‌تر خاموش شدن چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی -که عمده‌ترین سهم در کاهش ذخایر آبی آبخوان را دارد- روند صعودی به خود می‌گیرد. به‌گونه‌ای که در فصل زمستان بالاترین حد رطوبت خاک مشاهده می‌شود.




**شکل(۹): تغییرات رطوبت خاک (SM) حاصل از ماهواره GLDAS**

**Fig (9):** Soil moisture (SM) variations resulted by GLDAS model

با کسر مقدار رطوبت از مقادیر برآوردی GRACE طبق رابطه‌ی (۱) میزان تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی (GW) در مقابل مقادیر مشاهداتی آن در شکل ۱۰ رسم‌گردید. مقدار روند کاهشی سطح آب‌زیرزمینی در ماهواره GRACE بر اساس خروجی مرکز داده JPL معادل ۱/۸- سانتی‌متر در سال برآورد گردیده است.




**شکل(۱۰): تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی مشاهداتی و برآوردی از ماهواره GRACE**

**Fig (10):** Observational and estimated groundwater storage variations by GRACE satellite

### ۳-۳- محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از داده‌های ماهواره GRACE و مقادیر مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای شاخص‌های آماری برآورد شده در جدول ۱ نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص شده بر اساس معیارهای خطا مدل‌های JPL، CSR، CRI و GFZ به ترتیب بهترین تخمین و کمترین میزان خطا را برای داده‌های تراز سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای منطقه داشته‌اند.

**جدول (۱): معیارهای خطای محاسبه شده برای الگوریتم‌های مختلف ماهواره GRACE**

**Table (1):** Calculated error factors for different GRACE satellite algorithms

| $R^2$ | RSME | MAE | Error Factors معیارهای خطا |
|---|---|---|---|
| ۰/۶۲ | ۱۰/۴ | ۹/۸۷ | GRACE(GFZ) |
| ۰/۶۹ | ۵/۷۹ | ۳/۷۱ | GRACE(CRI) |
| ۰/۷۱ | ۴/۸۱ | ۳/۰۱ | GRACE(CSR) |
| ۰/۷۳ | ۳/۱۷ | ۲/۱۱ | GRACE(JPL) |

از سوی دیگر مرور مطالعات و پژوهش‌های سایر محققین نشان داد که نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های افتخاری و همکاران (۱۳۹۸)، نبوی و همکاران (۱۳۹۹) و مقیم (۲۰۲۰) با نتایج حاصل از این پژوهش کاملاً همخوانی داشته و موید دستاوردهای این پژوهش است.

### ۴-نتیجه‌گیری

کمبود آب یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن به حساب می‌آید که به لحاظ عواقب جبران‌ناپذیر آن بر منابع آب

و محیط زیست، به‌گونه‌ای خاص مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که عدم آگاهی از میزان تغییرات آب‌های سطحی و زیرزمینی سبب مدیریت نادرست استفاده از این منابع حیاتی می‌گردد. لذا بررسی تغییرات ذخیره‌ی آب در آبخوان‌های کشور و مدیریت صحیح این منابع ارزشمند از عوامل اصلی توسعه‌ی صحیح و پایدار بحساب می‌آید.

در این پژوهش ضمن بررسی تراز آب زیرزمینی آبخوان روانسر در استان کرمانشاه و نیز پهنه‌بندی مکانی این تغییرات با استفاده از روش کریجینگ در محیط نرم‌افزار GIS وضع موجود منطقه مورد بررسی قرار گرفت. سپس به‌منظور ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE با کدنویسی الگوریتم‌های JPL,GFS,CSR,CRI –که هر یک بیانگر یکی از مراکز داده ماهواره GRACE کی باشند-در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌اینجین مراکز پردازش داده‌های مختلف این ماهواره مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از آن تغییرات ماهانه و سالانه آب معادل مایع محاسبه گردید. نتایج حاصل از مراکز مختلف داده ماهواره GRACE نشان داد که از سال ۲۰۰۷ تا انتهای سال ۲۰۱۶ ضخامت معادل آب مایع روند کاملاً نزولی را طی نموده که این مهم با مطالعات آب‌زیرزمینی طی این سنوات که در هیدروگراف معرف آبخوان روانسر به‌دست‌آمد، کاملاً منطبق می‌باشد. به‌عبارت دیگر داده‌های مشاهداتی کاملاً داده‌های منتج از ماهواره GRACE در خصوص کاهش حجم ذخیره‌ی آب تأیید می‌نمایند.

سپس مقادیر رطوبت خاک از مدل هیدرولوژیکی GLDAS برآورد گردید. نتایج حاصل از این مدل نشان داد که بیشترین رطوبت خاک در ماه آوریل است که شامل بارش‌های بهاری و شروع ذوب برف است و پس از آن به‌تدریج رطوبت خاک کم شده و در فصل تابستان به حداقل رسیده به‌طوری که کمترین مقدار آن در آخرین ماه فصل تابستان یعنی در ماه سپتامبر به‌وقوع پیوسته است. پس از آن با کسر مقدار رطوبت خاک از مقادیر برآوردی ماهواره GRACE میزان تغییرات ذخیره آب‌زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی آن به‌دست‌آمد. نتایج این بخش نشان داد که روند کاهش منابع آب آبخوان روانسر برابر ۱/۸- سانتی‌متر بوده که در مقایسه با تجربیات مشابه که توسط نبوی و همکاران (۱۳۹۹) و نیز افتخاری و همکاران (۱۳۹۸) ارائه گردید کاملاً تأیید می‌گردد. در پژوهش حاضر، بررسی مراکز مختلف پردازش داده ماهواره GRACE نشان داد که مرکز پردازش داده JPL با ضریب همبستگی ۰/۷۳ و معیارهای خطای RMSE=۳/۱۷ و MAE=۲/۱۱ از دقت قابل قبولی برخوردار است. به‌گونه‌ای که این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش نبوی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد.

این پژوهش نشان داده شد که داده‌های ماهواره GRACE می‌تواند برای ارزیابی تغییرات ذخیره‌ی آب‌زیرزمینی در مناطق مختلف نتایج ارزشمندی ارائه دهند. لذا جهت جلوگیری از افت شدید آبخوان روانسر، مدیریت و کنترل برداشت آب از آبخوان و همچنین تداوم اجرای پروژه های طرح احیا و تعادل‌بخشی آب زیرزمینی با حداکثر توان ضروری می‌باشد.

## ۵-منابع


Alsdorf D. E, E. Rodrıguez, & Lettenmaier, D. P. (2007). Measuring surface water from space, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2002, doi:10.1029/2006RG000197.

Arast, M., Ranjbar, A., Mousavi. S. H., Abdollahi, Kh. & Honarbakhsh, A. (2020). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. 173(4), 189-198.

Ashrafzadeh Afshar, A., Joodaki, Gh.R. & Sharifi, M.A. (2020). Evaluation OF Groundwater Resources in Iran using GRACE Gravity Satellite Data, *Journal of Geomatics Science and Technology*. 5(4), 73-84. (In Persian).

Banerjee, D.C. & Kumar, N. (2018). Assessment of Surface Water Storage trends for increasing groundwater areas in India. *Journal of Hydrology*, 562,780-788, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.052.

Castellazzi, P. Longuevergne, L., Martel, R., Rivera, A. & Chaussard E. (2018). Quantitative mapping of groundwater depletion at the water management scale using a combined GRACE/InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 205,408-418.

Chen, Y. Li, W. & Xu, C. (2014). Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin. *Environment Earth Science*, 8, 1–12.

Donyaii, A.R. (2021). Evaluation of climate change impacts on the optimal operation of multipurpose reservoir systems using cuckoo search algorithm. *Environ Earth Sci*. 80, 663. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09951-6.

Donyaii, A. & Sarraf, A. (2021a). Evaluation of Hydro-Climatic Conditions of Gorganroud Catchment under the Effect of Climate Change using MIROC-ESM model. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 204-183. doi: 10.22034/hyd.2021.44082.1572.

Donyaii, A. & Sarraf, A. (2021b). Calibration of WetSpa Distributed Hydrological Model using NSGA-II and Black Widow Multi-Objective Optimization Algorithms. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(3), 721-736.

Donyaii, A. & Sarraf, A. (2021c). Calibration of WetSpa Distributed Hydrological Model using NSGA-II and Black Widow Multi-Objective Optimization Algorithms. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(3), 721-736.

Donyaii, A. & Sarraf, A. (2021d). Management of Reservoir Operation System under Climate Change Conditions Using Dolphin Echolocation Optimization Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, In press.

Donyaii, A., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2020a). Evaluation of Whale, Fruit Fly and Cuckoo Search Algorithms in Optimizing Multi-Objective Operation of Golestan Dam Reservoir Based on Multi-Criteria Decision-Making Method. *Water Resources Engineering*, 13(47), 85-100.

Donyaii, A., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2020b). Presenting a new hybrid evolutionary algorithm in optimizing reservoir operation based on new combinative distance-based assessment (CODAS). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 1-23. doi: 10.22069/jwsc.2020.17982.3359.

Donyaii, A., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2021).Operation of the Golestan Dam Reservoir in Climate Change Conditions Using an Improved Multi-Objective Whale Optimization Algorithm. *jwmr*. 12 (23), 238-250 URL: http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-1085-en.html.

Eftekhari, M., Madadi, K. & Akbari, M. (2019). Monitoring the Fluctuations of the Birjand Plain Aquifer Using the GRACE Satellite Images and the GIS Spatial Analyses. *Watershed Management Research Journal*, 32(4), 51-65. doi: 10.22092/wmej.2019.126204.1218.

Faraji, Z., Kaviani, A. & Shrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province, *Iranian Journal of Ecohydrology*. 4(2), 463-476.

Feng, W. & Zhong, M. (2013). Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resources Research*. 49, 110–2118.

Henry, C. M., Allen, D. M. & Huang, J. (2011). Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data, *Hydrogeology Journal*. 19(4), 741–755.

Huang, J.L. & Pavlic, G. (2016). Mapping groundwater storage variations with GRACE: A case study in Alberta, Canada. *Hydrogeology Journal*. 24, 1663–1680.

Iqbal, N. & Hossain, F. (2016). Satellite Gravimetric Estimation of Groundwater Storage Variations Over Indus Basin in Pakistan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(8), 3524–3534.

Khaki, M., Awange, J., Forootan, E. & Kuhn, M. (2018). Understanding the association between climate variability and the Nile's water level fluctuations and water storage changes during 1992–2016. *Science of the Total Environment*, 645(15), 1509-1521.

Moghim, S. (2020). Assessment of Water Storage Changes Using GRACE and GLDAS. *Water Resources Management* 34, 685–697.

Nabavi, S.N., Alizadeh, A., FaridhosseinI, A.R. & Faridhosseini, A.R. (2020). Evaluation of Groundwater Resources using GRACE Satellite Gravimetric Data (Case Study: Khorasan Razavi), *J Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 14(3), 855-866.

Nanteza, J. & Linage, C.R. (2016). Monitoring groundwater storage changes in complex basement aquifers: An evaluation of the GRACE satellites over East Africa. *Water Resources Research*. 52, 9542–9564.

Sarraf, A., Donyaii, A., Mardanifar, M. (2020). Evaluation of Crisis Resolution Strategies for Groundwater Revival Plan Using Fuzzy Best - Worst Multi Criteria Decision Model. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(3), 21-44. doi: 10.22055/jhs.2020.35415.1149.

Sarraf, A., Ghasemi, H., Donyaii, A. (2021). Calibration of IHACRES Hydrological Model Using Social Spider and Search and Rescue Multi-Objective Optimization Algorithms. *Hydrogeomorphology*, In Press. doi: 10.22034/hyd.2021.45015.1581.

Sun, Z., Zhu, X., Pan, Y., Zhang, J. & Liu, J. (2018). Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 634(1), 727-738, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.292.

Tregoning, P., Mc Clusky S., vanDijk A., Crosbie, RS. & Peña-Arancibia, JL. (2012). Assessment of GRACE Satellites for Groundwater Estimation in Australia, Waterlines report; National Water Commission: Canberra, Australia, 36(15), 82- 89, https://doi.org/10.1029/2009GL038718.

Wang, X.W. & Linage, C.L. (2011). Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) detection of water storage changes in the Three Gorges Reservoir of China and comparison with in situ measurements. *Water Resources Research*. 47, 1–13.

Xiang, L.W., Wang, H.S. (2016). Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. *Earth and Planetary Science Letters – Journal*. 449, 228–239.

Xiao, R.Y. & He, X.F. (2015). Monitoring Groundwater Variations from Satellite Gravimetric and Hydrological Models: A Comparison with in-situ Measurements in the Mid-Atlantic Region of the United States. *Remote Sens*. 7, 686–703.

Zhou, J. Sun, H., Xu, J. & Zhang, W. (2016). Estimation of local water storage changes by space-&ground-based gravimetric. *Journal of Applied Geophysics*, 131, 23-28.