

به نام خداوند

مدرسه فصلی آب

کاربرد سنجش از دور در پایش آبهای زیرزمینی

محمدابراهیم بهبهانی

شهرکرد، پاییز ۱۴۰۴

۱۵ کشور دارای بیشترین میزان برداشت سالانه آب زیرزمینی (سال ۲۰۱۰)

- آب زیرزمینی پربرداشت‌ترین ماده خام جهان است و نرخ برداشت آن در حال حاضر در حدود ۹۸۲ کیلومتر مکعب در سال برآورد می‌شود.

Margat, J., and J. van der Gun. 2013. Groundwater around the World. CRC Press/Balkema.

- حدود ۷۰ درصد از آب زیرزمینی برداشت‌شده در سراسر جهان برای کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب زیرزمینی تقریباً نیمی از آب آشامیدنی جهان را تأمین می‌کند. در سطح جهانی، حدود ۳۸ درصد از اراضی آبیاری‌شده با استفاده از آب زیرزمینی تجهیز شده‌اند.

Gleeson, T., K.M. Befus, S. Jasechko, E. Luijendijk, and M.B. Cardenas. 2016. The global volume and distribution of modern groundwater. Nature Geoscience 9, no. 2: 161-167.

<https://www.ngwa.org/>

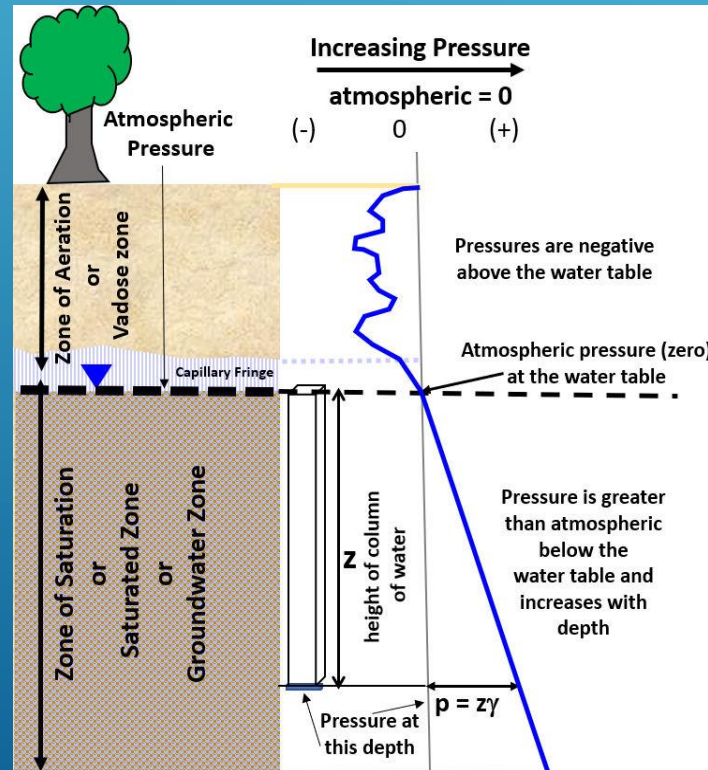
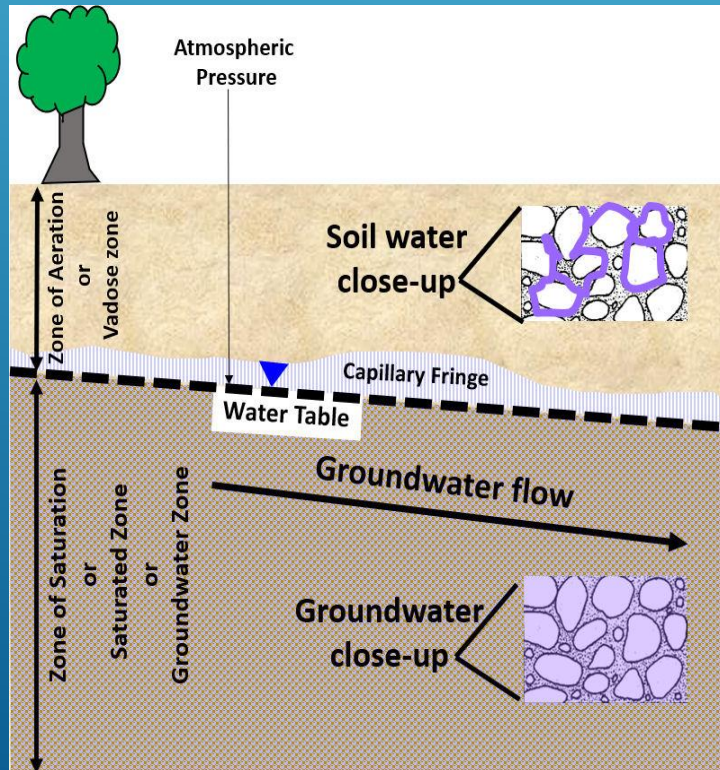
Country	Population 2010 (in thousands)	Estimated groundwater extraction 2010 (km ³ /yr)	Groundwater extraction		
			Breakdown by sector		
			Groundwater extraction for irrigation (%)	Groundwater extraction for domestic use (%)	Groundwater extraction for industry (%)
India	1224614	251.00	89	9	2
China	1341335	111.95	54	20	26
United States	310384	111.70	71	23	6
Pakistan	173593	64.82	94	6	0
Iran	73974	63.40	87	11	2
Bangladesh	148692	30.21	86	13	1
Mexico	113423	29.45	72	22	6
Saudi Arabia	27448	24.24	92	5	3
Indonesia	239871	14.93	2	93	5
Turkey	72752	13.22	60	32	8
Russia	142985	11.62	3	79	18
Syria	20411	11.29	90	5	5
Japan	126536	10.94	23	29	48
Thailand	69122	10.74	14	60	26
Italy	60551	10.40	67	23	10

Margat, J., and J. van der Gun. 2013. Groundwater around the World. CRC Press/Balkema

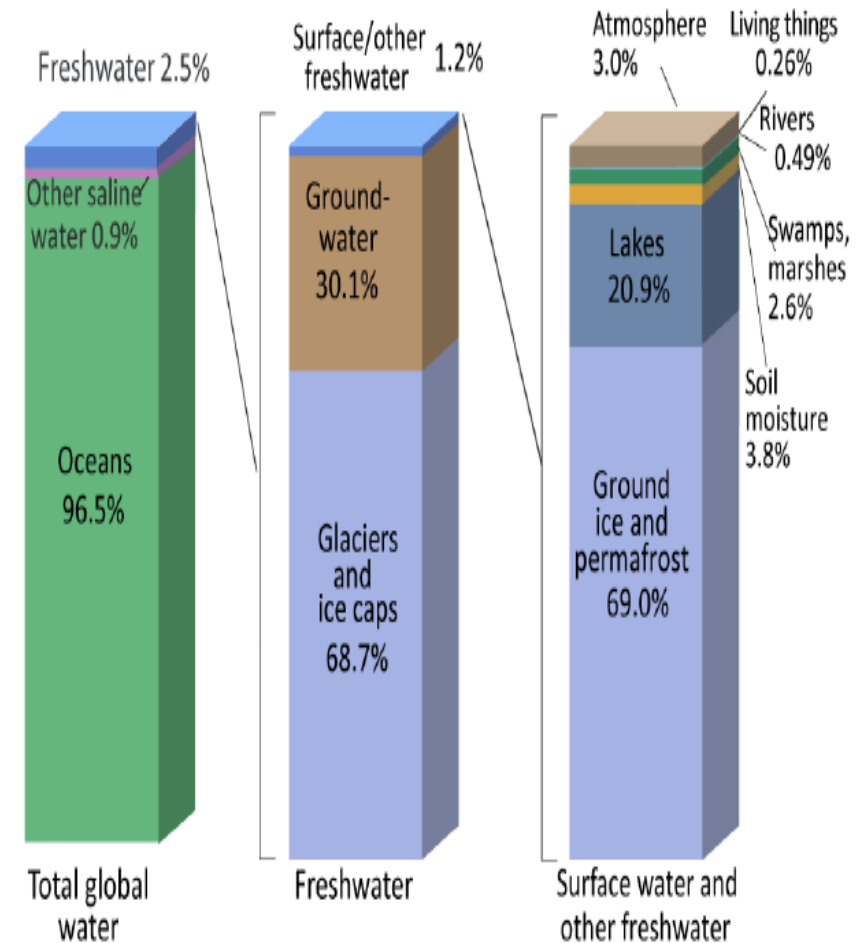
آب زیرزمینی، آبی است که در زیر سطح زمین قرار دارد و فضاهای خالی، شکاف‌ها و سایر منافذ موجود در خاک و سازندهای سنگی را پر می‌کند و می‌تواند تحت تأثیر نیروی گرانش و فشار حرکت کند.

Todd, D.K. & Mays, L.W. (2005). *Groundwater Hydrology*. 3rd Edition

حجم کل آب زیرزمینی در عمق بالایی ۲ کیلومتری پوسته قاره‌ای حدود ۲۲۰۶ میلیون کیلومتر مکعب برآورد شده است که از این مقدار، ۵ میلیون کیلومتر مکعب آن سنی کمتر از ۵۰ سال دارد. (Gleeson et al., 2016)



Where is Earth's Water?



Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. (Numbers are rounded).

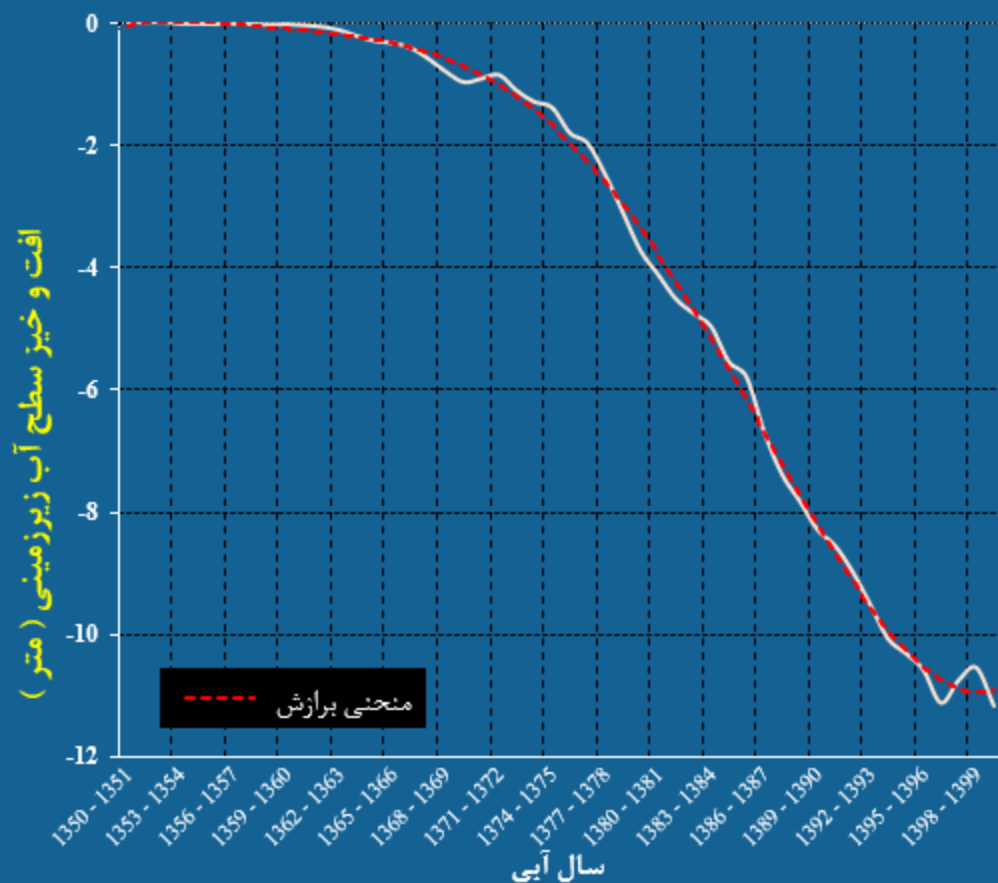
تعداد و تخلیه (بهره برداری) - ارقام بهره برداری به میلیون متر مکعب

منبع	چاه		قنات		چشمه		مجموع	
	تعداد	تخلیه	تعداد	بهره برداری	تعداد	بهره برداری	تعداد	بهره برداری
تعداد و تخلیه	۱,۰۲۱,۵۹۶	۴۱,۵۲۳.۰۶	۴۵,۴۱۳	۳,۷۲۳.۳۸	۲۳۱,۰۹۵	۱۴,۱۰۱.۴۳	۱,۲۹۸,۱۰۴	۵۹,۳۴۷.۸۸

آماربرداری مرحله سوم از منابع و مصارف آب های سطحی و زیرزمینی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۱

تغییرات تجمعی افت و خیز سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های آبرفتی

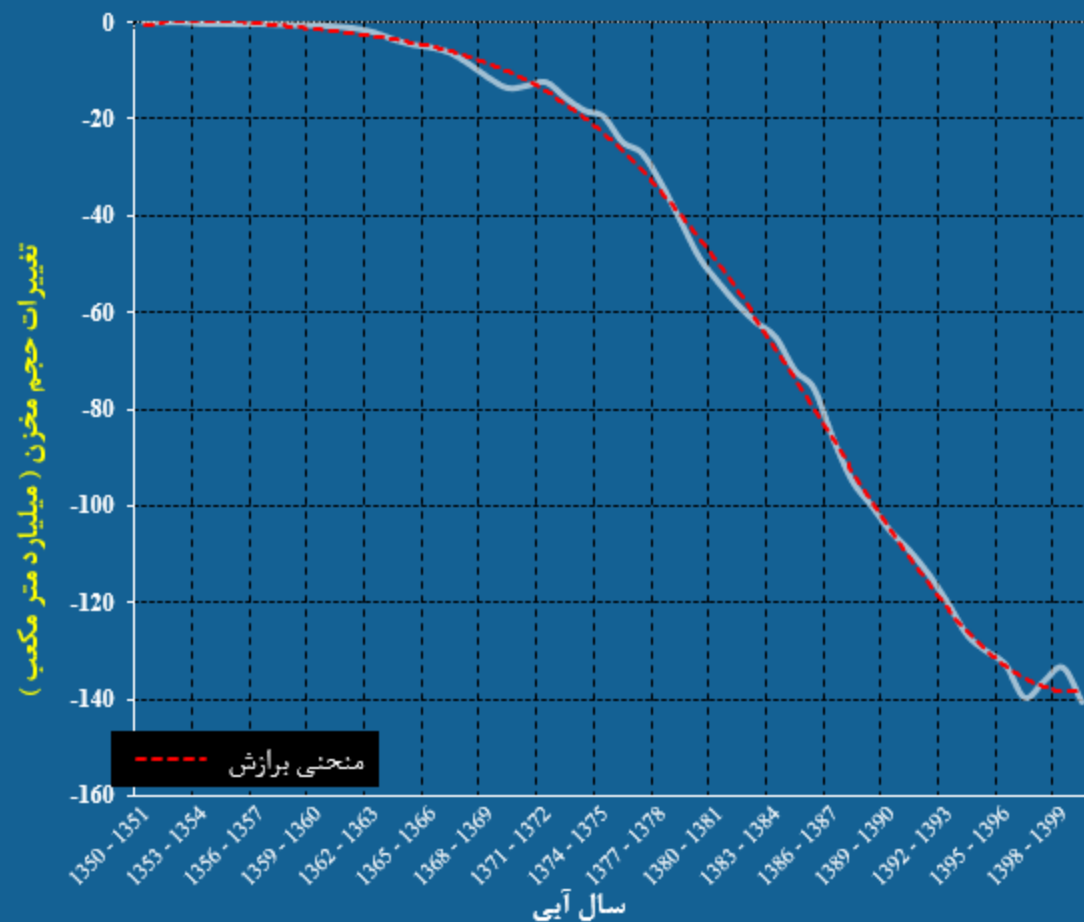
کشور



متوسط تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی (متر)

-۰.۳۸

تغییرات تجمعی حجم مخزن آبخوان‌های آبرفتی کشور



متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن (میلیارد متر مکعب)

-۴.۷۱

ضرورت پایش آب های زیرزمینی

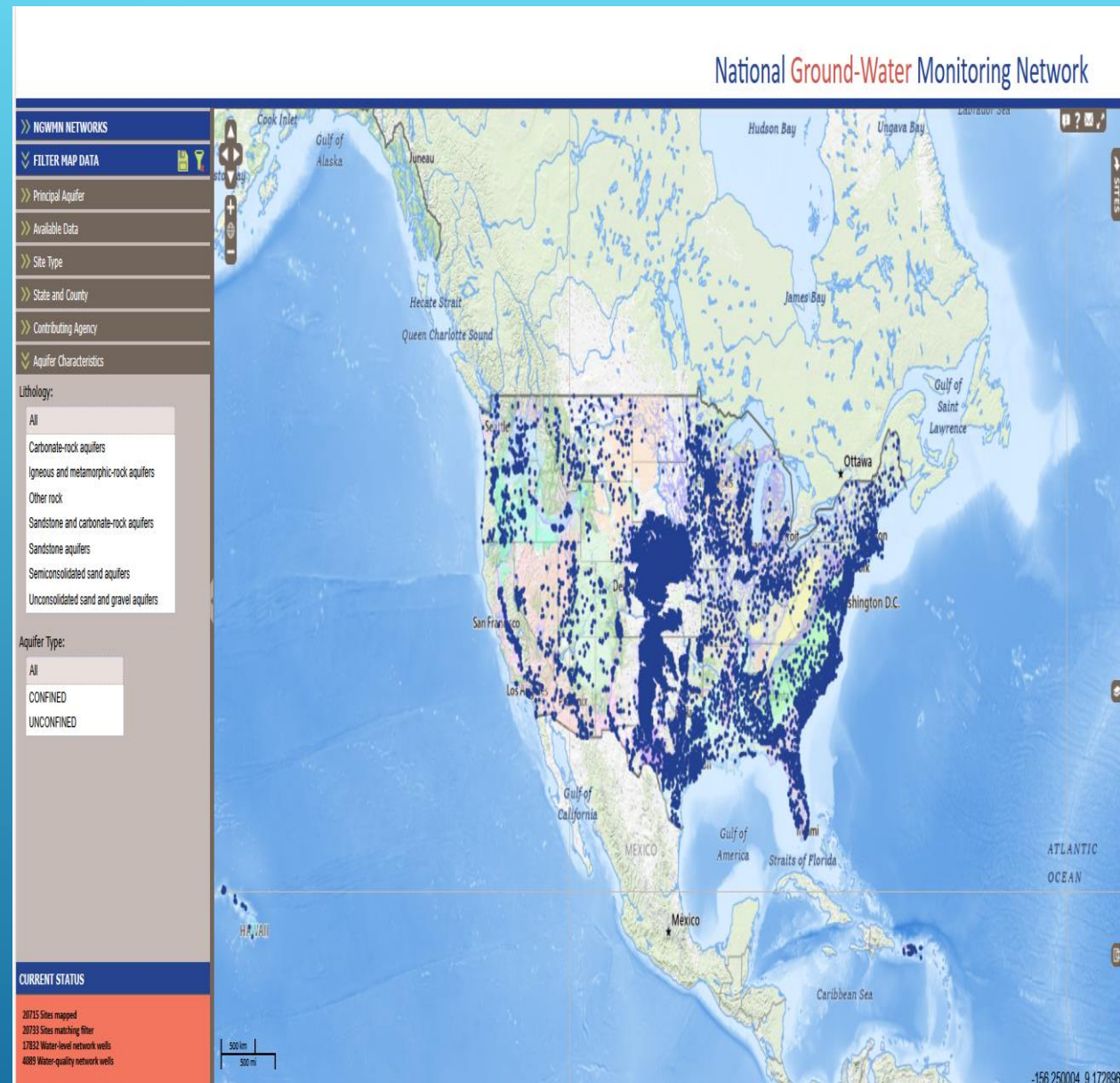
اهمیت پایش	بعد	
فراهم سازی داده های پایه برای مدل سازی عددی، تحلیل روندها و ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی	علمی و پژوهشی	۱
پشتیبانی از تصمیم گیری آگاهانه در تخصیص منابع، برنامه ریزی برداشت و حفاظت از آبخوان ها	مدیریتی	۲
پیشگیری از افت سطح آب زیرزمینی، شوری، فرونشست زمین و تخریب اکوسیستم های وابسته	زیست محیطی	۳
تضمین پایداری تولید کشاورزی، امنیت معیشتی و کاهش تعارضات بین بهره برداران	اجتماعی و اقتصادی	۴
ارتقای شفافیت، پاسخ گوئی، و امکان سیاست گذاری و نظارت مبتنی بر داده های واقعی	حکمرانی آب	۵

- در پایش آب‌های زیرزمینی به‌طور سنتی، از چاه‌های آب برای پایش تراز آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. اما پایش و مدیریت این منابع با چالش‌هایی همراه است:

• هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن، دسترسی محدود به داده‌های میدانی و همچنین پیچیدگی شرایط هیدروژئولوژیک

- در این شرایط، فناوری سنجش از دور (Remote Sensing) به‌عنوان یک ابزار قدرتمند مطرح شده است که امکان مشاهده، تحلیل و پایش آب‌های زیرزمینی را در مقیاس‌های منطقه‌ای تا جهانی تسهیل می‌کند.

- هیچ اندازه‌گیری مستقیمی از آب‌های زیرزمینی با استفاده از مشاهدات سنجش از دور وجود ندارد.



روش‌های سنجش از دور فضایی و هوایی برای مطالعه و پایش آبهای زیرزمینی زیرزمینی

تکنیک	قابلیت‌ها	مزایا	معایب
اندازه‌گیری‌های گراویمتریک	GRACE و GRACE-FO: تغییر ذخیره آب زیرزمینی را با استفاده از اندازه‌گیری‌های گراویمتریک در رزولوشن ۳۰ روزه و مساحت تقریبی (۳۰۰ کیلومتر مربع) اندازه‌گیری می‌کند.	امکان مشاهده تصویر کلی از ناهنجاری‌های ذخیره آب زیرزمینی در سطح جهان.	مقیاس فضایی باعث می‌شود استفاده در آبخوان‌های کوچک بدون مدل‌سازی اضافی دشوار باشد و تغییرات جرمی با فرکانس بالا ثبت نمی‌شوند.
اندازه‌گیری تغییرات سطحی زمین	تغییرات حرکت زمین برای تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دنبال می‌شود. تغییرات ناشی از تغییر فشار منفذی و تنش مؤثر با تغییر ذخیره آب زیرزمینی است. زیرتکنیک‌ها شامل: InSAR (ثبت تغییرات میلی‌متری در رزولوشن مسیر متر)، GNSS (اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای در سطح جهانی)، رادار ارتفاع‌سنجی (< ۱ سانتیمتر/سال در رزولوشن مسیر ۱ کیلومتر) لیدار (رزولوشن ۳ سانتیمتر در شبکه‌های ۱ کیلومتری، ICESat-۲).	امکان ثبت پیوسته تغییرات سطحی زمین. رزولوشن زمانی و مکانی بالا (یا تراکم ایستگاه‌ها در GNSS) امکان استفاده مؤثر در مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌کند.	نیاز به شناخت مناسب ویژگی‌های زمین‌شناسی برای ارتباط دقیق پاسخ‌های غیرخطی تغییر سطح زمین با تغییرات ذخیره آب زیرزمینی.

روش‌های سنجش از دور فضایی و هوایی برای مطالعه و پایش آبهای زیرزمینی

تکنیک	قابلیت‌ها	مزایا	معایب
سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد (AEM)	رسانایی الکتریکی برای تخمین سطح آب اندازه‌گیری می‌شود. امکان بررسی آبخوان‌های کم عمق (۱-۳ متر) و عمیق (۳۰۰-۴۰۰ متر) وجود دارد.	امکان بررسی سریع مناطق وسیع با هزینه کم.	نیاز به شناخت دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان. ظرفیت محدود در سیستم‌های شور.

1. GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

✓ راه‌اندازی و دوره عملیاتی: در مارس ۲۰۰۲ به‌عنوان مأموریتی مشترک بین ناسا و مرکز هوافضای آلمان (DLR) پرتاب شد و تا اکتبر ۲۰۱۷ فعال بود.

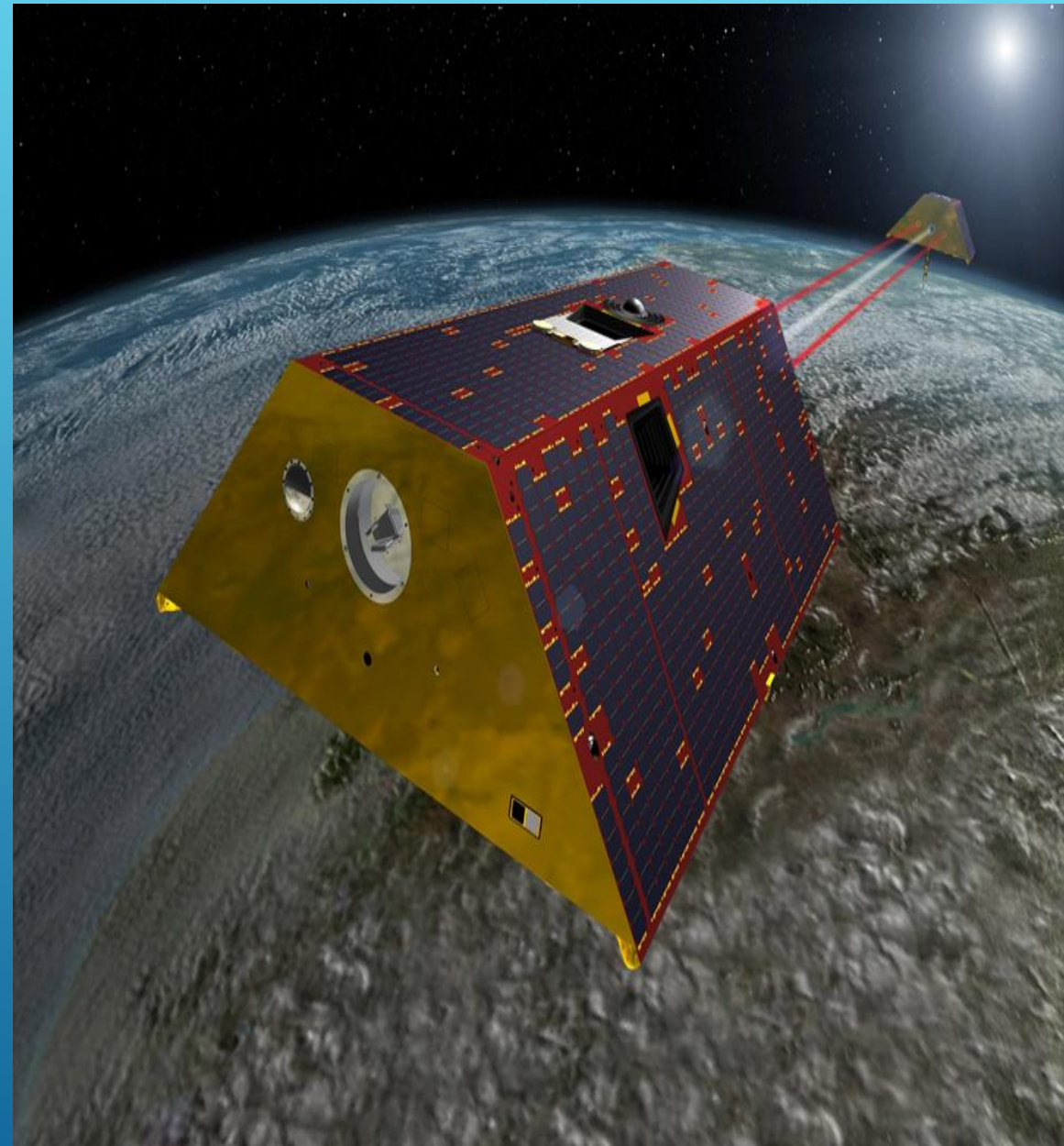
✓ هدف: اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانشی زمین برای پایش تغییرات توزیع جرم، با تمرکز اصلی بر ذخیره آب زمینی (TWS)، یخچال‌های طبیعی و جرم اقیانوس‌ها.

✓ ابزارها و روش‌ها:

- دو ماهواره که به‌صورت جفت با فاصله تقریباً ۲۲۰ کیلومتر از هم حرکت می‌کنند.
- اندازه‌گیری تغییرات فاصله بین ماهواره‌ها با استفاده از سیستم رادیویی بسیار دقیق.
- تغییرات گرانشی از طریق شتاب‌های کوچک که بر فاصله ماهواره‌ها اثر می‌گذارند، شناسایی می‌شود.

✓ کاربردها:

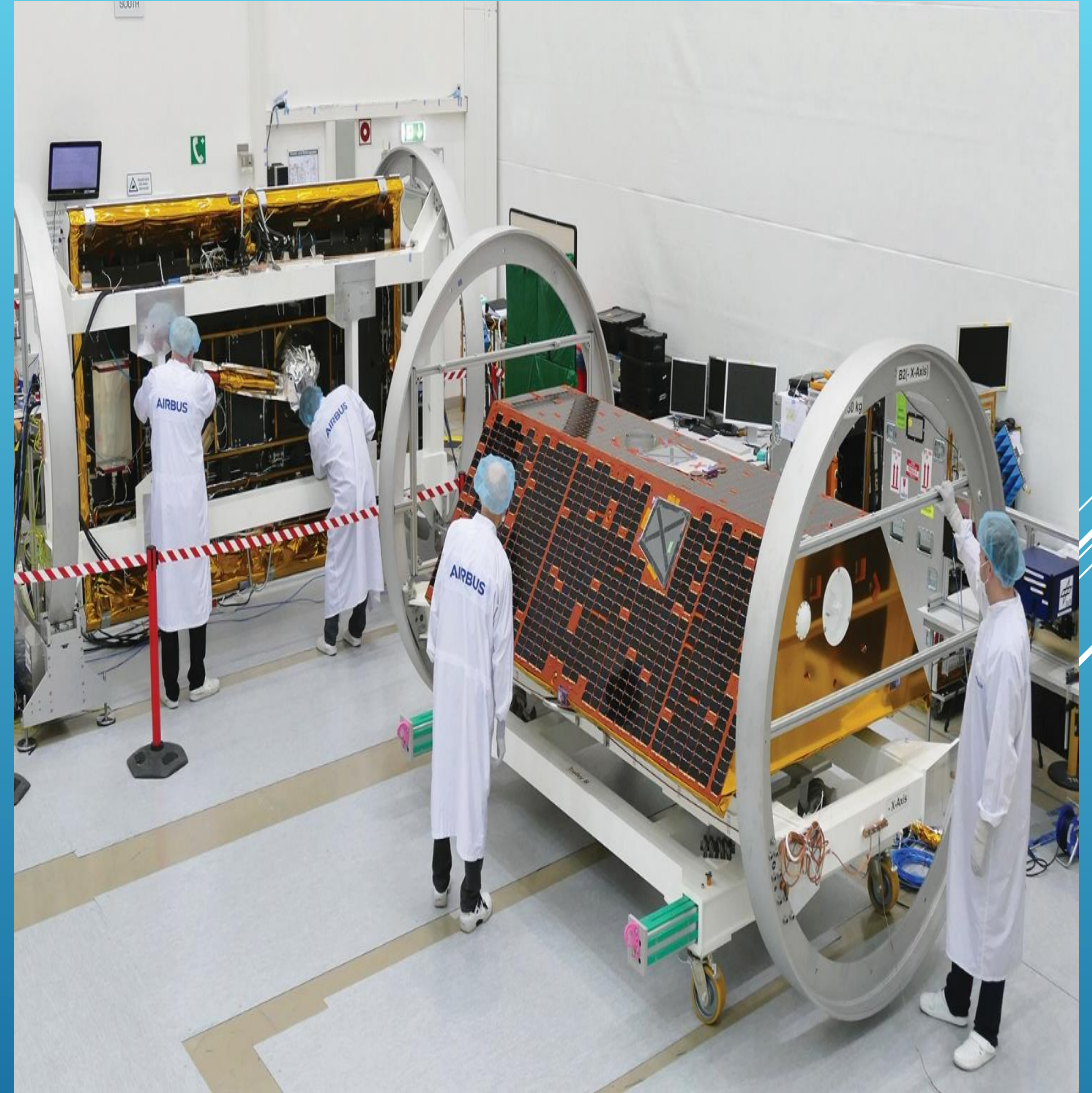
- برآورد کاهش و تغذیه مجدد آب زیرزمینی.
- پایش از دست دادن جرم یخ در گرینلند و قطب جنوب.
- نظارت بر تغییرات سطح دریا و چرخه‌های بزرگ هیدرولوژیکی.



مروری بر مأموریت‌های GRACE و GRACE-FO

۲. GRACE-FO (Follow-On)

- ✓ راه‌اندازی و دوره عملیاتی: در مه ۲۰۱۸ به‌عنوان ادامه مأموریت GRACE با طراحی و اهداف مشابه پرتاب شد.
- ✓ بهبودها:
 - شامل یک تداخل‌سنج لیزری (LRI) به‌عنوان ابزار آزمایشی برای اندازه‌گیری فاصله با دقت بالاتر.
 - ادامه پایش ذخیره آب زمینی، یخچال‌های طبیعی و تغییرات سطح دریا.
- ✓ اهمیت: اطمینان از تداوم داده‌های GRACE برای مطالعه روندهای بلندمدت منابع آب زمین.
- ✓ ویژگی‌های کلیدی هر دو مأموریت:
 - رزولوشن فضایی: تقریباً ۱۵۰,۰۰۰ کیلومتر مربع برای هر اندازه‌گیری (ماهانه).
 - رزولوشن زمانی: ماهانه.
 - مهم‌ترین سهم: ارائه مشاهدات جهانی از تغییرات ذخیره آب زمینی، امکان ارزیابی کاهش آب زیرزمینی، خشکسالی‌ها و مدیریت منابع آب.



GRACE و GRACE-FO

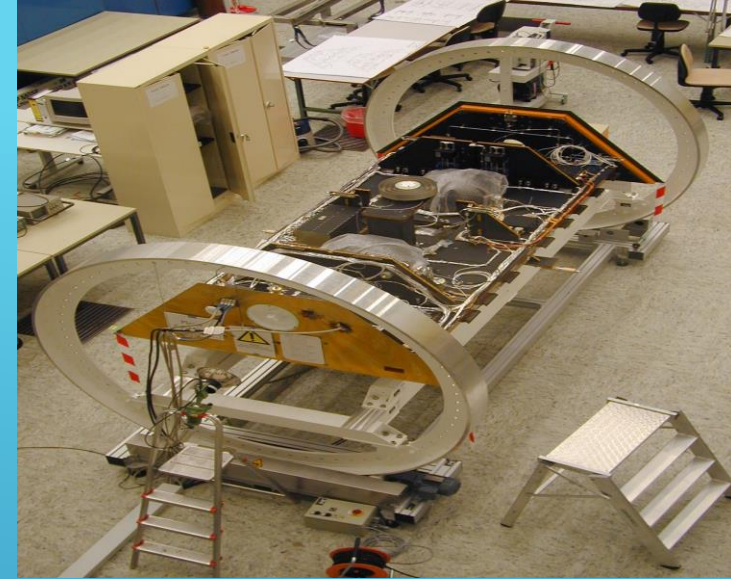
این مأموریت‌ها پوشش جهانی ارائه می‌دهند.
GRACE از ۱۷ مارس ۲۰۰۲ تا ۱۲ اکتبر ۲۰۱۷
GRACE-FO از ۲۲ مه ۲۰۱۸ تا حال حاضر
حسگرهای اصلی:

ابزار فاصله‌سنجی مایکروویو K باند
(Microwave K-band Ranging Instrument)

شتاب‌سنج‌ها

(Accelerometers)

گیرنده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی
(GPS Receivers)

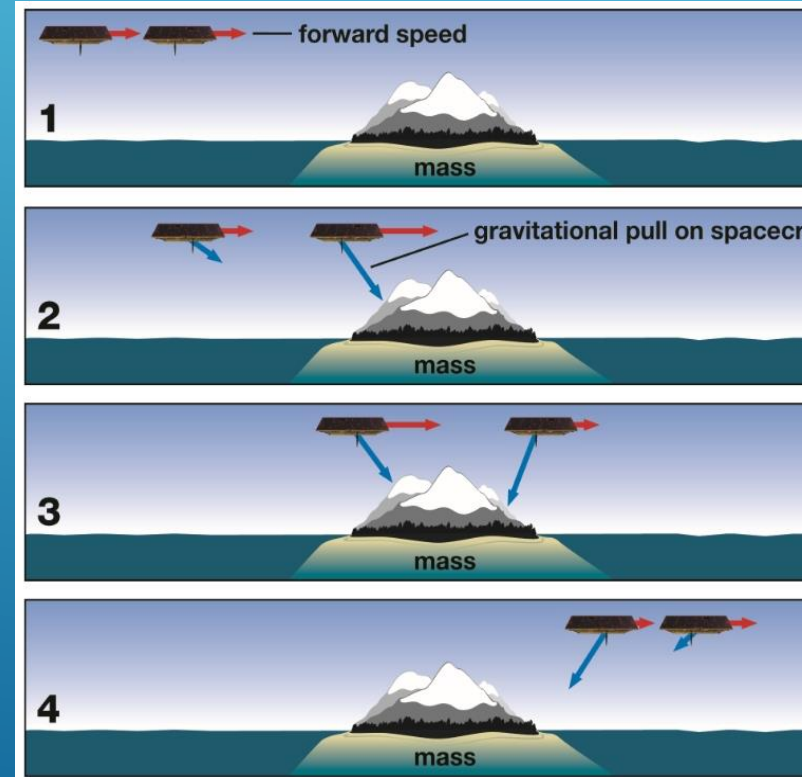


<https://grace.jpl.nasa.gov/mission/grace/>

اندازه‌گیری‌های GRACE و GRACE-FO

هنگام حرکت دو ماهواره هم‌زمان به دور زمین، فاصله بین آن‌ها تحت تأثیر ناهنجاری‌های گرانشی (تغییر در تمرکز جرم) قرار می‌گیرد.
سیستم فاصله‌سنجی مایکروویو برای اندازه‌گیری دقیق این تغییرات طراحی شده است.
گیرنده‌های GPS موقعیت دقیق ماهواره‌ها نسبت به زمین را تعیین می‌کنند.
شتاب‌سنج‌ها شتاب‌های غیرگرانشی (مانند ناشی از مقاومت جو) را اندازه‌گیری می‌کنند.

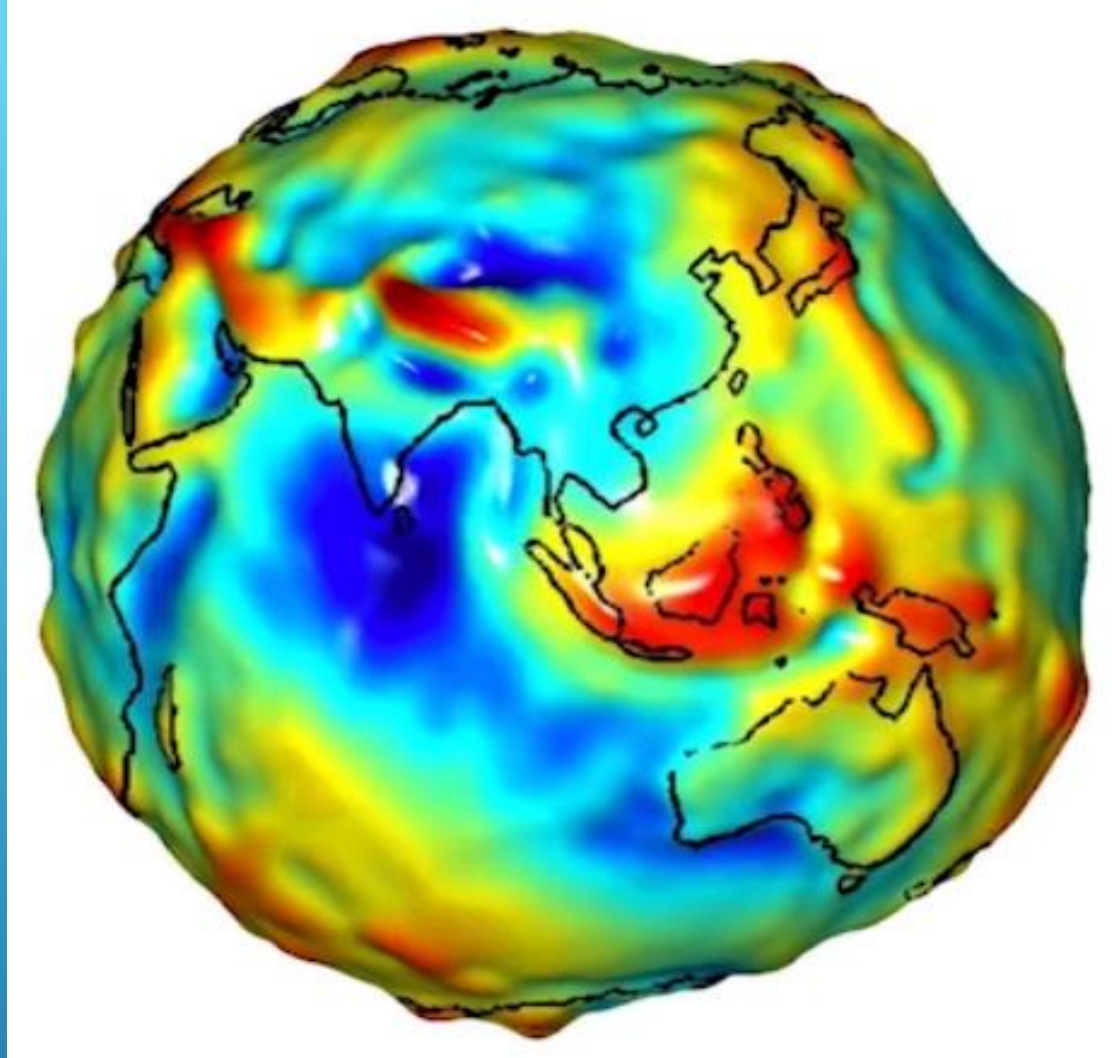
<https://gracefo.jpl.nasa.gov/resources/50/how-grace-fo-measures-gravity/>



از گرانش تا ذخیره آب زمینی

- از اصول فیزیک برای تبدیل اندازه‌گیری‌های GRACE (فاصله بین ماهواره‌ها) به گرانش یا تمرکز جرم استفاده می‌شود.
- تغییرات ظریف در گرانش زمین رخ می‌دهد که عمدتاً ناشی از وجود آب در روی زمین، زیر زمین، در اقیانوس‌ها است.
- تغییرات گرانشی مشاهده‌شده توسط GRACE به عنوان تغییرات ذخیره آب زمینی (TWS) تفسیر می‌شوند.

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GRACEGroundwater>



داده‌های ذخیره آب زمینی GRACE

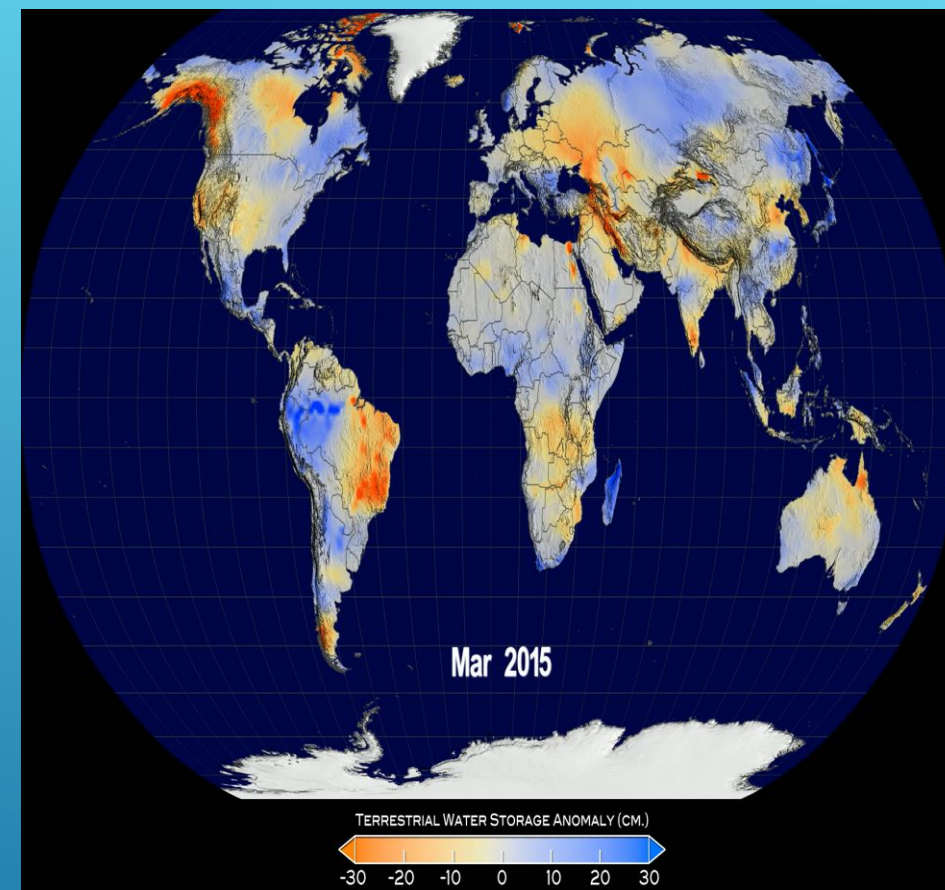
GRACE Terrestrial Water Storage Data

• GRACE روزانه حدود ۲۵۰ پروفیل گرانشی جمع‌آوری می‌کند.

• بر اساس داده‌های سطح ۲، ناهنجاری‌های ماهانه جرم (انحراف از میانگین جرم) محاسبه می‌شوند که نشان‌دهنده ناهنجاری‌ها در ذخیره آب زمینی (TWS) هستند.

https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/grace/docs/ProdSpecDoc_v4.6.pdf

ناهنجاری ذخیره آب زمینی (TWSA) داده‌ها از مارس ۲۰۱۵ تا مارس ۲۰۱۶ می‌باشند.



<https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4476&button=recent>

داده‌های ذخیره آب زمینی GRACE

GRACE Terrestrial Water Storage Data

1. Landerer and Swenson, 2012:
*Accuracy of scaled GRACE
terrestrial water storage estimates,*
WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.
48, W04531,
doi:10.1029/2011WR011453

2. S.C. Swenson. 2012. *GRACE monthly
land water mass grids NETCDF*
RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA,
USA. Dataset accessed [YYYY-MMDD]
at <http://dx.doi.org/10.5067/TELNDNC005>

3. [https://climatedataguide.ucar.edu](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/grace-gravityrecovery-and-climate-experimentsurface-mass-total-water-storageand)
[/climate-data/grace-gravityrecovery-](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/grace-gravityrecovery-and-climate-experimentsurface-mass-total-water-storageand)
[and-climate-experimentsurface-](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/grace-gravityrecovery-and-climate-experimentsurface-mass-total-water-storageand)
[mass-total-water-storageand](https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/grace-gravityrecovery-and-climate-experimentsurface-mass-total-water-storageand)

• داده‌های TWS به صورت سانتی‌متر ضخامت معادل آب ارائه می‌شوند.

• داده‌های GRACE -Level2 با رزولوشن مکانی ۳۰۰–۴۰۰ کیلومتر (تقریباً ۱۵۰,۰۰۰ کیلومتر مربع) در دسترس هستند.

• این داده‌ها به رزولوشن شبکه‌ای $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ نیز تبدیل شده‌اند.

• داده‌های ماهانه TWS با رزولوشن $1^\circ \times 1^\circ$ و $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ در دسترس هستند.

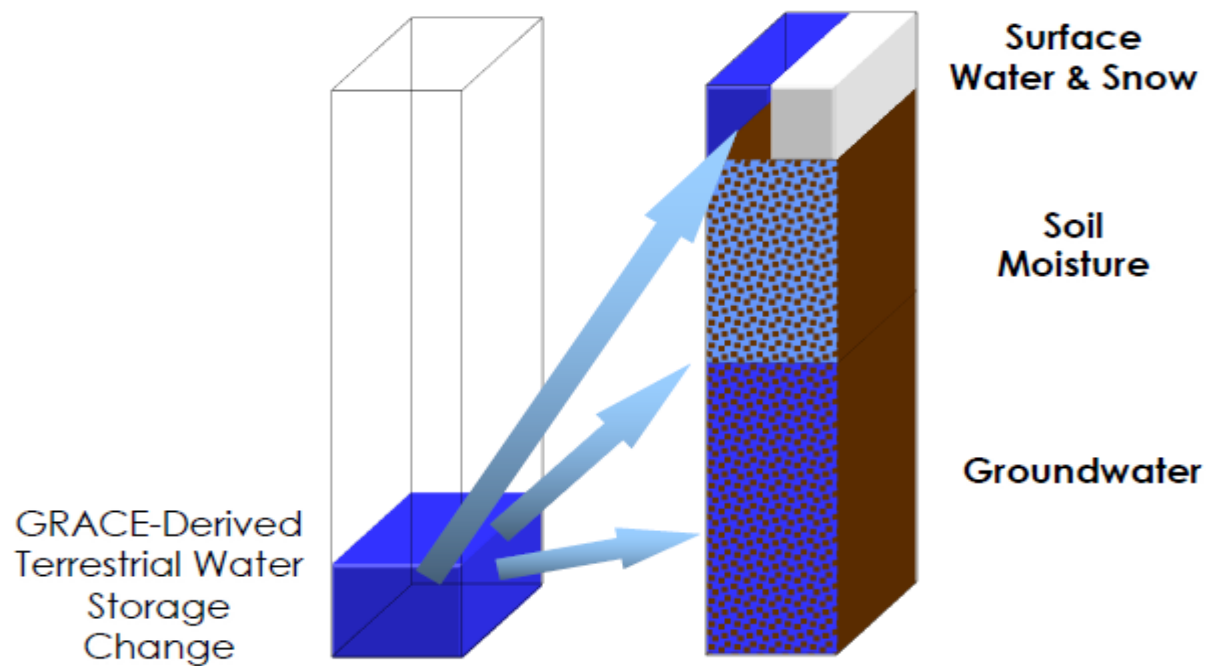
• خطاهای حاصل در ناهنجاری‌های ماهانه TWS برای رزولوشن $1^\circ \times 1^\circ$ حدود ۲–۳ سانتی‌متر تخمین زده می‌شوند.

از ذخیره آب زمینی تا آب زیرزمینی

• آب زمینی مجموعی از رطوبت خاک، آب سطحی و آب معادل برف و آب زیرزمینی است.

• ماهواره‌های GRACE کل ستون آب زمینی (TWS) را اندازه‌گیری می‌کنند و قادر به تمایز بین آب ذخیره‌شده به صورت برف، رطوبت خاک و آب زیرزمینی نیستند.

• اختلاف بین ناهنجاری‌های TWS و تغییرات ذخیره آب که توسط مدل‌های سطح زمین تعیین می‌شوند، امکان تفکیک عمودی داده‌های GRACE و استخراج سهم آب زیرزمینی را فراهم می‌کند.



Copyright 2016 California Institute of Technology.
Government sponsorship acknowledged.

از ذخیره آب زمینی تا آب زیرزمینی

$$P - ET - Q = \Delta TWS \text{ [terrestrial water balance]}$$

$$\Delta TWS = \Delta GW + \Delta SM + \Delta SWE + \Delta SW$$

$$\Delta GW = \Delta TWS - \Delta SM - \Delta SWE - \Delta SW$$

P = بارش

ET = تبخیر و تعرق

Q = دبی رودخانه

ΔTWS = تغییر ذخیره آب زمینی [از داده‌های GRACE]

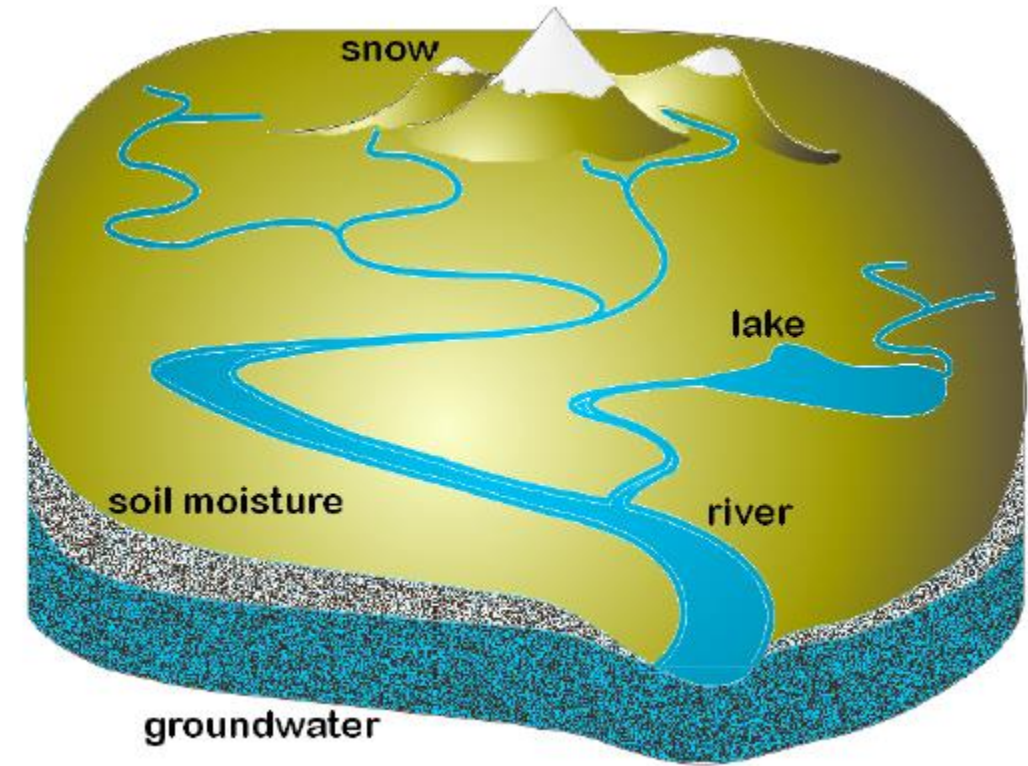
ΔGW = تغییر ذخیره آب زیرزمینی

ΔSM = تغییر رطوبت خاک

ΔSWE = تغییر معادل آب برف

ΔSW = تغییر ذخیره آب سطحی

مقادیر ΔSW , ΔSWE , ΔSM از مدل‌های سیستم ادغام داده‌های زمینی جهانی (GLDAS), FLDAS و تصاویر ماهواره ای استخراج می‌شوند.



از ذخیره آب زمینی تا آب زیرزمینی

برای به دست آوردن داده‌های آب زیرزمینی از داده‌های TWS گریس، از داده‌های رطوبت خاک، آب سطحی و معادل برف-آب (SWE) مدل‌های داده‌های زمینی جهانی (GLDAS) و داده‌ها و تصاویر ماهواره ای و داده‌های میدانی استفاده می‌شود.

• جزئیات مدل‌های LDAS از این لینک در دسترس است:

https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/land/fdp.laniF_detadilosnoC_rtraP_gniniarT_gA/gniniarT-gA-۲۰

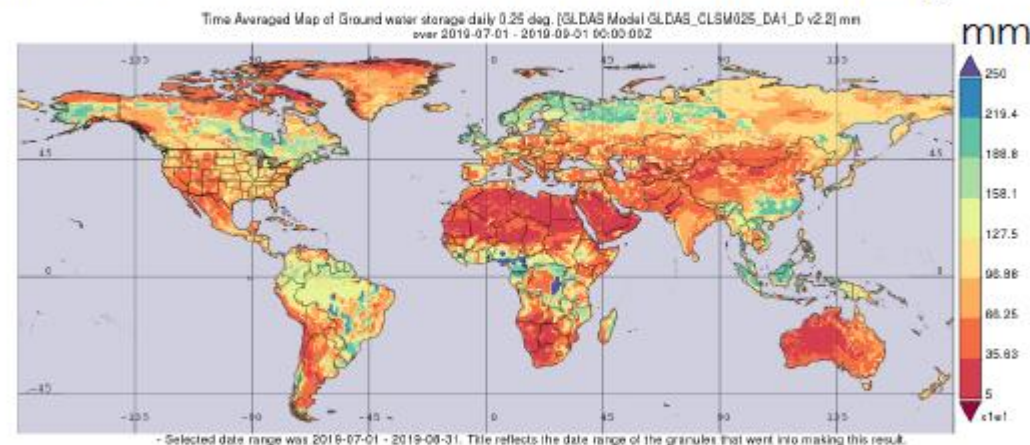
• نسخه ۲.۲ GLDAS داده‌های TWS گریس را دریافت می‌کند و تمام مؤلفه‌های تراز آب، از جمله آب زیرزمینی، را فراهم می‌کند.

Kumar et al., 2016: Assimilation of gridded GRACE terrestrial water storage estimates in the North American Land Data Assimilation System, DOI: 10.1175/jhm-d-15-0157.1

Li et al., 2019: Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges, DOI: 10.1029/2018wr024618

Zaitchik et al., 2008: Assimilation of GRACE terrestrial water storage data into a land surface model: results for the Mississippi River Basin, DOI: 10.1175/2007JHM951.1

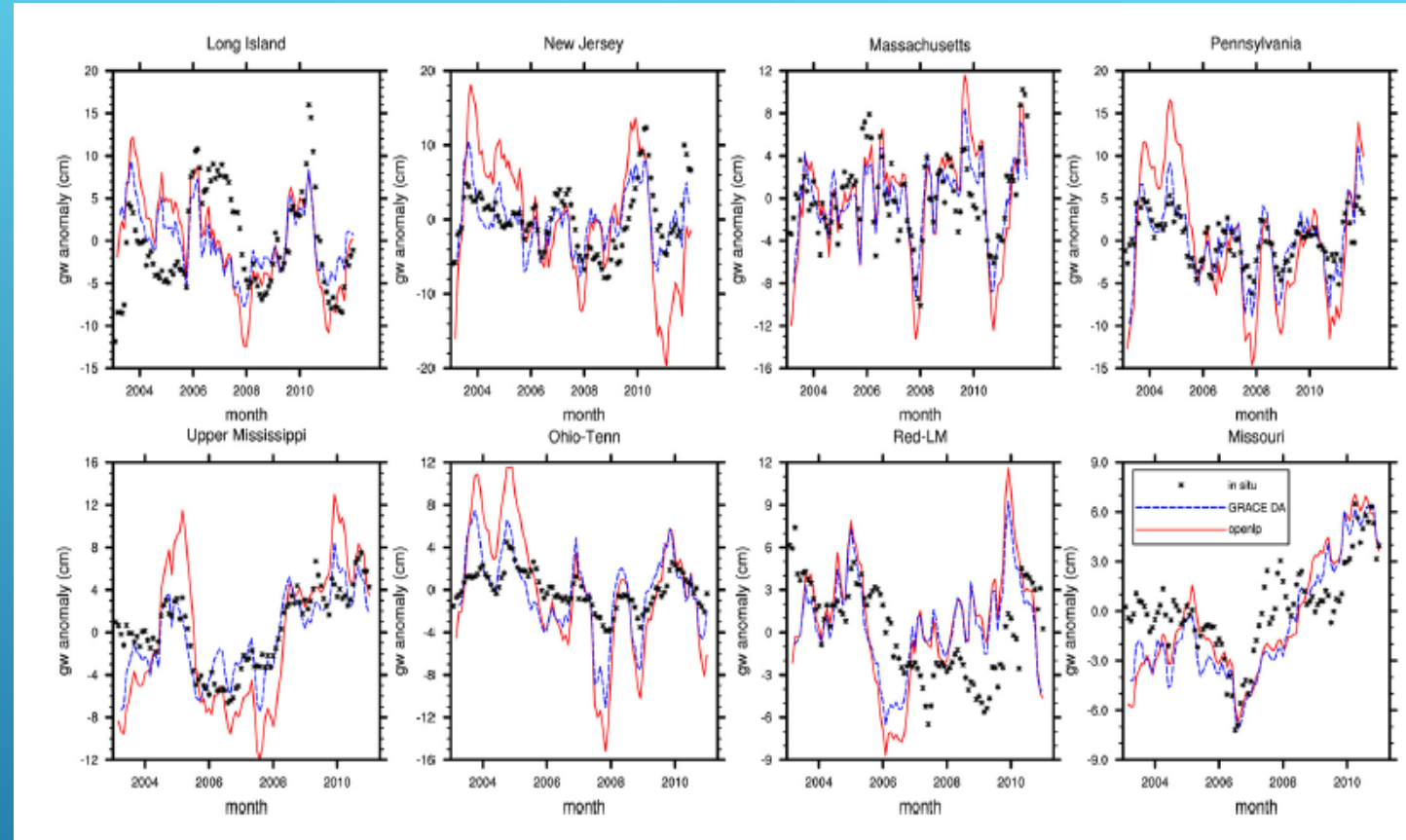
GLDAS-v2.2 Groundwater Storage



Average of June-July-August 2019

آب زیرزمینی در GLDAS

اعتبارسنجی آب زیرزمینی از نسخه ۲.۲ GLDAS با استفاده از ۴۰۰۰ اندازه‌گیری چاه نشان می‌دهد که ادغام داده‌های GRACE باعث بهبود برآورد آب زیرزمینی می‌شود: ۳۶٪ در مقیاس منطقه‌ای و ۱۰٪ در مقیاس نقطه‌ای نسبت به برآورد آب زیرزمینی بدون استفاده از داده‌های GRACE باعث بهبود در برآورد آب زیرزمینی می‌گردد.



اختلاف ماهانه غیرفصلی ذخیره آب زیرزمینی از داده‌های OL و GRACE با یکپارچه‌سازی داده‌ها و داده‌های میدانی در چهار زیرحوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی و چهار منطقه شمال شرق ایالات متحده (Li و همکاران، ۲۰۱۹)

مزایا

- ✓ GRACE و GRACE-FO اندازه‌گیری‌های منحصر به فردی از تغییرات جرم یا گرانش در سطح زمین ارائه می‌دهند و نقشه‌های ماهانه از میدان گرانش تولید می‌کنند.
- ✓ • این تغییرات گرانش در درجه اول مربوط به حرکت آب‌های زمینی هستند و بر اساس تغییر در ضخامت معادل آب یا ذخیره آب زمینی TWS تفسیر می‌شوند.
- ✓ • با استفاده از GRACE TWS به همراه اجزای هیدرولوژیکی مبتنی بر مدل، می‌توان آب‌های زیرزمینی را تخمین زد.
- ✓ • داده‌های GRACE برای به دست آوردن اطلاعات TWS و تغییرات آب‌های زیرزمینی در سطح جهانی استفاده می‌شوند و در نظارت بر شرایط سیل و خشکسالی و کاهش آب‌های زیرزمینی در مقیاس بزرگ مفید بوده‌اند.

محدودیت‌های مأموریت‌های GRACE و GRACE-FO

۱. خطاهای پردازش داده:
پردازش داده بخش حیاتی در استخراج گرانش متغیر با زمان است و هرگونه خطا می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.
۲. محدودیت مدار و هندسه مشاهده:
ارتفاع مداری و نحوه چینش دو ماهواره دقت مشاهدات را محدود می‌کند.
۳. نیاز به مدل‌سازی پویا:
برای شبیه‌سازی مدار ماهواره‌ها، باید مدل‌های نیروهای دینامیکی شامل جزر و مد اقیانوسی، تغییرات سریع جو، و جرم پویای اقیانوس‌ها لحاظ شود.
۴. تفکیک‌ناپذیری تغییرات جرم با بسامد بالا:
به دلیل نیاز به حدود ۳۰ روز داده برای یک راه‌حل پایدار، **GRACE** قادر به ردیابی تغییرات جرم سریع نیست.
۵. خطاهای هم‌پوشانی زمانی
خطاهای ناشی از مدل‌سازی نادرست تغییرات سریع جرم، به صورت خطاهای هم‌پوشانی زمانی در داده‌های گرانشی ظاهر می‌شوند.
۶. اثر غالب خطاهای مدل نسبت به ابزار اندازه‌گیری:
این خطاها معمولاً بزرگ‌تر از خطاهای ابزارهایی مانند **MWI**، شتاب‌سنج، دوربین ستاره‌ای و **GPS** هستند.

محدودیت‌های داده‌های GRACE و GRACE-FO

- ❖ داده‌های TWS و آب‌های زیرزمینی مبتنی بر GRACE و GRACE-FO به صورت جهانی در دسترس هستند، اما وضوح مکانی آنها حدود $150^{\circ} \times 150^{\circ}$ کیلومتر مربع است و نمی‌توانند حوزه‌های آبخیز کوچکتر را تفکیک کنند.
- ❖ عمق معادل آب یا TWS بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شوند که در مقایسه با شعاع زمین (6378 کیلومتر) بسیار کوچکتر است و خطاهای تخمینی $2-3$ سانتی‌متر دارند.
- ❖ هنگامی که تغییرات گرانش ناشی از توزیع مجدد جرم، زمین جامد باشد، مانند زلزله بزرگ یا به دلیل اثرات فرآیندهای یخچالی بر روی گوشته، لازم است ابتدا این اثرات را قبل از استخراج ضخامت TWS از اندازه‌گیری‌های گرانش حذف کنیم.
- ❖ داده‌های TWS مبتنی بر GRACE با دقت 1 در 1 درجه در دسترس هستند و داده‌های آب‌های زیرزمینی GLDAS که با GRACE همسان‌سازی شده‌اند، با دقت 0.25 در 0.25 درجه در دسترس هستند. حال، به دلیل وضوح نامناسب داده‌های GRACE، دو شبکه همسایه ممکن است شامل تخمین‌های مستقل نباشند. با این

محدودیت های هندسه و ارتفاع مداری مأموریت های GRACE و GRACE-FO

۱. هندسه مشاهده محدود

ماهواره ها در مدار قطبی هستند و تنها در جهت مسیر حرکت اندازه گیری می کنند اطلاعات تغییرات گرانشی شرق-غرب محدود است

۲. نوارهای طولی

خطاهای سیستم اندازه گیری و همپوشانی زمانی باعث ایجاد نوارهای طولی در داده ها می شوند حذف نوارها با فیلترهای پس پردازشی ممکن است سیگنال واقعی زمین شناختی را نیز حذف کند. استفاده از ضریب های مقیاس توصیه می شود تا سیگنال های از دست رفته بازسازی شوند

۳. محدودیت ارتفاع مداری

ماهواره ها در ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتر قرار دارند و کاهش تدریجی ارتفاع به دلیل مقاومت جوی رخ می دهد کاهش ارتفاع دقت مکانی داده ها را افزایش می دهد (تفکیک پذیری کمتر از ۳۰۰ کیلومتر)
افزایش اصطکاک جوی موجب کاهش عمر مأموریت می شود

دسترسی به داده‌های GRACE و GRACE-FO

- پورتال داده‌های JPL:

<https://podaac.jpl.nasa.gov/grace>

- پورتال داده‌های GFZ:

<http://isdg.gfz-potsdam.de>

- وبسایت GRACE در مرکز پژوهش‌های فضایی
دانشگاه تگزاس در آستین (CSR):

<http://www.csr.utexas.edu/grace>

مرکز اصلی پردازش داده های GRACE-GRACEFO

ردیف	مرکز	نام کامل	کشور / نهاد	توضیح عملکرد
۱	JPL	Jet Propulsion Laboratory	USA – NASA/Caltech	توسعه (Mascon (RL06M)، داده های رسمی GRACE-FO
۲	CSR	Center for Space Research	USA – Univ. of Texas at Austin	تولید داده های SH و Mascon مستقل
۳	GFZ	German Research Centre for Geosciences	Germany	شریک فنی GRACE و پردازنده داده های SH/WGDM
۴	GSFC	Goddard Space Flight Center	USA – NASA	تولید GLDAS، FLDAS و Mascon Goddard
۵	GRGS/CNES	Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale	France	تولید داده های SH جایگزین با روش های مستقل

سطوح داده‌های مأموریت GRACE

ردیف	سطح داده	توضیح اصلی داده	کاربرد در آب زیرزمینی	مرکز تولید
۱	Level-0	داده‌های خام ماهواره (Telemetry): سیگنال‌ها، موقعیت، زمان و فاصله‌ی بین ماهواره‌ها	قابل استفاده مستقیم نیست	NASA JPL و DLR (German Aerospace Center)
۲	Level-1A / 1B	داده‌های مداری و فاصله‌ی دو ماهواره (GPS, K-band Range, Attitude)	فقط برای متخصصان مدار	JPL, CSR, GFZ
۳	Level-2	ضرایب کروی هم‌مرکز (Spherical Harmonic) Coefficients) تا مرتبه ۹۶ یا بالاتر	نیازمند فیلترگذاری (Gaussian / DDK)؛ مناسب برای مقیاس‌های قاره‌ای	JPL, CSR (UT Austin), GFZ (Potsdam), CNES/GRGS (France)
۴	Level-3	داده‌های مشبک‌شده Mascon (Mass Concentration Blocks به واحد cm EWH)	بهترین گزینه برای تحلیل هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی	JPL (RL06M), GSFC (Goddard), CSR Mascon
۵	Level-4	داده‌های گرید شده (Mascon)	ضخامت آب معادل گرید شده	NASA GSFC (GLDAS/FLDAS), GFZ (WGHM), NASA JPL (Hydro-GRACE)

ضرورت پیش پردازش داده‌های GRACE

۱. داده‌های خام GRACE حاوی خطاهای همبسته در ضرایب استوکس هستند که منجر به نوارهای مصنوعی شمال-جنوب در نقشه‌های جرم سطحی می‌شوند.

۲. این نوارها سیگنال‌های واقعی تغییرات جرم را مخفی می‌کنند و تفسیر ژئوفیزیکی داده‌ها را دشوار می‌سازند.

۳. برای استفاده از داده‌های GRACE در بررسی تغییرات ذخیره آب، یخچال‌ها و پوسته زمین، باید نویزهای ساختاری حذف شوند.

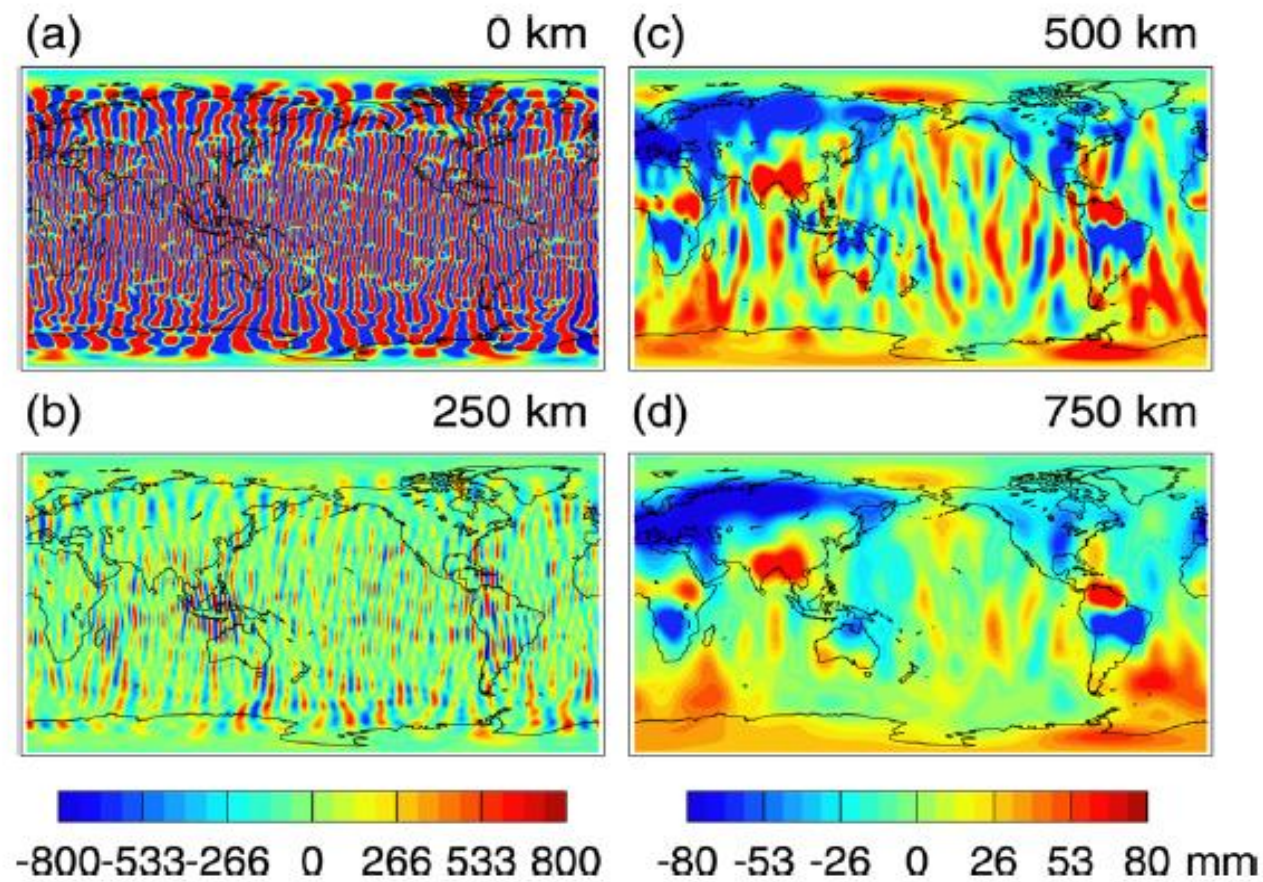
۴. هدف اصلی پیش پردازش، جداسازی سیگنال واقعی از نویز آماری و هندسی ماهواره است.

۵. مقاله Wahr و Swenson روشی کارآمد برای حذف این خطاهای فضایی همبسته ارائه می‌دهد.

Swenson & Wahr, 2006, Geophysical Research Letters, 33, L08402.

ماهیت خطاهای همبسته در داده‌های GRACE

1. خطاهای فضایی در ضرایب استوکس موجب ایجاد الگوهای نوارمانند در جهت شمال-جنوب می‌شوند.
2. این خطاها عمدتاً ناشی از محدودیت در هندسه مشاهدات و مسیرهای مداری مشابه ماهواره‌های GRACE هستند.
3. خطاهای همبسته در درجات و مراتب بالا به‌صورت ساختارهای منظم و تکرارشونده در داده‌ها ظاهر می‌شوند.
4. نقشه‌های جرم سطحی بدون تصحیح این خطاها دارای انحرافات مصنوعی قابل توجه هستند.
5. شناسایی این خطاها نخستین گام برای طراحی یک فیلتر آماری مناسب محسوب می‌شود.



نقشه‌های ناهنجاری ماهانه ذخیره آب استخراج شده از GRACE، هموار شده با فیلترهای گوسی با نیم‌عرض‌های مختلف

(a) بدون هموارسازی، (b) نیم‌عرض ۲۵۰ کیلومتر، (c) نیم‌عرض ۵۰۰ کیلومتر، (d) نیم‌عرض ۷۵۰ کیلومتر

اهمیت علمی و کاربردی فیلتر حذف خطای همبسته

۱. فیلتر معرفی شده ابزاری حیاتی برای استفاده دقیق تر از داده های GRACE در علوم زمین است.

۲. کاربرد آن در تحلیل تغییرات ذخیره آب زمینی (TWSA) و توده یخ ها دقت نتایج را افزایش می دهد.

۳. این روش می تواند به عنوان گام استاندارد در پردازش داده های GRACE و GRACE-FO به کار رود.

۴. کاهش خطاهای همبسته موجب تفسیر دقیق تر روندهای بلندمدت آب زیرزمینی و چرخه آب جهانی می شود.

۵. پژوهش Swenson و Wahr پایه گذار بسیاری از فیلترهای پیشرفته تر مانند DDK و ICA در پردازش داده های گرانشی شد.

Swenson & Wahr, 2006, Geophys. Res. Lett., 33, L08402

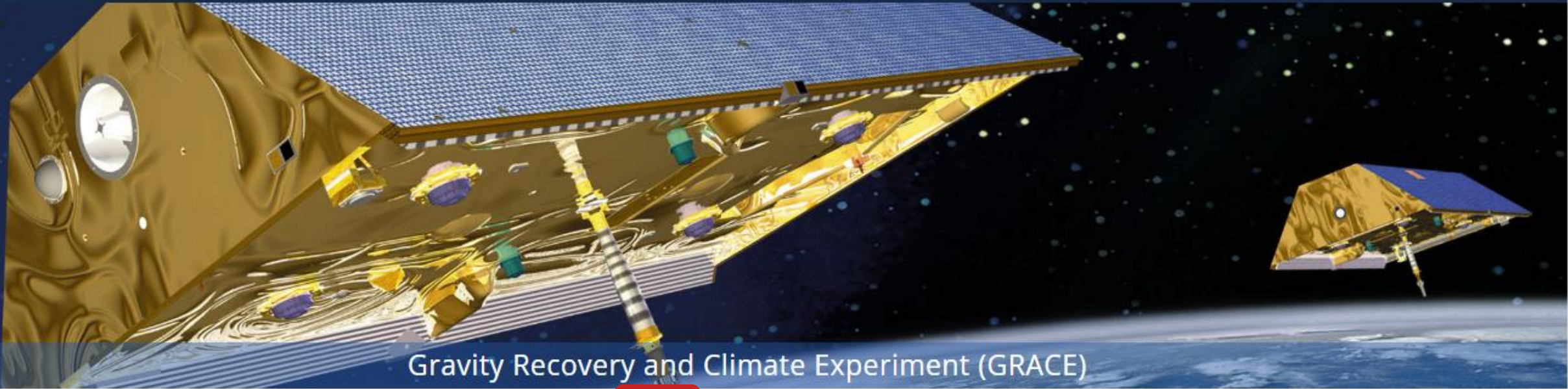
دسترسی به داده‌ها GRACE و GRACE-FO و GLDAS/FLDAS

پورتال داده‌های JPL برای داده‌های TWS

<https://podaac.jpl.nasa.gov/grace>

نمایش آنلاین Giovanni

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>



Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

ABOUT MISSION **DATA** NEWS & ANNOUNCEMENTS RESOURCES

ABOUT MISSION

MISSION OBJECTIVES

INSTRUMENTS

DOCUMENTATION

RELATED LINKS

REFERENCES

CITATION METRICS

🔍 Count 650

Related Links

- [GRACE Tellus Resource](#) for learning about the GRACE projects, understanding the measurements, which data sets to use, publications, applications.
- [University of Texas Center for Space Research \(CSR\)](#) UT Austin's page for GRACE related information
- [GeoForschungsZentrum \(GFZ\)](#) GFZ's page for GRACE related information

↑
top

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

ABOUT MISSION

DATA

NEWS & ANNOUNCEMENTS

RESOURCES

Count 650

DATA

Found 144 matching dataset(s)

TABLE | LIST

Search Text

Dataset Name	Processing Level	Start/Stop	Format
JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Release 06.3 Version 04	3	2002-Apr-04 to Present	netCDF-4
Tellus Level-4 Antarctica Mass Anomaly Time Series from JPL GRACE/GRACE-FO Mascon CRI Filtered Release 06.3 version 04	4	2002-Apr-01 to Present	ASCII
Tellus Level-4 Greenland Mass Anomaly Time Series from JPL GRACE/GRACE-FO Mascon CRI Filtered Release 06.3 version 04	4	2002-Apr-01 to Present	ASCII
GRACE/GRACE-FO Level-4 Monthly Gravitational-Rotational-Deformation version 01 from NASA MEaSURES HOMaGE	4	2002-Apr-16 to Present	netCDF-4
Tellus Level-4 Ocean Mass Anomaly Time Series from JPL GRACE/GRACE-FO Mascon CRI Filtered Release 06.3 version 04	4	2002-Apr-01 to Present	ASCII
JPL GRACE/GRACE-FO Gridded-AOD1B Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly RL06.3 dataset for Tellus Level-3 1.0-degree grid	3	2002-Apr-04 to Present	netCDF-4
JPL GRACE/GRACE-FO Gridded-AOD1B Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly RL06.3 dataset for Tellus Level-3 0.5-degree grid	3	2002-Apr-04 to Present	netCDF-4

top

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

[ABOUT MISSION](#)[DATA](#)[NEWS & ANNOUNCEMENTS](#)[RESOURCES](#)

DATA



Found 38 matching dataset(s)

[TABLE](#) | [LIST](#)

GFZ TELLUS GRACE Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly Release 6.0 version 03 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats	3	2002-Apr-05 to 2017-Oct-18	NETCDF	1 degrees (Latitude) x 1 degrees (Longitude)	1 Month
JPL TELLUS GRACE Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly Release 6.0 version 03 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats	3	2002-Apr-04 to 2017-Oct-18	NETCDF	1 degrees (Latitude) x 1 degrees (Longitude)	1 Month
GRACE FIELD GEOPOTENTIAL COEFFICIENTS JPL RELEASE 6.0	2	2002-Apr-04 to 2017-Jun-30	ASCII	500 km (Along) x 500 km (Across)	1 Month

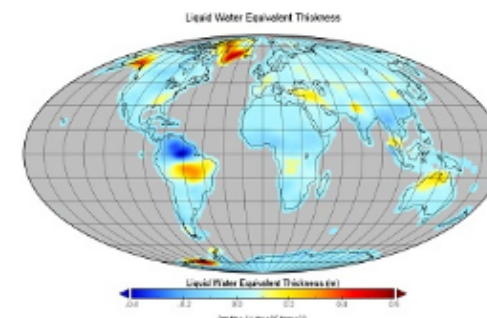
[Home](#) » [Dataset Discovery](#)

JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly Release 6.3 version 04 (TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04)

[SHARE THIS PAGE](#) ➦

① Information Coverage Data Access Variables Documentation Citation Version History

Version	RL06.3v04
Processing Level	3
Start/Stop Date	2018-May-22 to Present
Short Name	TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04
Description	This data set is produced by the Jet Propulsion Laboratory (JPL) as part of the GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On) program and derives the terrestrial water storage anomaly given as equivalent water thickness. These monthly grids are derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan, and relative to the specified time-mean reference period. This quantity represents the total terrestrial water storage anomalies from soil moisture, snow, surface water (incl. rivers, lakes, reservoirs etc.), as well as groundwater and aquifers. A glacial isostatic adjustment (GIA) correction has been applied, and standard corrections for geocenter (degree-1), C20 (degree-20) and C30 (degree-30) are incorporated. Post-processing filters have been applied to reduce correlated errors. Data grids are provided in ASCII/netCDF/GeoTIFF formats. GRACE-FO was launched on 22 May 2018, and extends the original GRACE mission (2002 – 2017) and expands its legacy of scientific achievements in tracking earth surface mass changes. Version 04 (v04) of the terrestrial water storage data uses updated and consistent C20 and Geocenter corrections (i.e., Technical Notes TN-14 and TN-13), as well as an ellipsoidal correction to account for the non-spherical shape of the Earth when mapping gravity anomalies to surface mass change. Additionally, this RL06.3 is an updated release of the previous RL06.1. It differs from RL06.1 only in the Level-1B accelerometer transplant data that is used for the GF2 (GRACE-FO 2) satellite; see respective L-2 data descriptions. RL06.3 uses the ACX2-L1B data products. All GRACE-FO RL06.3 Level-3 fields are fully compatible with the GRACE RL06 data.



CLOUD ENABLED

Status: ACTIVE

Short Name:
TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04

Collection Concept ID:
C3193302127-POCLOUD

Spatial Coverage:
N: 89.5° S: -89.5°
E: 180° W: -180°

Access:

- [Browse Granule Listing](#)
- [Search Granules](#)

Capabilities:

Download Subset

[Home](#) » [Dataset Discovery](#)

JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly Release 6.3 version 04 (TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04)

SHARE THIS PAGE

Information Coverage Data Access Variables Documentation Citation Version History

CAPABILITIES

Download

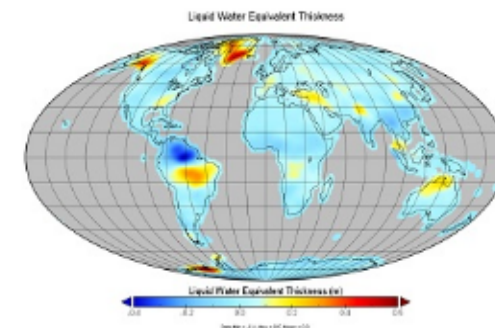
Subset

DIRECT ACCESS

- Browse Granule Listing
 - <https://cmr.earthdata.nasa.gov/virtual-directory/collections/C3193302127-POCLOUD>
- Search Granules
 - <https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C3193302127-POCLOUD>

DIRECT S3-ACCESS

- Available for access in-region with AWS Cloud
 - Region**
 - us-west-2
 - Bucket/Object Prefix:** [Information](#)
 - podaac-ops-cumulus-protected/TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04/
 - podaac-ops-cumulus-public/TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04/
 - AWS S3 Credentials**
 - [Get AWS S3 Credentials](#) | [Documentation](#)



CLOUD ENABLED

Status: ACTIVE

Short Name:

TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06.3_LND_v04

Collection Concept ID:

C3193302127-POCLOUD

Spatial Coverage:

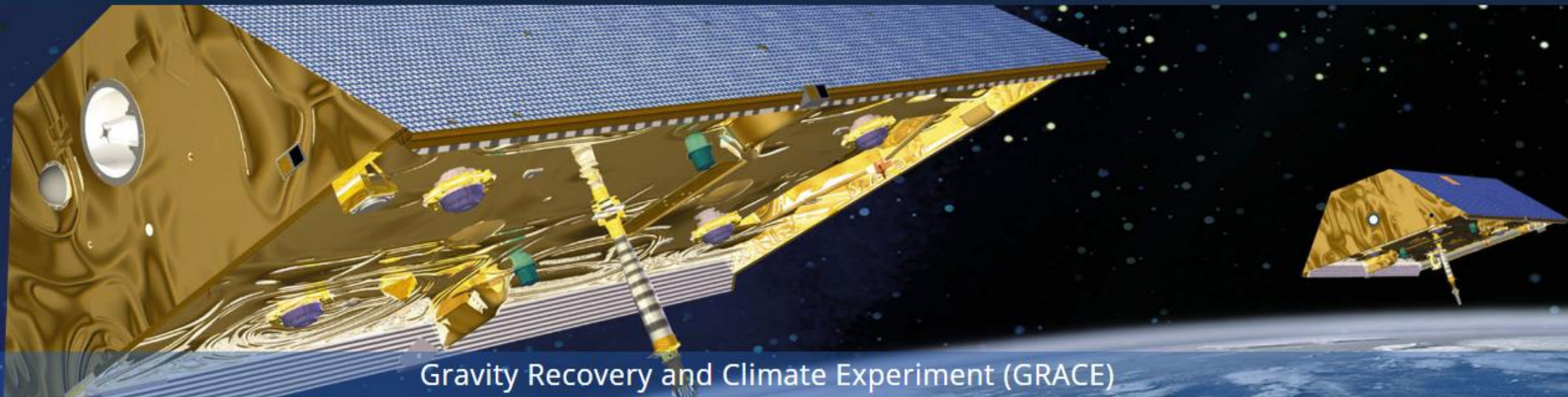
N: 89.5° S: -89.5°

E: 180° W: -180°

Access:

- [Browse Granule Listing](#)
- [Search Granules](#)

Capabilities:



ABOUT MISSION

MISSION OBJECTIVES

INSTRUMENTS

DOCUMENTATION

RELATED LINKS

REFERENCES

CITATION METRICS

Count 650

Mission Objectives

Launched 17 March 2002, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) twin satellites made detailed measurements of Earth's gravity field and improved investigations about Earth's water reservoirs over land, ice and oceans. GRACE was a collaboration of the US and German space agencies (NASA and DLR). The key partners were the University of Texas Center for Space Research (CSR), the GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam, and the Jet Propulsion Laboratory (JPL).

GRACE measured gravity by relating it to the distance between the twin satellites. For example, an increase in gravity ahead of the pair caused the front satellite to speed up and increase the distance between the pair. Alternately, increased gravity in between the pair decreased their relative distance. The satellites were separated by 220 km and could detect changes smaller than a micrometer per second in relative velocity. These measurements, in conjunction with other data and models, provided observations of terrestrial water storage changes, ice-mass variations, ocean bottom pressure changes and sea-level variations.

MISSION OBJECTIVES

INSTRUMENTS

DOCUMENTATION

RELATED LINKS

REFERENCES

CITATION METRICS



Count 650

Related Links

- [GRACE Tellus](#) Resource for learning about the GRACE projects, understanding the measurements, which data sets to use, publications, applications.
- [University of Texas Center for Space Research \(CSR\)](#) UT Austin's page for GRACE related information
- [GeoForschungsZentrum \(GFZ\)](#) GFZ's page for GRACE related information

GRACE Twin Satellites | PO.DAAC x GRACE Tellus x Data Portal | Data - GRACE Tellus x

grace.jpl.nasa.gov

NASA Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

GRACE Tellus

GRAVITY RECOVERY & CLIMATE EXPERIMENT

Mission **Data** Publications Multimedia Applications News & Events About

Due to the lapse in federal government funding, we regret this inconvenience.

Measuring Mass and Water Changes

US-German Water Satellite Shows Continental Dry Spots

Several regions around the world are seeing a decline in water availability, according to a paper published in the journal *Advances* on July 25. The study, partially funded by NASA, found that dry areas are increasing by about twice the size of California each year.

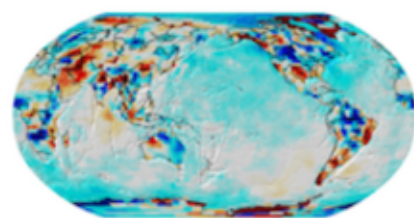
[Read More](#)

[All News](#)

Data

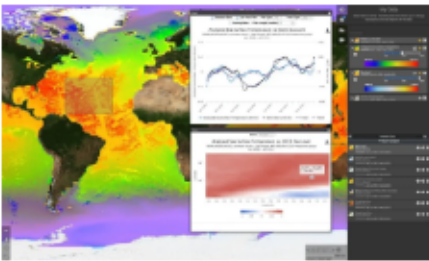
- Overview - Monthly Mass Grids
- Data Portal**
- Data Updates & Announcements
- Which GRACE(-FO) data set should I choose?
- GRACE & GRACE-FO - Data Months / Days
- GRACE(-FO) Data Analysis Tool

Data Portal



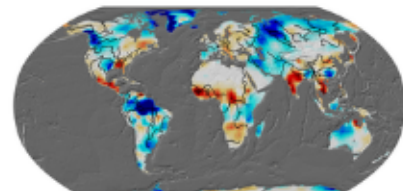
GRACE/GRACE-FO Monthly Mass Grids - JPL Global Mascons

Global surface mass changes (land + ocean) updated monthly, and is provided on 0.5-degree global grids.



Interactive GRACE/GRACE-FO Data Browser

This data browser allows the interactive retrieval of GRACE & GRACE-FO Land data over river basins, as well as the evaluation of long-term trends and mean seasonal amplitudes.



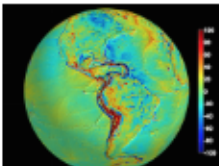
GRACE Monthly Mass Grids - Land

Land water storage from GRACE is updated monthly, and is provided on 1-degree global grids.

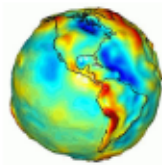
Data News & Updates

Please check Data News and Updates for announcements and important information.

Featured Resources



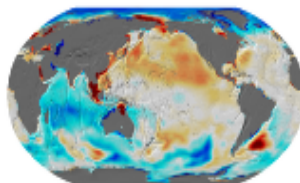
Static gravity field - anomalies (1)



GRACE global gravity animation

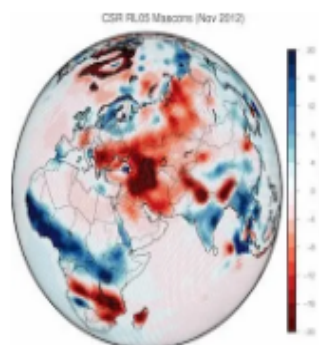


GRACE data over the United States, 2003-2012



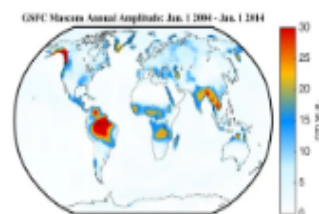
GRACE Monthly Mass Grids - Ocean

Ocean bottom pressure from GRACE is updated monthly, and is provided on 1-degree global grids.



GRACE Monthly Mass Grids - UT-CSR Global Mascons

Global surface mass (land + ocean) from GRACE is updated monthly. Please visit the [UT-CSR mascon site](#) for further details.



GRACE Monthly Mass Grids - GSFC Global Mascons

This is another GRACE solution using the mascon approach from the team at NASA-GSFC. For details, please visit the [GSFC-mascon site](#).

GLDAS-NOAH

soil moisture
snow
canopy water

GLDAS Land Water Content (monthly)

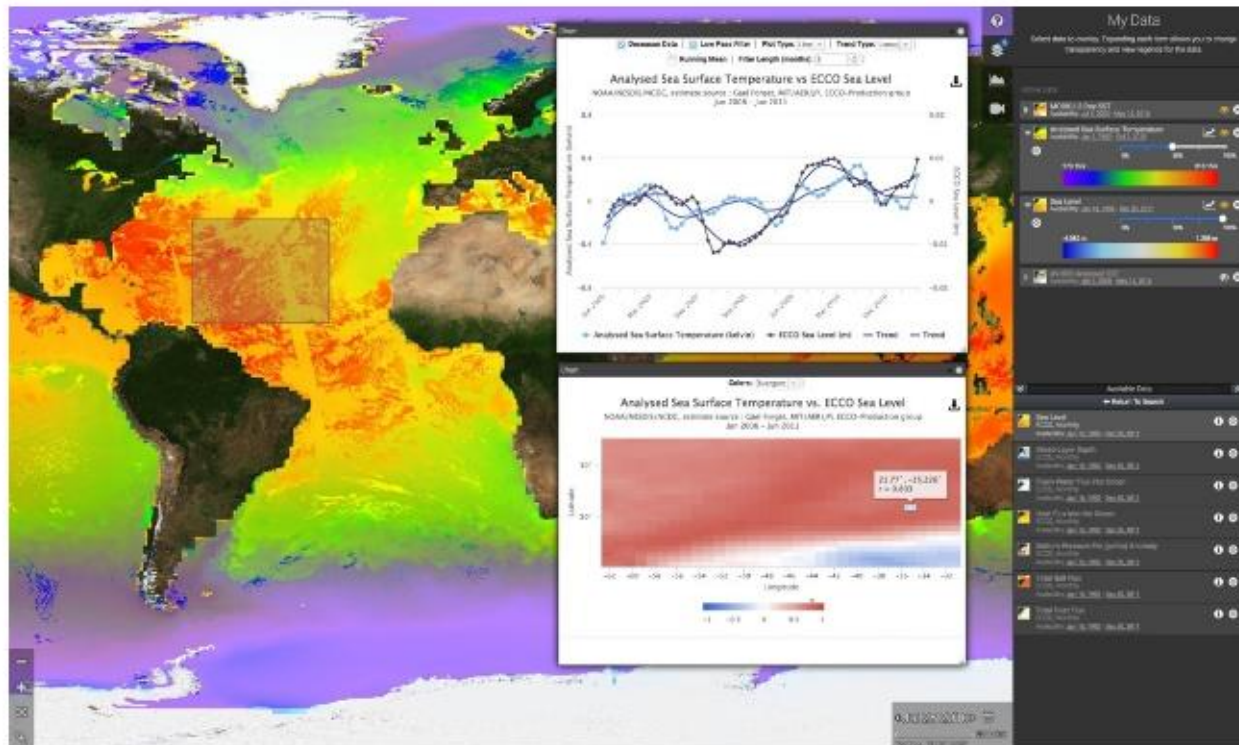
A GRACE-independent forward simulation of monthly land water storage changes (currently using soil moisture, snow, and canopy water). Can be used for comparison and residual groundwater studies.

ECCO Ocean Bottom Pressure (monthly)

Due to the lapse in federal government funding, NASA is not updating this website. We sincerely regret this inconvenience.



GRACE(-FO) Data Analysis Tool



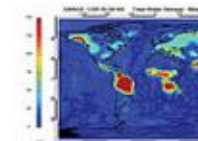
Featured Resources



[GRACE Satellite Build](#)



[GRACE Satellite Testing](#)

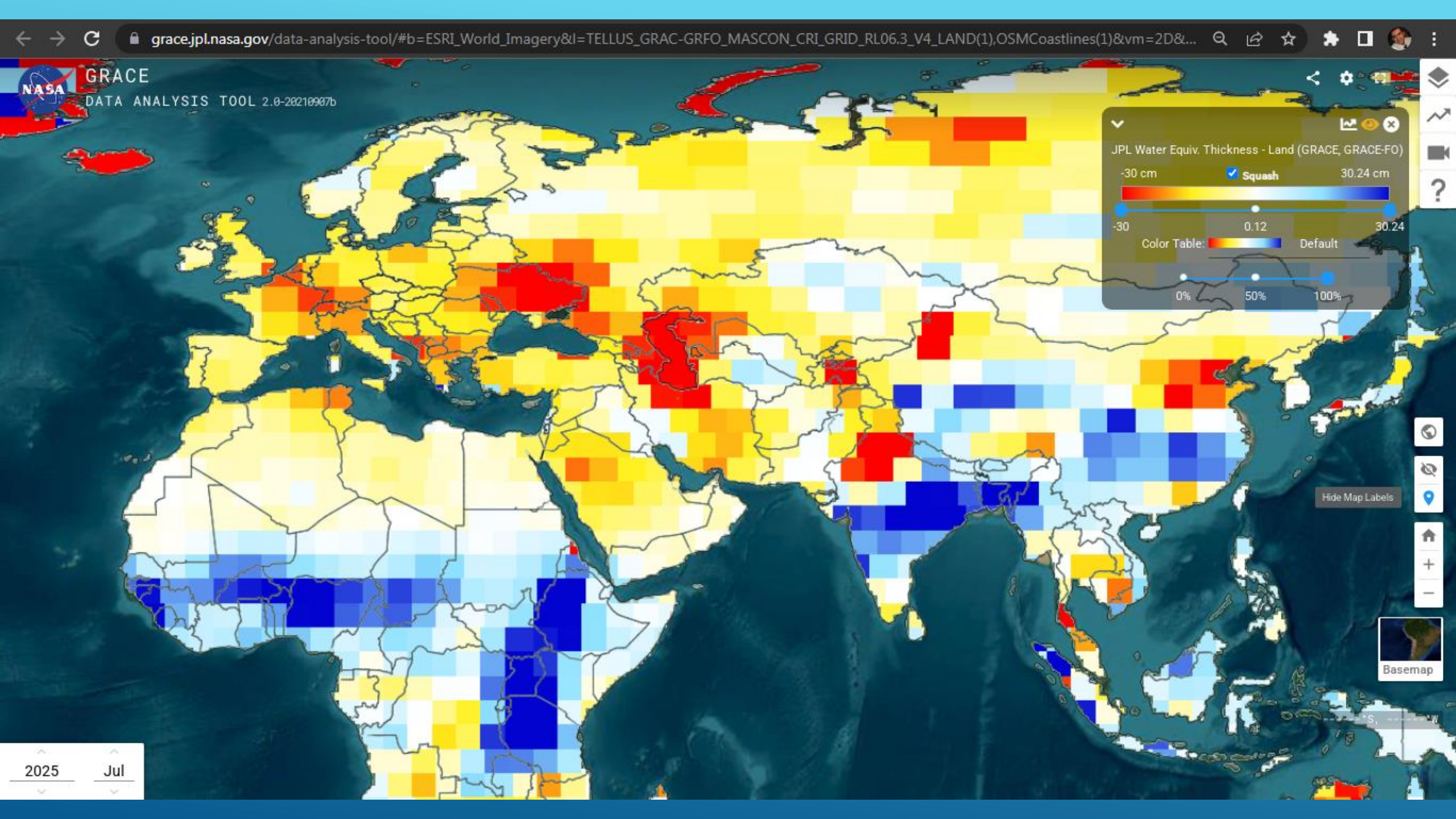


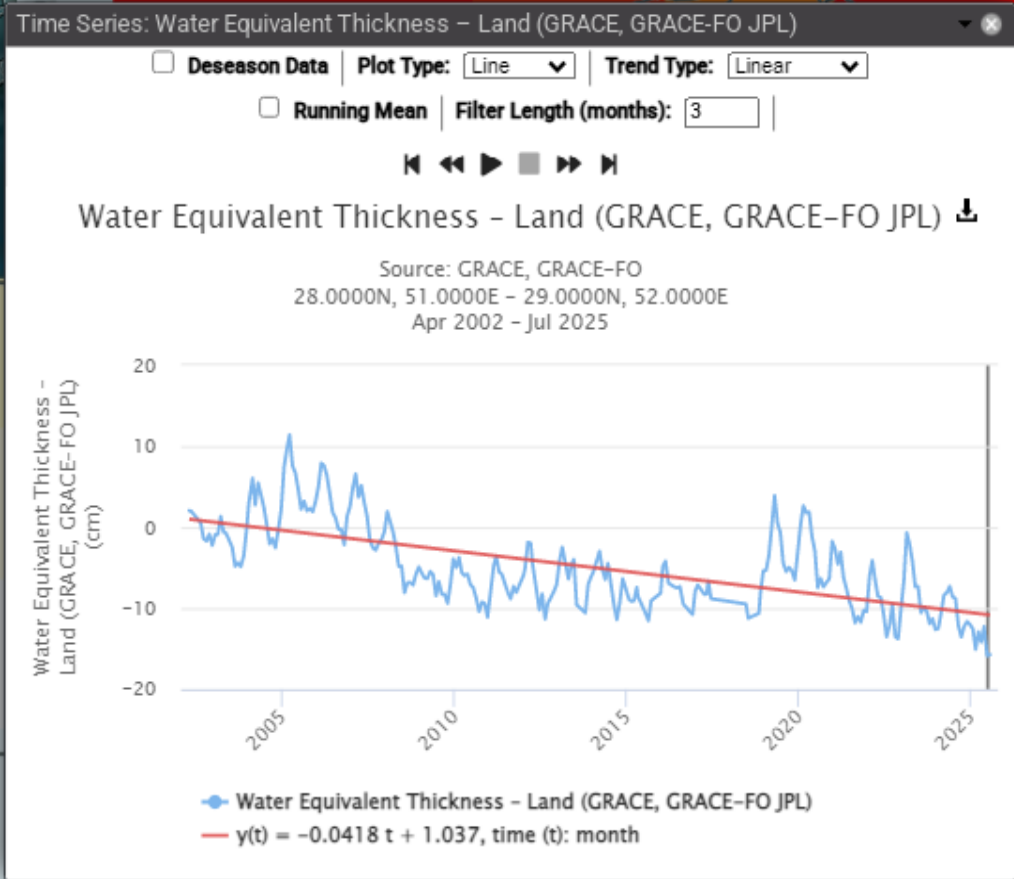
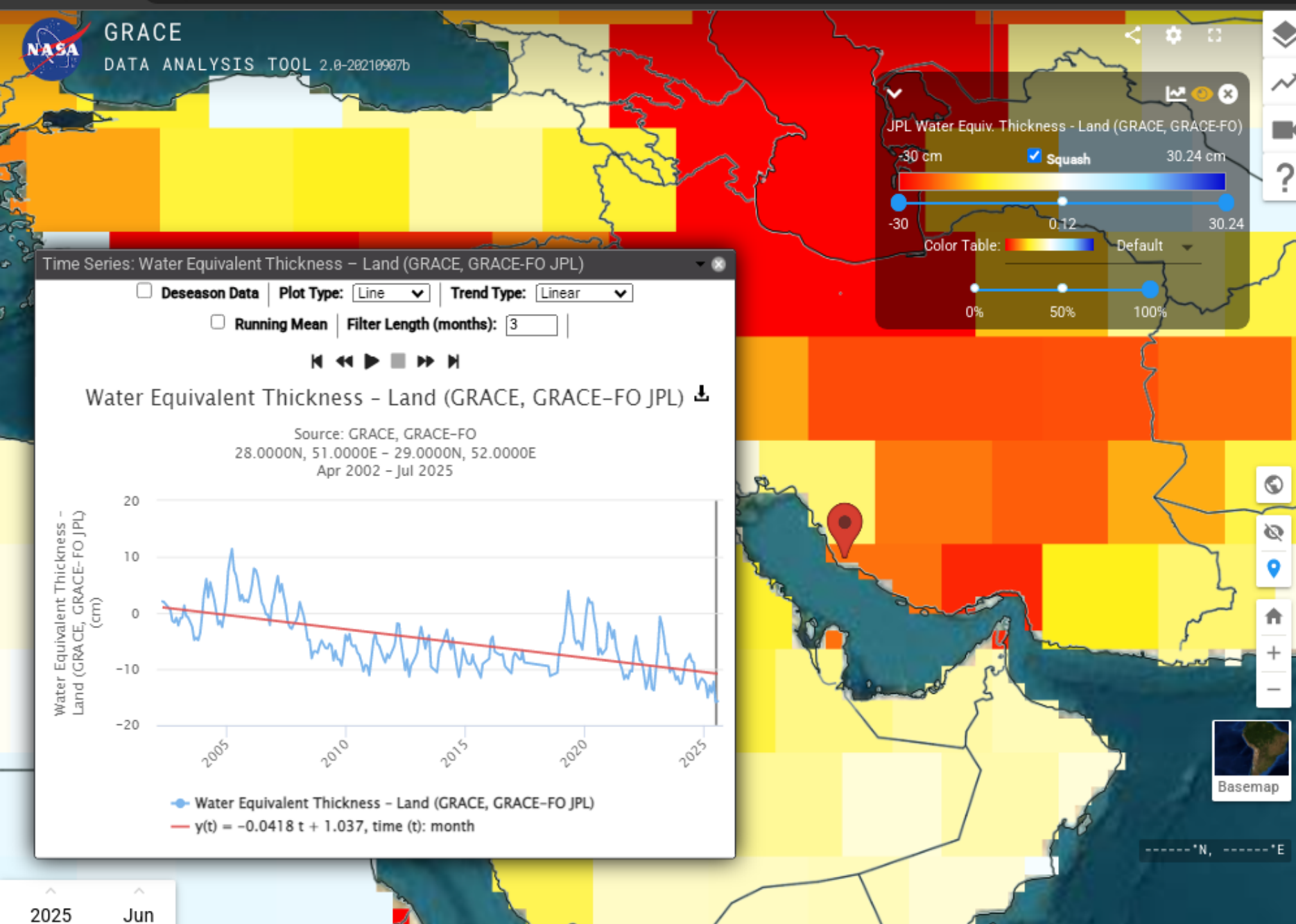
[Total water storage from GRACE, 2007](#)

[more resources >](#)

[LAUNCH TOOL](#)







Analysis

Create analysis charts, such as a time series or a time average. Place a pin or select an area on the map to get started. Then select a data set and operation to create a chart for the selected region.

Primary Data:
Water Equivalent Thickness - Land (GRACE, GRACE-FO JPL)

Availability: Apr 2002 - Jul 2025

Comparison Data:
No Comparison Dataset

Operation: Time Series

Start Date: Apr 2002

End Date: Jul 2025

Due to the lapse in federal government funding, NASA is not updating this website. We sincerely regret this inconvenienc ... [1 of 2 messages] [Read More](#)

Select Plot
Time Averaged Map

Select Date Range (UTC)
2024 - 10 - 01 00 : 00 to 2025 - 01 - 01 23 : 59
Valid Range: 1948-01-01 to 2025-10-27

Select Region (Bounding Box or Shape)
-180, -90, 180, 90

Guest limit: 4 time steps

Select Variables

Observations

- ☐ Model (560)
- ☐ Observation (764)
- ☐ Reanalysis (730)

Disciplines

- ☐ Aerosols (274)
- ☐ Atmospheric Chemistry (236)
- ☐ Atmospheric Dynamics (769)
- ☐ Cryosphere (18)
- ☐ Hydrology (672)
- ☐ Ocean Biology (52)
- ☐ Oceanography (82)
- ☐ Water and Energy Cycle (815)

- Measurements
- Platform / Instrument
- Spatial Resolutions

Number of matching Variables: 0 of 2054 Total Variable(s) included in Plot: 0

Please select at least 1 variable

Keyword :

Ground heat flux

Groundwater

GRACEDADM_CLSM0125US_7D_4.0

GRACEDADM_CLSM025GL_7D_3.0

GRACEDADM_CLSM025GL_7D_3_0

GRACEDADM_CLSM0125US_7D_4_0

Gravity wave stress

Groundwater storage

Groundwater storage percentile

Graupel

Due to the lapse in federal government funding, NASA is not updating this website. We sincerely regret this inconvenienc ... [1 of 2 messages] Read More

Select Plot
Time Averaged Map

Select Date Range (UTC)
2024 - 10 - 01 00 : 00 to 2025 - 01 - 01 23 : 59
Valid Range: 1948-01-01 to 2025-10-27

Select Region (Bounding Box or Shape)
-180, -90, 180, 90

Guest limit: 4 time steps

Select Variables

Observations

Model (4)

Disciplines

Hydrology (4)
Water and Energy Cycle (4)

- Measurements
- Platform / Instrument
- Spatial Resolutions
- Temporal Resolutions
- Portal

Number of matching Variables: 4 of 2054 Total Variable(s) included in Plot: 0

Please select at least 1 variable

Keyword : Groundwater storage Search Clear

	Variable	Units	Source	Temp.Res.	Spat.Res.	Begin Date	End Date
☐	Groundwater storage percentile (GRACEDADM_CLSM0125US_7D v4.0)	%	GRACE	Weekly	0.125 °	2002-04-01	2025-07-06
☐	Groundwater storage percentile (GRACEDADM_CLSM025GL_7D v3.0)	%	GRACE	Weekly	0.25 °	2003-02-03	2025-07-06
☐	Ground water storage (GLDAS_CLSM025_D v2.0)	mm	GLDAS Model	Daily	0.25 °	1948-01-01	2014-12-30
☐	Ground water storage (GLDAS_CLSM025_DA1_D v2.2)	mm	GLDAS Model	Daily	0.25 °	2003-02-01	2025-06-30

Due to the lapse in federal government funding, NASA is not updating this website. We sincerely regret this inconvenienc ... [1 of 2 messages] [Read More](#)

Select Plot
Time Averaged Map 

Select Date Range (UTC)
2024 - 10 - 01  00 : 00 to 2025 - 01 - 01  23 : 59
Valid Range: 1948-01-01 to 2025-01-01

Select Region (Bounding Box or Shape)
Countries and Areas Iran;   

Select Variables

▼ **Observations**

- ☐ Model (560)
- ☐ Observation (764)
- ☐ Reanalysis (730)

▼ **Disciplines**

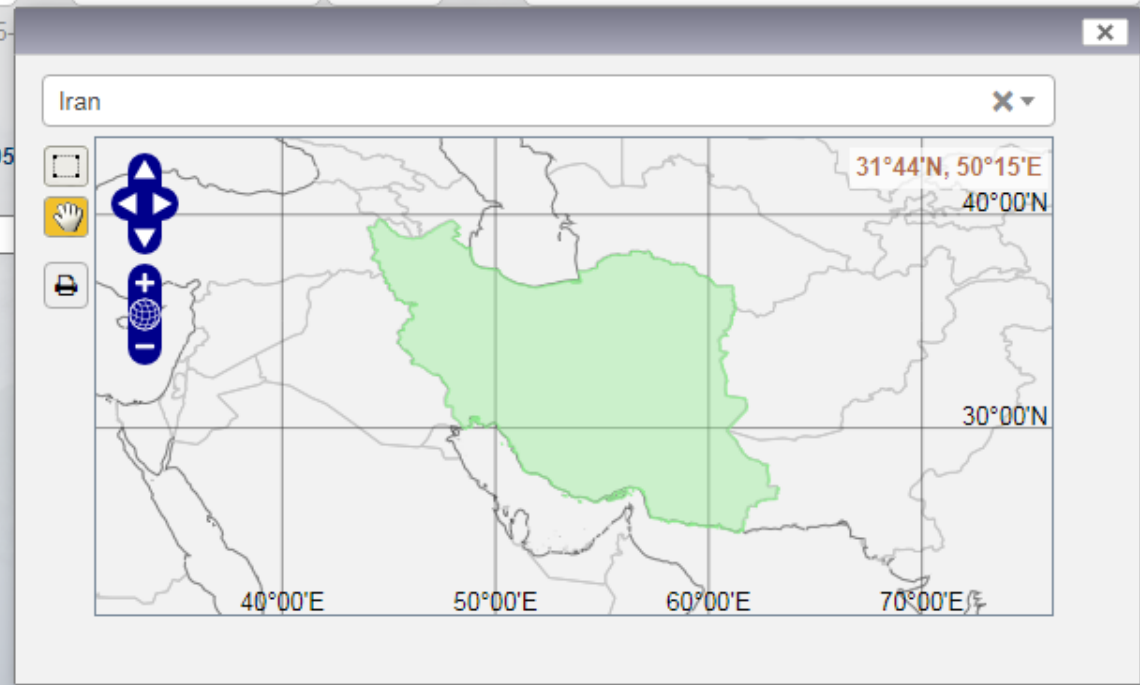
- ☐ Aerosols (274)
- ☐ Atmospheric Chemistry (236)
- ☐ Atmospheric Dynamics (769)
- ☐ Cryosphere (18)
- ☐ Hydrology (672)
- ☐ Ocean Biology (52)
- ☐ Oceanography (82)
- ☐ Water and Energy Cycle (815)

► **Measurements**

► **Platform / Instrument**

► **Spatial Resolutions**

Number of matching Variables: 0 of 205
Please select at least 1 variable
Keyword :



GIOVANNI

The Bridge Between Data and Science v 4.40

Guest limit: 4 time steps

Valid Range: 1948-01-01 to 2025-11-01

Please specify a start date.

Select Variables

Observations

- ☐ Model (69)
- ☐ Observation (5)
- ☐ Reanalysis (21)

Disciplines

- ☐ Atmospheric Dynamics (7)
- ☐ Cryosphere (13)
- ☐ Hydrology (83)
- ☐ Oceanography (3)
- ☐ Water and Energy Cycle (77)

Measurements

Platform / Instrument

Spatial Resolutions

Temporal Resolutions

Portal

Number of matching Variables: 95 of 2054 Total Variable(s) included in Plot: 0

Please select at least 1 variable

Keyword :

	Variable	Units	Source	Temp.Res.	Spat.Res.	Begin Date	End Date	Vert. Slice
☐	Snow depth water equivalent (GLDAS_CLSM025_DA1_D v2.2)	kg m-2	GLDAS Model	Daily	0.25 °	2003-02-01	2025-06-30	-
☐	Sublimation (evaporation from snow) (NLDAS_NOAH0125_M v2.0)	W m-2	NLDAS Model	Monthly	0.125 °	1979-01-01	2025-09-30	-
☐	Snow depth (NLDAS_NOAH0125_M v2.0)	m	NLDAS Model	Monthly	0.125 °	1979-01-01	2025-09-30	-
☐	Snow cover (NLDAS_NOAH0125_M v2.0)	fraction	NLDAS Model	Monthly	0.125 °	1979-01-01	2025-09-30	-
☐	Snow Water Equivalent (NLDAS_NOAH0125_M v2.0)	kg m-2	NLDAS Model	Monthly	0.125 °	1979-01-01	2025-09-30	-
☐	Snow depth water equivalent (GLDAS_CLSM025_D v2.0)	kg m-2	GLDAS Model	Daily	0.25 °	1948-01-01	2014-12-30	-
☐	Snow cover (FLDAS_NOAHMP001_G_CA_D v001)	-	FLDAS Model	Daily	0.01 °	2000-10-01	2025-10-30	-
☐	Snowfall rate (FLDAS_NOAH01_CP_GL_M v001)	kg m-2 s-1	FLDAS Model	Monthly	0.1 °	2019-01-01	2025-09-30	-
☐	Snowfall rate (FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001)	kg m-2 s-1	FLDAS Model	Monthly	0.1 °	1982-01-01	2025-09-30	-
☐	Sublimation (evaporation from snow) (NLDAS_NOAH0125_H v2.0)	W m-2	NLDAS Model	Hourly	0.125 °	1979-01-02	2025-10-27	-

Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region

Katalyn A. Voss, James S. Famiglietti, MinHui Lo, Caroline de Linage, Matthew Rodell, and Sean C. Swenson

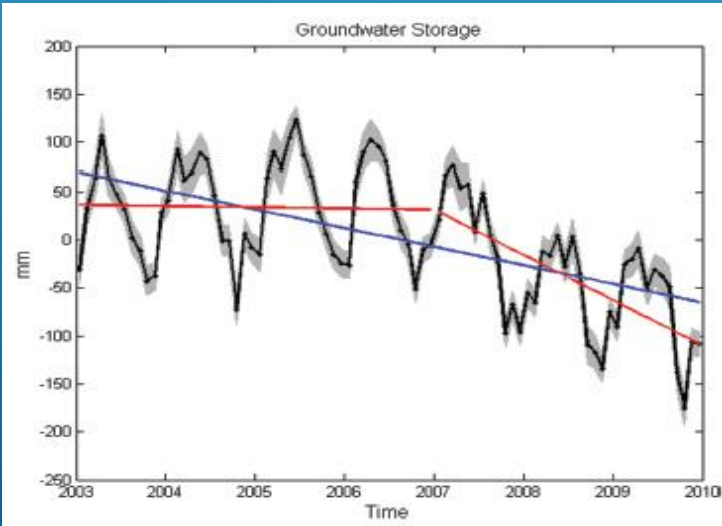
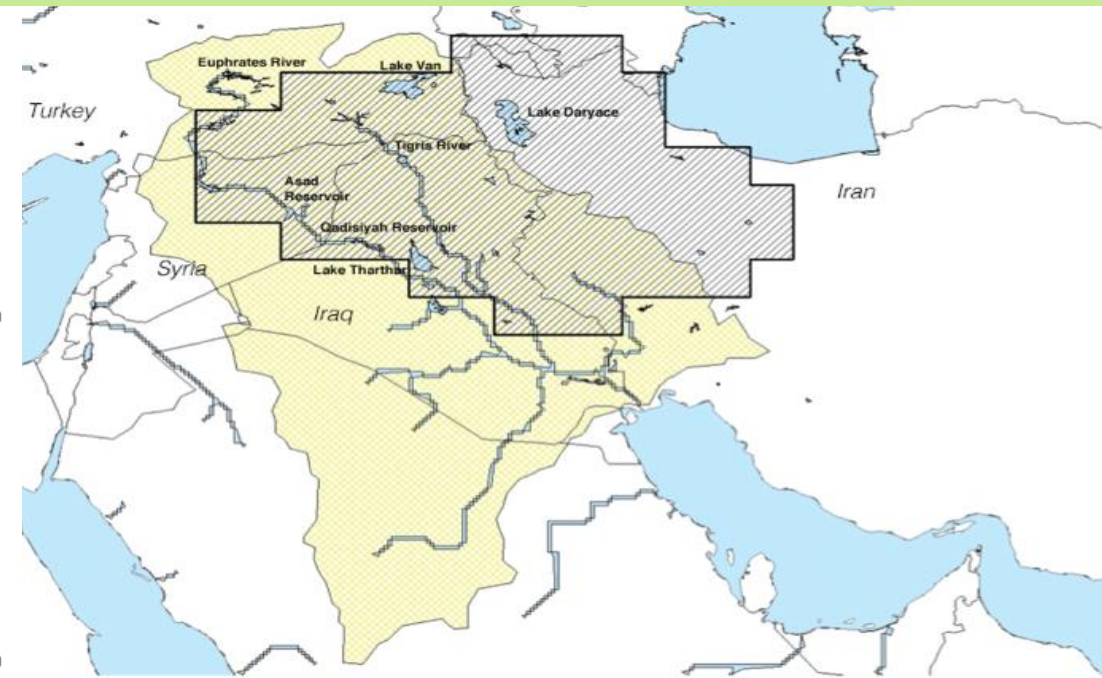
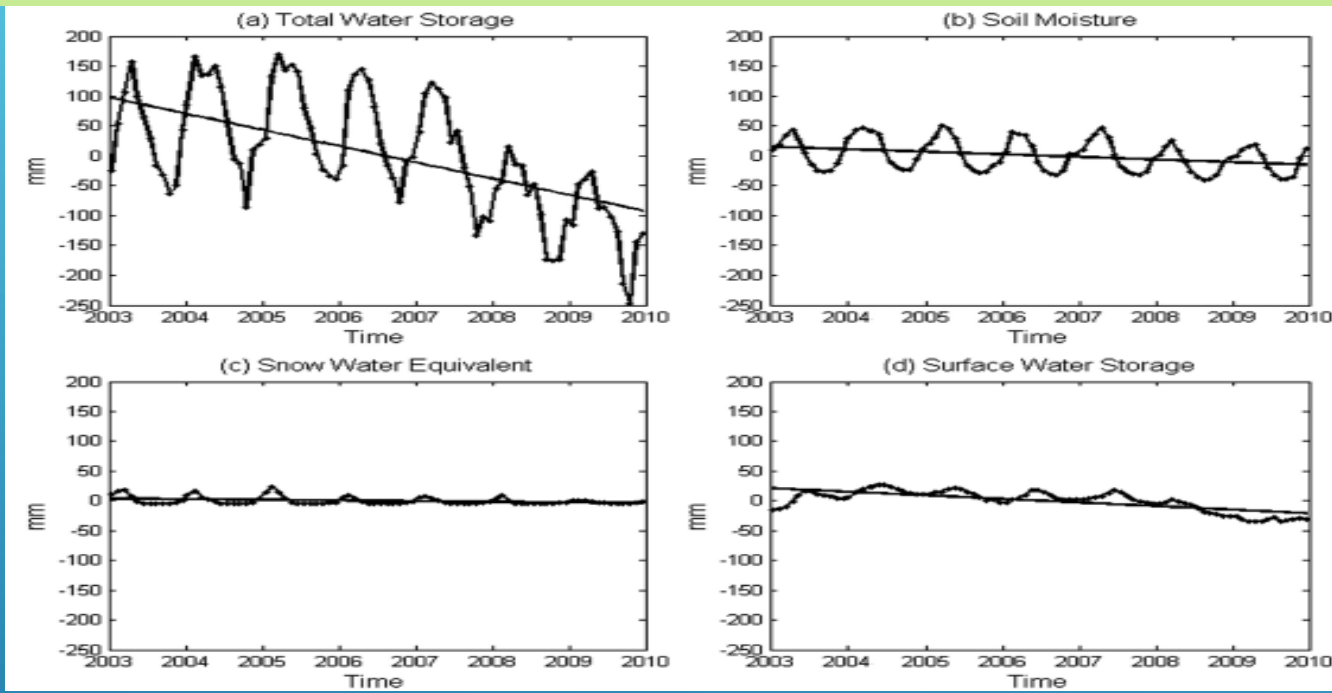


Table 1. Water Storage Trends in the TEWI Region From 2003 to 2009

Water Storage Component	Trend (mm yr ⁻¹)	Volume Lost (km ³ yr ⁻¹)	Total Volume (km ³)
GRACE total water storage	-27.2±0.6	-20.5±0.4	-143.6±2.8
Surface water	-5.9±0.4	-4.4±0.3	-31.1±2.1
Soil moisture	-3.1±1.9	-2.3±1.4	-16.3±10.0
Snow water equivalent	-0.9±0.5	-0.7±0.4	-4.9±2.5
Groundwater (GRACE-SW-SM-SWE)	-17.3±2.1	-13.0±1.6	-91.3±10.9
Groundwater from 2003 to 2006	4.9±3.1	3.7±2.3	14.7±9.3
Groundwater from 2007 to 2009	-34.0±4.5	-25.6±3.4	-76.9±10.1

سنجش از دور ابری (Cloud-based Remote Sensing)

سنجش از دور ابری به معنای اجرای فرایندهای سنجش از دور (مانند پیش پردازش، فیلترگذاری، طبقه بندی، مدل سازی و تحلیل زمانی-مکانی) روی زیرساخت های ابری (Cloud) است.

در این حالت داده ها روی سرورهای قدرتمند ذخیره می شوند و کاربر تنها از طریق یک رابط وب یا API (مثلاً در Python، R، JAVAscrips، ...) به داده ها و محاسبات دسترسی دارد، بدون نیاز به دانلود فایل های حجیم.

سنجش از دور ابری (Cloud-based Remote Sensing) به استفاده از زیرساخت های ابری (Cloud Computing) برای دریافت، پردازش، تحلیل و ذخیره داده های سنجش از دور گفته می شود. این رویکرد تحولی اساسی در نحوه ی کار با داده های ماهواره ای ایجاد کرده است، زیرا حجم زیاد داده ها و نیاز به توان محاسباتی بالا، کار با داده ها را در رایانه های محلی دشوار می کند.

مزایای پردازش ابری

۱. دسترسی سریع به داده‌های بزرگ

بدون نیاز به دانلود حجم بالای داده‌ها روی سیستم محلی
امکان دسترسی مستقیم به دیتاست‌های جهانی و ماهواره‌ای

۲. کاهش نیاز به سخت‌افزار قوی

پردازش داده‌ها روی سرورهای ابری انجام می‌شود
نیازی به کامپیوتر قدرتمند با حافظه و پردازنده بالا نیست

۳. پردازش سریع و همزمان

توان محاسباتی بالا برای تحلیل سری‌های زمانی و داده‌های مکانی
امکان اجرای عملیات پیچیده روی هزاران فایل به صورت همزمان

۴. قابلیت مقیاس‌پذیری

امکان افزایش منابع محاسباتی بر اساس حجم داده‌ها و نیاز تحلیل
مناسب برای پروژه‌های بزرگ ملی یا جهانی

۵. یکپارچه‌سازی و دسترسی به چندین دیتاست

ترکیب داده‌های مختلف ماهواره‌ای و پایگاه‌های جهانی به
سادگی

آماده‌سازی سری‌های زمانی، نقشه‌ها و تحلیل‌های مکانی

۶. امنیت و نگهداری داده‌ها

داده‌ها در سرورهای امن ذخیره می‌شوند
کاهش ریسک از دست رفتن اطلاعات به دلیل محدودیت
فضای محلی

۷. قابلیت همکاری و اشتراک‌گذاری

امکان دسترسی چندین کاربر به پروژه‌های مشترک
ساده شدن همکاری بین پژوهشگران و تیم‌های مختلف

Google Earth Engine

Google Earth Engine یک پلتفرم محاسبات ابری (Cloud Computing Platform) است که توسط شرکت گوگل توسعه یافته تا بتوان داده‌های مکانی (Geospatial Data) را در مقیاس جهانی پردازش، تحلیل و تجسم کرد.

در واقع، GEE ترکیبی است از:

پایگاه داده عظیم ماهواره‌ای و اقلیمی

قدرت پردازش ابری گوگل

ابزارهای تحلیلی مکانی و زمانی

رابط برنامه‌نویسی (API) برای خودکارسازی تحلیل‌ها

اما در GEE:

داده‌ها از قبل روی سرورهای Google Cloud ذخیره شده‌اند،

پردازش در فضای ابری انجام می‌شود،

نتایج در چند ثانیه آماده و در چند دقیقه ذخیره می‌شود.

تحلیل داده‌های ماهواره‌ای سنتی نیازمند:

سیستم‌های قوی (CPU، RAM) زیاد،

فضای ذخیره‌سازی چند ترابایتی،

زمان طولانی برای پردازش

منابع داده در GEE

داده‌های ماهواره‌ای :

- * Landsat و Sentinel برای تصاویر سطح زمین
- * MODIS برای دما، پوشش گیاهی و شاخص‌های زیست‌محیطی
- * GRACE و GRACE-FO برای تغییرات جرم آب سطح زمین

پایگاه‌های جهانی داده:

- GLDAS و FLDAS برای داده‌های هیدرولوژیکی
- CHIRPS و TRMM برای داده‌های بارش
- TerraClimate و ERA5 برای داده‌های اقلیمی

تمام دیتاست‌ها از طریق محیط وب و کتابخانه‌های GEE قابل دسترسی هستند

امکان فیلتر کردن بر اساس بازه زمانی، منطقه جغرافیایی و نوع داده وجود دارد

قابلیت دانلود داده‌ها یا پردازش مستقیم در فضای ابری وجود دارد

پیش پردازش داده‌ها

تبدیل داده‌ها به واحد استاندارد محاسبه میانگین مکانی منطقه‌ای
آماده‌سازی سری‌های زمانی و نقشه‌های تغییرات مکانی

بایش آبهای زیرزمینی

دریافت داده‌ها

دسترسی به داده‌های GRACE و محصولات جهانی با Google
Earth Engine API

امکان فیلتر گذاری مکانی و زمانی
پردازش ابری بدون نیاز به ذخیره محلی
منابع داده: JPL، CSR و GFZ

پردازش و محاسبه آب زیرزمینی
تفکیک آب زیرزمینی از آب زمینی
ریزمقیاس سازی در مقیاس محلی

خروجی‌ها

نقشه‌های تغییرات ذخیره آب سری‌های زمانی تغییرات آب
سری های زمانی
تحلیل روندهای سالانه و فصلی

پالایش داده‌ها

حذف نویزهای ماهواره‌ای و داده‌های غیرواقعی با کدنویسی
اعمال فیلترهای استاندارد برای کاهش خطا
اطمینان از کیفیت داده‌ها برای تحلیل مکانی و سری‌های زمانی

تعدادی از دیتاست های سامانه پردازش ابری Google Earth Engine

دسته	نام مجموعه داده	کاربرد
سنجنده های نوری	Landsat (NASA/USGS) Sentinel-2 (ESA)	تغییرات پوشش زمین، کشاورزی
اقلیمی	ERA5 ,CHIRPS, FLDAS	بارش، دما، تبخیر و تعرق
آب زیرزمینی	GRACE/GRACE-FO (NASA)	پایش تغییرات ذخیره آب
کاربری زمین	ESA CCI ,MODIS (MCD12Q1)	پایش کاربری و تغییرات زیست محیطی
راداری	Sentinel-1, PALSAR	رطوبت خاک، تغییر سطح آب

مجموعه داده	منبع	توضیح	کاربرد
CHIRPS	UCSB / NASA	بارش روزانه و ماهانه از ۱۹۸۱	تحلیل خشکسالی، مدل های بارش
ERA5	ECMWF	داده های بازتحلیل اقلیمی ساعتی	دما، باد، فشار، رطوبت
FLDAS	NASA GSFC	مدل هیدرولوژیکی سطحی	تبخیر، رطوبت خاک، جریان سطحی

تعدادی از دیتاست های سامانه پردازش ابری Google Earth Engine

کاربرد اصلی	توضیح	سازمان	مأموریت
تغییر کاربری، پایش شهری، منابع آب	از سال ۱۹۷۲ تا امروز	NASA/USGS	Landsat 1-9
NDVI، دما، تبخیر، برف	داده روزانه و ۸ روزه	NASA	MODIS (Terra & Aqua)
کشاورزی دقیق، جنگل، کاربری زمین	وضوح بالا (۱۰ متر)	ESA	Sentinel-2 MSI

کاربرد اصلی	توضیح	سازمان	مأموریت
رطوبت خاک، تغییر ارتفاع، سیل	رادار با باند C	ESA	Sentinel-1 SAR
تغییرات سطح زمین، لغزش ها	رادار با باند L	JAXA	ALOS/PALSAR

کاربرد	توضیح	منبع	مجموعه
پایش تغییرات ذخیره آب زیرزمینی	تغییرات جرم زمین از ماهواره های دوگانه	NASA/JPL	GRACE (2002-2017)
بررسی افت یا افزایش توده آب	ادامه مأموریت GRACE	NASA/JPL	GRACE-FO (2018-Present)

داده های IDAHO

- مجموعه داده
- ماهیانه
- اقلیم
- منابع آب
- ترکیبی
- داده های زمینی
- داده های ماهواره ای
- دقت ۲/۵ دقیقه ای
- تبخیر و تعرق
- هدررفت آب
- خشکسالی
- بارش تجمعی
- رواناب
- رطوبت خاک
- فشار بخار آب
- سرعت باد
- دمای سطح زمین

داده های IDAHO

داده های GLDAS

- Global Land Data Assimilation System
- شبیه سازی
- داده های اقلیمی
- زمینی و ماهواره ای
- از سال ۱۹۴۸ میلادی
- دقت ۰/۲۵ درجه

- متغیرهای بیواقلیمی
- دما و بارش
- روند تغییرات
- فصلی
- ماهیانه
- دقت ۳۰ ثانیه

داده های WorldClim BIO

داده های FLDAS

- مجموعه داده
- امنیت غذایی
- کشور های در حال توسعه
- بصورت ترکیبی
- داده های زمینی
- داده های ماهواره ای
- دقت ۰/۱ درجه

داده های FLDAS

- تبخیر و تعرق
- فشار سطحی
- رطوبت ویژه
- شار دمای خاک
- شار حرارت محسوس
- شار حرارت نهان
- رواناب سطحی
- بارش
- رطوبت خاک
- دمای هوای سطح
- سرعت باد

داده های GLDAS

- آلبدو
- میانگین دمای سطحی
- رطوبت تاج پوشش
- تبخیر تاج پوشش
- تبخیر خاک
- تبخیر و تعرق
- فشار
- رطوبت نسبی
- شار گرمای نهان و محسوس
- ذوب برف
- بارش
- رطوبت خاک
- دمای خاک
- دمای هوا
- تعرق
- سرعت باد

- میانگین دمای سالیانه
- دامنه تغییرات دمایی
- دمای فصلی
- ایزوترمال
- بیشترین دمای گرمترین ماه
- کمترین دمای سردترین ماه
- دامنه دمای سالیانه
- بارش سالیانه
- بارش مرطوب ترین ماه
- بارش خشک ترین ماه
- بارش فصلی
- و ...

داده های WorldClim BIO

داده های CHIRPS

- داده بارشی
- ایستگاه سینوپتیکی
- ۰/۰۵ درجه
- روزانه
- میلی متر بر روز
- ۱۹۸۱

سنجنده TRMM

- پرکاربردترین
- بارش
- سه ساعته و ماهیانه
- میلی متر بر ساعت
- ۰/۲۵ درجه
- مادون قرمز
- میکروویو غیرفعال
- ۱۹۹۸

سنجنده GPM

- ادامه پایش
- ۲۰۱۴
- بارش
- ۳۰ دقیقه
- مادون قرمز
- دقت ۰/۱ درجه

مدل PERSIANN

- مدل
- برآورد
- میزان بارش
- روزانه
- ۰/۲۵ درجه
- ۱۹۸۳

مناسب برای	توضیح	محیط
کاربران RS / GIS و علوم محیطی	محیط آنلاین در مرورگر https://code.earthengine.google.com	Code Editor (JavaScript API)
کاربران GeoAI و علوم محیطی، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، پروژه‌های اتوماسیون	از طریق Google Colab یا Jupyter Notebook	Python API

← → ↻ earthengine.google.com

Google Earth Engine

Platform Datasets Noncommercial Commercial Timelapse Case Studies FAQ Get Started

Introducing Google Earth AI, our collection of g and datasets to address critical global challenges. [Learn more](#)

Overview
Code Editor
Documentation

A planetary-scale platform for Earth science data & analysis

Powered by Google's cloud infrastructure

▶ Watch Video

Earth Engine Data Catalog

Search / Language

Home Categories All datasets All tags Landsat MODIS Sentinel Publisher Community API Docs Dataset status

A planetary-scale platform for Earth science data & analysis

Earth Engine's public data archive includes more than forty years of historical imagery and scientific datasets, updated and expanded daily.

[View all datasets](#)

Scripts Docs Assets

Filter scripts...

NEW



Owner (5)

- users/mebehbahani1979/flood
- users/mebehbahani1979/GeoAI
- users/mebehbahani197...
- users/mebehbahani1979/modis
- users/mebehbahani1979/sentinel

Revision History

- Writer
- Reader
- Archive
- Examples

New Script

Get Link

Save

Run

Reset

Apps



1

Inspector

Console

Tasks

Use `print(...)` to write to this console.

Welcome to Earth Engine!
Please use the help menu above (?) to learn more about how to use Earth Engine, or [visit our help page](#) for support.



Map

Satellite

ScriptsDocsAssets

06_landsat_classification1
07-landsat_canopy_cove
08-landsat_mangrove
09-landsat_global_forest
10_1-landsat_urban_fars
10-landsat_urban
11-landsat_water
2010
Dama
GRACE
PCA_Aster
PDSI_INDEX
UntitledFile

GRACE *

Get LinkSaveRunResetApps

Imports (2 entries)

var table: Table users/mebehbahani1979/MOND

var imageCollection: ImageCollection NASA/GRACE/MASS_GRIDS_V04/...

1 Map.centerObject(table);

2 Map.addLayer(table);

3

4 // garce mascon cri

5

6 var grace = ee.ImageCollection('NASA/GRACE/MASS_GRIDS_V04/MASCON')

7 .filterBounds(table)

8 .filterDate('2010-01-01','2025-05-01')

9 .select('lwe_thickness');

10

11

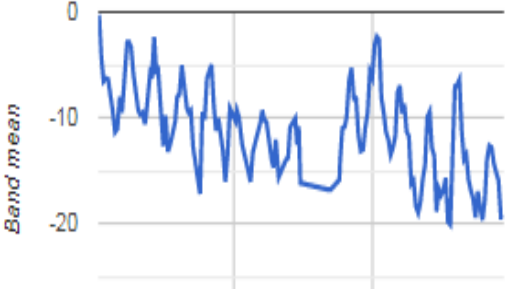
12 print(grace);

InspectorConsoleTasks

Use print(...) to write to this console.

ImageCollection NASA/GRACE/MASS_GRID... JSON

Band mean across images





- 07-landsat_canopy_cove
- 08-landsat_mangrove
- 09-landsat_global_forest
- 10_1-landsat_urban_fars
- 10-landsat_urban
- 11-landsat_water
- 2010
- Dama
- GRACE
- PCA_Aster
- PDSI_INDEX
- UntitledFile
- UntitledFile2

grace monthly

PLACES

RASTERS

- GRACE Monthly Mass Grids Release 06 Version 04 - Ocean
- GRACE Monthly Mass Grids - Ocean EOFR
- GRACE Monthly Mass Grids Release 6.3 Version 4 - Global Mascons
- GRACE Monthly Mass Grids Version 04 - Global Mascon (CRI Filtered)
- GRACE Monthly Mass Grids Release 06 Version 04 - Land
- CHIRTS-daily: Climate Hazards Center InfraRed Temperature with Stations daily temperature data pro...

TABLES

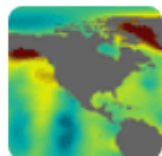
```
10  
11  
12 print(grace);  
13
```



on the map to inspect the layers.

Layers Map Satellite

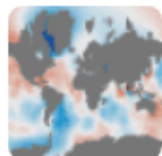
Search results matching "grace monthly"



[GRACE Monthly Mass Grids Release 06 Version 04 - Ocean](#)

NASA Jet Propulsion Laboratory

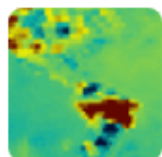
GRACE Tellus Monthly Mass Grids provides monthly gravitational anomalies relative to a 2004-2010 time-mean baseline. The data contained in this dataset are u...



[GRACE Monthly Mass Grids - Ocean EOFR](#)

NASA Jet Propulsion Laboratory

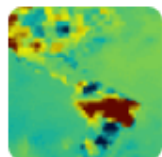
GRACE Tellus Monthly Mass Grids provides monthly gravitational anomalies relative to a 2004-2010 time-mean baseline. The data contained in this dataset are u...



[GRACE Monthly Mass Grids Release 6.3 Version 4 - Global Mascons](#)

NASA Jet Propulsion Laboratory

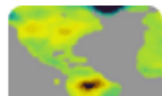
This dataset contains gridded monthly global water storage/height anomalies relative to a time-mean, derived from GRACE and GRACE-FO and processed at JPL usi...



[GRACE Monthly Mass Grids Version 04 - Global Mascon \(CRI Filtered\)](#)

NASA Jet Propulsion Laboratory

This dataset contains gridded monthly global water storage/height anomalies relative to a time-mean, derived from GRACE and GRACE-FO and processed at JPL usi...



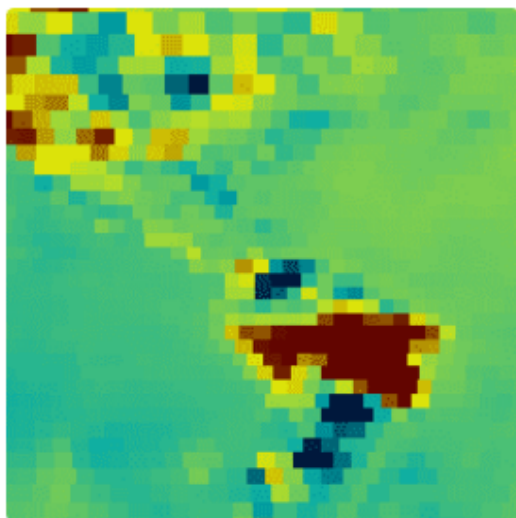
[GRACE Monthly Mass Grids Release 06 Version 04 - Land](#)

NASA Jet Propulsion Laboratory

CLOSE

OPEN IN CATALOG

GRACE Monthly Mass Grids Release 6.3 Version 4 - Gl...



Dataset Availability

2002-03-31T00:00:00 -

Dataset Provider

[NASA Jet Propulsion Laboratory](#)

Collection Snippet

```
ee.ImageCollection("NASA/GRACE/MA  
SS_GRIDS_V04/MASCON")
```

[See example](#)

DESCRIPTION

BANDS

TERMS OF USE

CITATIONS

DOIS

This dataset contains gridded monthly global water storage/height anomalies relative to a time-mean, derived from GRACE and GRACE-FO and processed at JPL using the Mascon approach (RL06.3Mv04). These data are provided in a single data file in netCDF format, and can be used for analysis for ocean, ice, and hydrology phenomena. The water storage/height anomalies are given in equivalent water thickness units (cm). The solution provided here is derived from solving for monthly gravity field variations in terms of geolocated spherical cap mass concentration functions, rather than global spherical harmonic coefficients.

Additionally, realistic geophysical information is introduced during the solution inversion to intrinsically remove correlated error. Thus, these Mascon grids do not need to be de-correlated or smoothed, like traditional spherical harmonic gravity solutions.

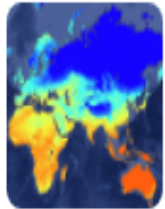
The complete Mascon solution consists of 4,551 relatively independent estimates of surface mass change that have been derived using an equal-area 3-degree grid of individual mascons. It should be noted that this dataset does not correct for leakage errors across coastlines; it is therefore recommended only for users who want to apply their own algorithm to separate between land and ocean mass very near coastlines.

CLOSE

IMPORT

TALOG

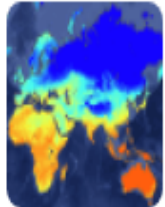
Search results matching "GLDAS"



[GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System](#)

NASA GES DISC at NASA Goddard Space Flight Center

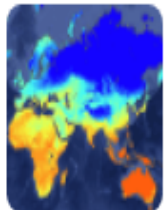
NASA Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) has three components: GLDAS-2.0, GLDAS-2.1, and GLDAS-2.2. GLDAS-2.0 is forced entirely with th...



[Reprocessed GLDAS-2.0: Global Land Data Assimilation System](#)

NASA GES DISC at NASA Goddard Space Flight Center

NASA Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) has three components: GLDAS-2.0, GLDAS-2.1, and GLDAS-2.2. GLDAS-2.0 is forced entirely with th...



[GLDAS-2.2: Global Land Data Assimilation System](#)

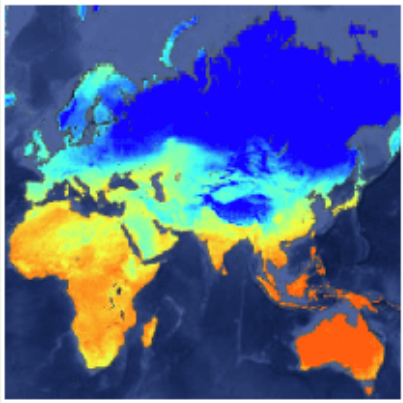
NASA GES DISC at NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center

NASA Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) has three components: GLDAS-2.0, GLDAS-2.1, and GLDAS-2.2. GLDAS-2.0 is forced entirely with th...

CLOSE

OPEN IN CATALOG

◆ AI-generated Key Takeaways ▾



Dataset Availability

2003-01-01T03:00:00Z – 2025-06-30T00:00:00Z

Dataset Provider

[NASA GES DISC at NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center](#)

Earth Engine Snippet

```
ee.ImageCollection("NASA/GLDAS/V022/CLSM/G025/DA1D")
```

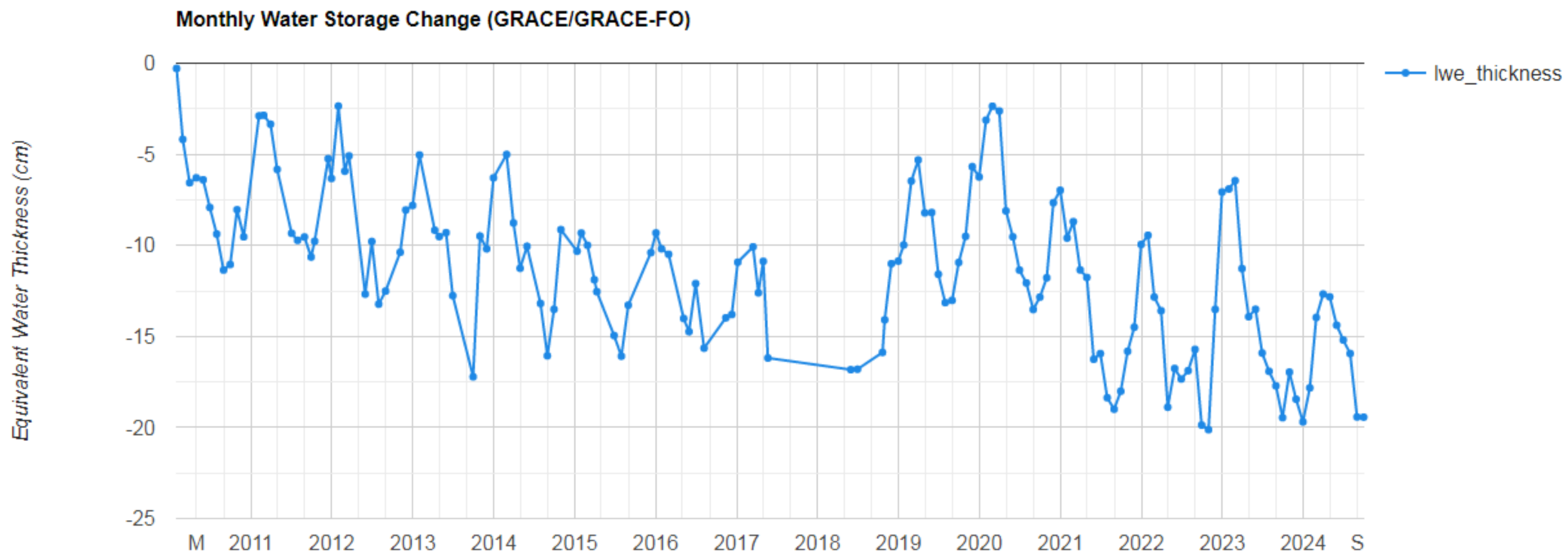
Cadence

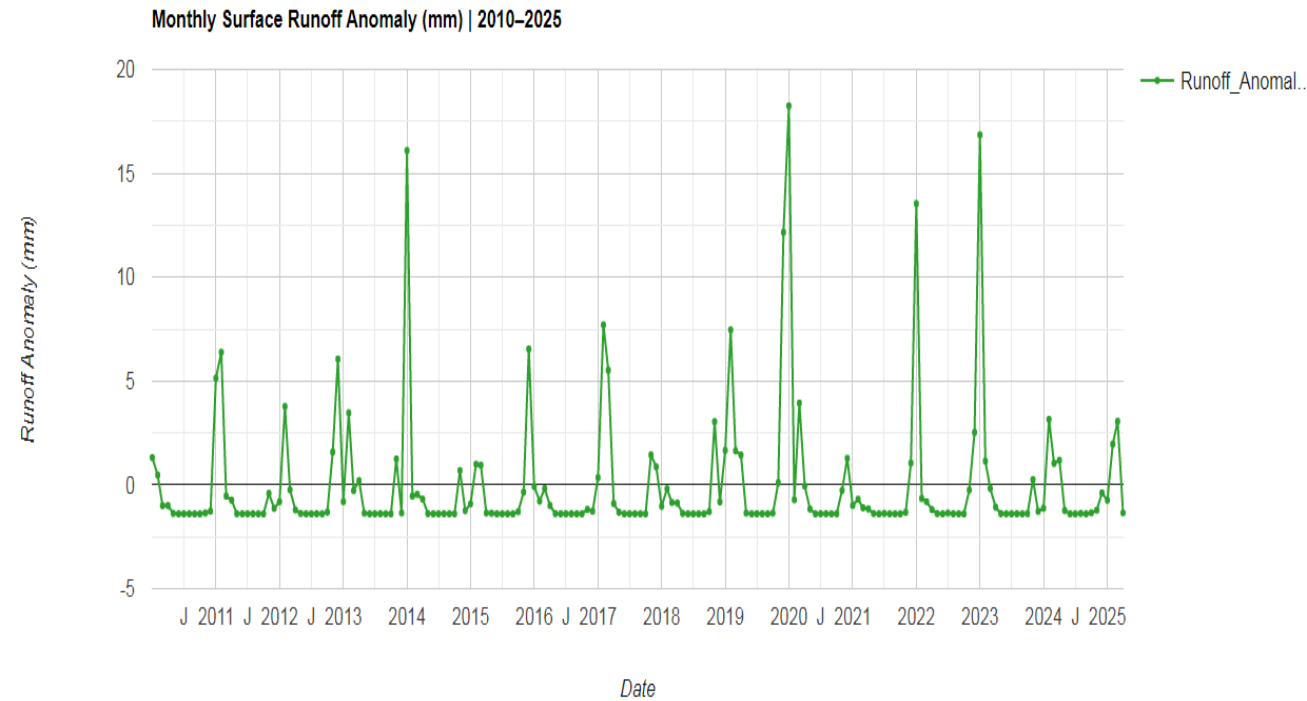
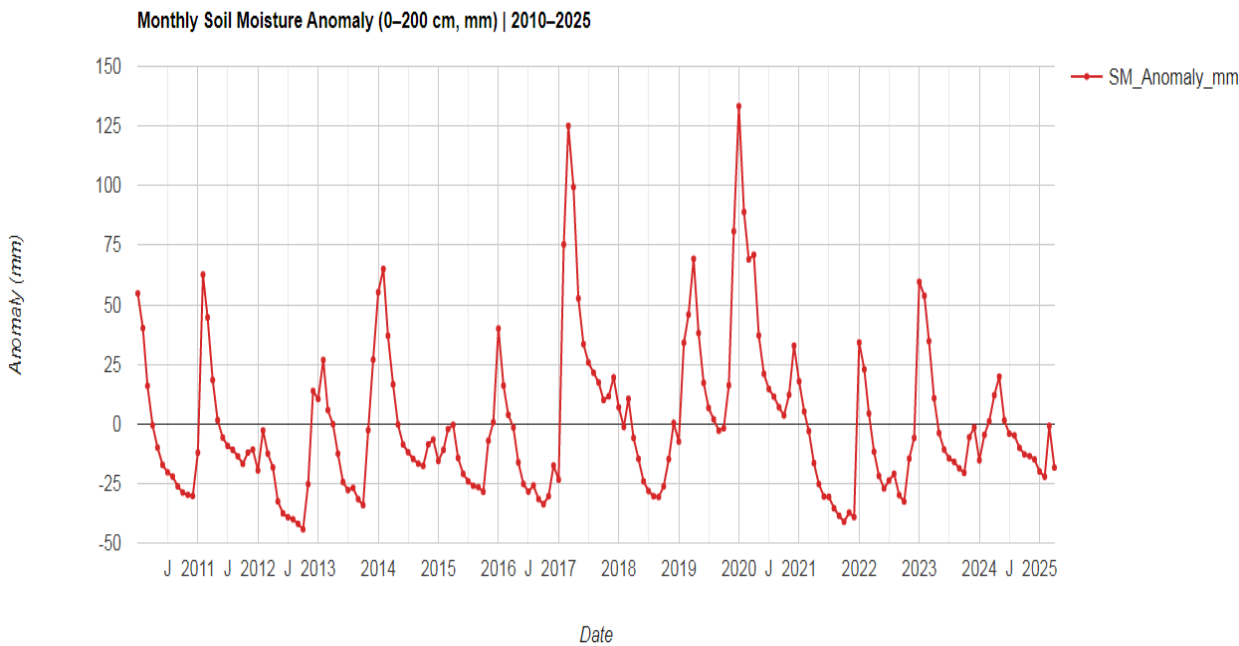
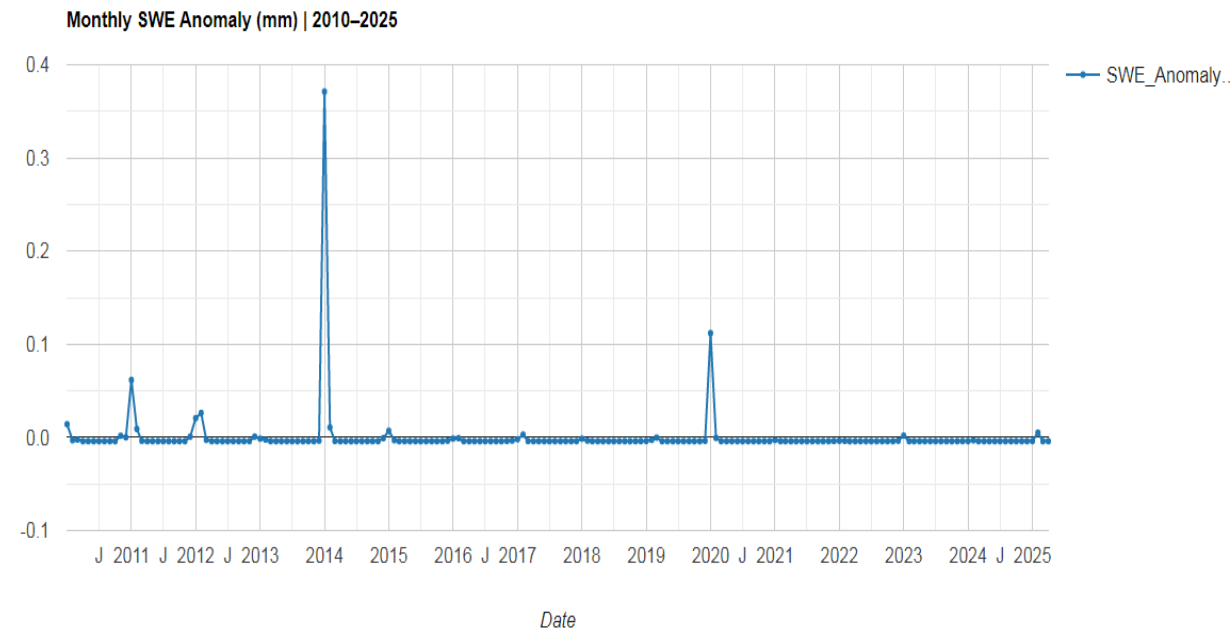
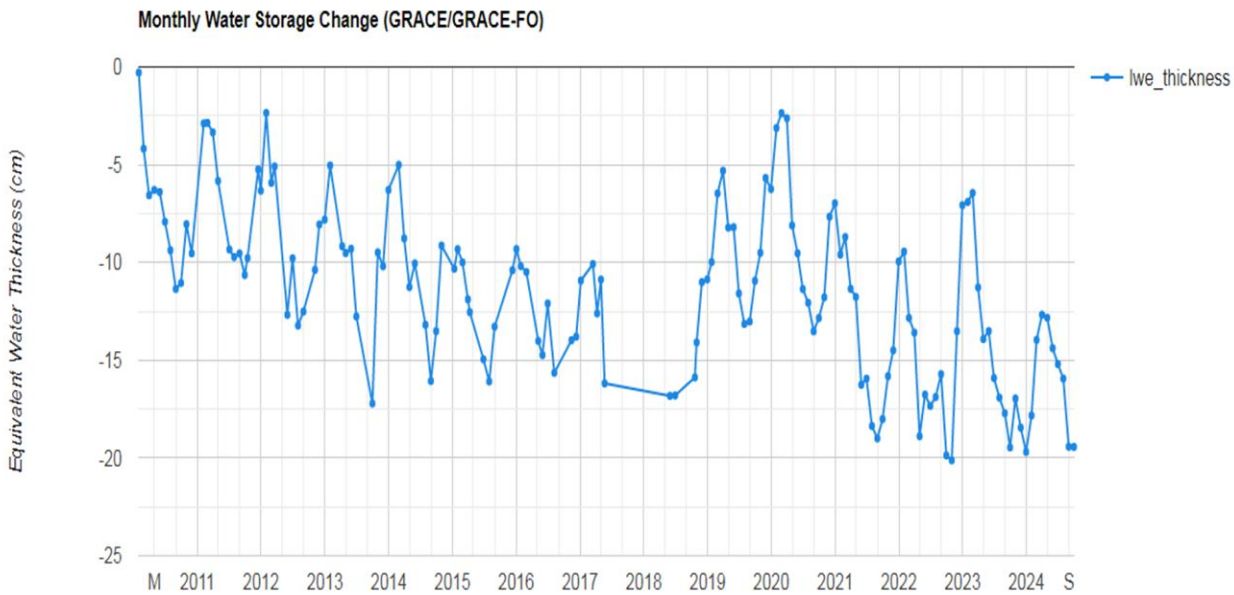
1 Day

Tags

- 3-hourly
- climate
- cryosphere
- evaporation
- forcing
- geophysical
- gldas
- humidity
- ldas
- nasa
- precipitation
- pressure
- radiation
- soil
- soil-moisture
- surface
- temperature
- water-vapor
- wind

Description Bands Image Properties Terms of Use Citations					
Pixel Size					
27830 meters					
Bands					
Name	Units	Min	Max	Pixel Size	Description
ACond_tavg	m/s	0.000379*	5.99291*	meters	Aerodynamic conductance
AvgSurfT_tavg	K	179.818*	324.265*	meters	Average surface skin temperature
CanopInt_tavg	kg/m^2	0*	1.57295*	meters	Plant canopy surface water
ECanop_tavg	kg/m^2/s	-0.021881*	5.3e-05*	meters	Canopy water evaporation
ESoil_tavg	kg/m^2/s	-0.003637*	0.001172*	meters	Direct evaporation from bare soil





$$\Delta TWS = \Delta GW + \Delta SM + \Delta SWE + \Delta SW$$

$$\Delta GW = \Delta TWS - \Delta SM - \Delta SWE - \Delta SW$$

ΔTWS = تغییر ذخیره آب زمینی از داده‌های GRACE

ΔGW = تغییر ذخیره آب زیرزمینی

ΔSM = تغییر رطوبت خاک

ΔSWE = تغییر معادل آب برف

ΔSW = تغییر ذخیره آب سطحی

Google Earth Engine Python API

محیط **Google Earth Engine Python API** یکی از قدرتمندترین ابزارها برای اجرای تحلیل‌های مکانی، پردازش داده‌های ماهواره‌ای و اتصال یادگیری ماشین به داده‌های جغرافیایی است.

ساختار و ماهیت Python API

Python API در واقع رابط (Interface) بین محیط برنامه‌نویسی شما و سرورهای ابری **Earth Engine** است.

این **API** از طریق کتابخانه‌ی رسمی **Google** با نام **earthengine-api** کار می‌کند که ارتباط را با پایگاه داده‌ی **GEE** برقرار می‌سازد.

هر دستور به یک درخواست (**Request**) برای سرورهای گوگل تبدیل می‌شود و نتیجه به صورت شیء (**Object**) به پایتون بازمی‌گردد.

مقایسه Python API با Code Editor

ویژگی	Code Editor	Python API
نوع محیط	مرورگر وب (Online IDE)	محیط پایتون (محلی یا Colab)
رابط کاربری	کدنویسی و گرافیکی، سریع، دیداری	کدنویسی و تحلیلی و خودکار
کاربر هدف	پژوهشگر GIS	پژوهشگر GEOAI و ML
قدرت تحلیل داده	محدود به JavaScript	قابل ترکیب با هر کتابخانه پایتونی
یادگیری ماشین	در GEE محدود	یکپارچه با scikit-learn، TensorFlow، PyTorch
کاربرد	تحلیل سریع، نمایش نقشه	پژوهش پیشرفته، مدل سازی، یادگیری ماشین و ارتباط با مدل های زبان طبیعی هوش مصنوعی، هوش مصنوعی جغرافیایی
ترکیب با کتابخانه های دیگر	محدود	گسترده (NumPy, Pandas, ML, etc)
خروجی ها	نقشه، نمودار، داده	نقشه، نمودار، داده، داشبورد و اپلیکیشن، مدل های خودکار و پایپ لاین مدل های هوش مصنوعی
مناسب برای	پژوهشگران، متخصصان علوم مکانی	پژوهشگران، متخصصان علوم مکانی و علوم داده و توسعه دهندگان

ویژگی‌های کلیدی Python API

ویژگی	توضیح
پشتیبانی از پردازش ابری	همانند Code Editor، پردازش‌ها در سرور گوگل انجام می‌شود
سازگاری با یادگیری ماشین	اجرای مدل‌های ML یا DL بر روی خروجی داده‌های GEE
ادغام با کتابخانه‌های علمی پایتون	ترکیب داده‌ها را با Pandas، NumPy و Matplotlib
اتصال به یادگیری ماشین	استفاده از مدل‌های Scikit-learn، TensorFlow و PyTorch
اتوماسیون تحلیل‌ها	برای تحلیل داده‌های GEE
قابلیت ترکیب با Google Colab و Jupyter Notebook	اجرای تحلیل‌های دوره‌ای و خودکار برای پایش داده‌ها در زمان‌های مختلف.
تعامل با سایر ابزارها	امکان اجرای کدها در محیط‌های آنلاین و اشتراک‌گذاری آن‌ها با تیم تحقیقاتی و کاربران
خروجی قابل انتقال Drive / Cloud Storage	اتصال مستقیم به Google Colab، Jupyter، یا محیط‌های ابری
	امکان ذخیره‌ی خروجی‌ها به صورت CSV، GeoTIFF، یا انتقال به Google

ابزارهای مکمل مهم برای Python API

کتابخانه	توضیح
earthengine-api	رابط اصلی Python برای اجرای کدهای GEE و فراخوانی مجموعه داده‌هایی مثل MODIS, CHIRPS, GLDAS و غیره
geemap	ابزار قدرتمند برای نمایش داده‌های GEE در نقشه‌های تعاملی در پایتون
folium	نمایش نقشه‌ها در Jupyter Notebook.
geopandas	تحلیل داده‌های برداری و shapefile.
xarray	پردازش داده‌های شبکه‌ای (Raster).
matplotlib & seaborn	رسم نمودارهای تحلیلی از سری زمانی.
numpy	انجام عملیات ماتریسی و محاسبه تغییرات ذخایر آب زیرزمینی
scipy.stats	آزمون‌های همبستگی، رگرسیون، و نرمال‌سازی داده‌ها
pymannkendall	اجرای آزمون Mann-Kendall و محاسبه Sen's slope برای داده‌های GRACE
streamlit	تهیه اپلیکیشن و داشبورد و اتوماسیون

مزیت Python API برای پایش و پیش بینی آب زیرزمینی

Python API این امکان می دهد:

- داده های GRACE، CHIRPS، MODIS و FLDAS و GLDAS و سایر دیتاست های موجود را از GEE فراخوانی شود.
- امکان پیش پردازش های پیشرفته را فراهم می کند.
- تحلیل های زمانی و مکانی انجام را انجام می دهد.
- امکان جدا سازی آب زیرزمینی از آب زمینی را فراهم می کنید.
- مدل های یادگیری ماشین (Random Forest, LSTM, ...) را برای ریزمقیاس سازی و پیش بینی تغییرات آب زیرزمینی بکار می برد.
- فرایندها را به صورت خودکار و تکرارپذیر ذخیره می کند.

فرآیند ترکیب داده‌های GRACE اجزای چرخه آب در Google Earth Engine Python API

مرحله ۱: انتخاب محدوده و بازه زمانی

مرحله ۲: فراخوانی دیتاست های GRACE/GRACE-FO و رطوبت خاک، آب معادل برف و جریان سطحی

مرحله ۳: هم‌مقیاس‌سازی زمانی

مرحله ۴: محاسبه سری زمانی تغییرات اجزای چرخه آب (آب زمینی، رطوبت خاک، آب معادل برف و جریان سطحی)

مرحله ۵: محاسبه سری زمانی آب زیرزمینی با بیلان آبی

مرحله ۶: ریزمقیاس‌سازی (Downscaling) با روش های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

مرحله ۷: تحلیل سری زمانی و روند



پایش تغییرات آب زیرزمینی حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان

[]



```
# 1. نصب و بارگذاری کتابخانه‌ها
!pip install earthengine-api
!pip install geemap==0.16.0 --quiet
import ee
import geemap
import geopandas as gpd
import pandas as pd
import os
import time
import matplotlib.pyplot as plt

# 2. احراز هویت و مقداردهی اولیه Earth Engine
ee.Authenticate()
ee.Initialize(project='.....')

# 3. اتصال به Google Drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

# 4. بارگذاری شیپ فایل و تعریف ناحیه مورد مطالعه (ROI)

shapefile_path = '/content/drive/MyDrive/basin/khaliij.shp'
# تبدیل WGS84
gdf = gpd.read_file(shapefile_path).to_crs(epsg=4326)
# تبدیل به آبجکت Earth Engine
roi = geemap.geopandas_to_ee(gdf)
```

... Show hidden output



Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

[How can I install Python libraries?](#)

[Load data from Google Drive](#)

[Show an example of training a simple ML model](#)



GRACE یایش سری زمانی آب زمینی

```
[ ]  
  
# 5. بارگذاری مجموعه داده GRACE  
grace = ee.ImageCollection('NASA/GRACE/MASS_GRIDS/LAND') \  
    .filterBounds(roi) \  
    .filterDate('2005-01-01', '2024-12-31') \  
    .select('lwe_thickness_csr') # انتخاب باند صحیح  
  
# 6. تعریف تابع برای استخراج میانگین ضخامت آب مایع برای هر تصویر  
def extract_mean(img):  
    stat = img.reduceRegion(  
        reducer=ee.Reducer.mean(),  
        geometry=roi.geometry(),  
        scale=100000, # مقیاس تقریبی (100 km)  
        maxPixels=1e13  
    )  
    return img.set('date', img.date().format()).set('mean_lwe_csr', stat.get('lwe_thickne  
  
# 7. اعمال تابع استخراج بر روی مجموعه تصاویر  
grace_timeseries = grace.map(extract_mean)  
  
# 8. تبدیل سری زمانی به دیتا فریم  
dates = grace_timeseries.aggregate_array('date').getInfo()  
values = grace_timeseries.aggregate_array('mean_lwe_csr').getInfo()  
  
grace_df = pd.DataFrame({
```

Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

Explain the KeyboardInterrupt in the last cell

Show how to use the 'roi' object in Earth Engine

Load another dataset for comparison

What can I help you build?





Commands + Code + Text ▶ Run all

Connect ^



```
[ ] Map.add_basemap('HYBRID') # OSM نقشه ترکیبی  
  
# نمایش نقشه  
Map
```

FLDAS سری زمانی رواناب و تغییرات رواناب با

```
[ ] # مسیر پوشه ذخیره  
output_folder = '/content/drive/MyDrive/Runoff_FLDAS'  
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)  
  
# بارگذاری داده های رواناب FLDAS  
fldas_runoff = (ee.ImageCollection("NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001")  
                .filterDate('2005-01-01', '2024-12-31')  
                .select('Qs_tavg'))  
  
# منطقه مورد نظر  
shapefile_path = '/content/drive/MyDrive/marz/marz.shp'  
gdf = gpd.read_file(shapefile_path).to_crs(epsg=4326)  
roi = geemap.geopandas_to_ee(gdf)  
  
# تابع استخراج رواناب ماهانه  
def extract_runoff_monthly(img):  
    date = ee.Date(img.get('system:time_start'))  
    month = date.format('MM')
```

Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

Explain the KeyboardInterrupt in the last cell

Show how to use the 'roi' object in Earth Engine

Load another dataset for comparison

What can I help you build?





[]

```
----- \ ----- /
# مسیر پوشه ذخیره
output_folder = '/content/drive/MyDrive/SoilMoisture_FLDAS'
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)
```

FLDAS سری زمانی رطوبت خاک و تغییرات آن با

[]

```
# FLDAS بارگذاری داده های رطوبت خاک
fldas_soil = (ee.ImageCollection("NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001")
              .filterDate('2005-01-01', '2024-12-31')
              .select([
                  'SoilMoi10_40cm_tavg',
                  'SoilMoi40_100cm_tavg',
                  'SoilMoi100_200cm_tavg'
              ]))

# منطقه مورد نظر
shapefile_path = '/content/drive/MyDrive/marz/marz.shp'
gdf = gpd.read_file(shapefile_path).to_crs(epsg=4326)
roi = geemap.geopandas_to_ee(gdf)

# تابع استخراج رطوبت خاک ماهانه
def extract_soilmoisture_layers(img):
    date = ee.Date(img.get('system:time_start'))
    month = date.format('MM')
```

Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

Explain the KeyboardInterrupt in the last cell

Show how to use the 'roi' object in Earth Engine

Load another dataset for comparison

What can I help you build?





```
[ ] plt.show()
```

FLDAS سری زمانی آب معادل برف و تخییرات آن با

```
[ ] # مسیر پوشه ذخیره در گوگل درایو
output_folder = '/content/drive/MyDrive/SWE_FLDAS'
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

# 1. FLDAS از (SWE) بارگذاری داده‌های آب معادل برف
fldas_swe = (ee.ImageCollection("NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001")
              .filterDate('2005-01-01', '2024-12-31') # بازه زمانی
              .select('SWE_inst')) # برای آب معادل برف SWE_inst انتخاب یاند

# 2. منطقه مورد نظر برای استخراج داده‌ها
shapefile_path = '/content/drive/MyDrive/marz/marz.shp' # مسیر فایل شپ
gdf = gpd.read_file(shapefile_path).to_crs(epsg=4326) # WGS84 تبدیل به
roi = geemap.geopandas_to_ee(gdf) # GEE تبدیل به منطقه مورد نظر در

# 3. تابع استخراج آب معادل برف ماهانه
def extract_swe_fldas(img):
    date = ee.Date(img.get('system:time_start'))
    month = date.format('MM')
    year = date.format('YYYY')

    stats = img.reduceRegion(
        reducer=ee.Reducer.mean(),
```

Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

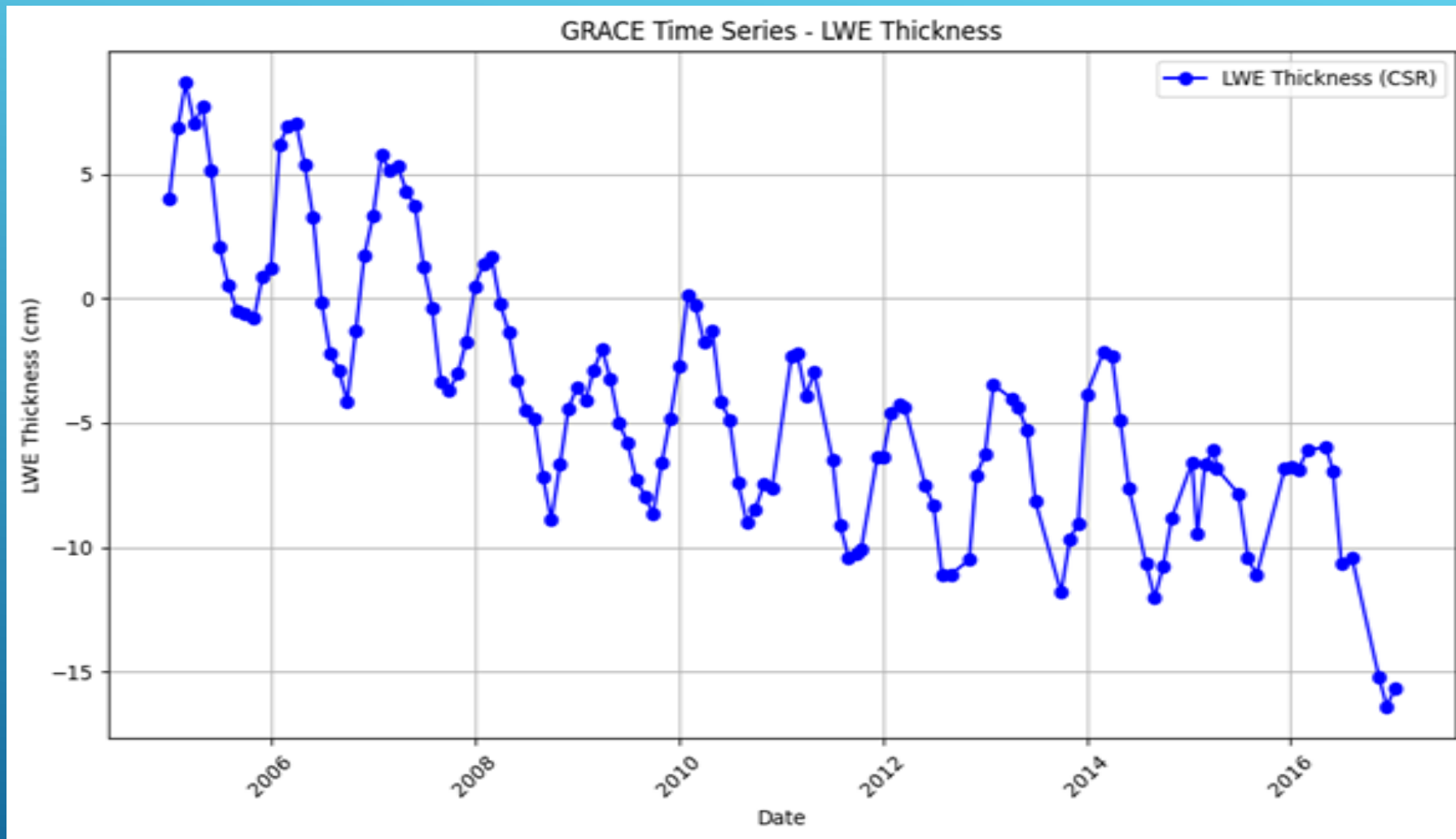
Explain the KeyboardInterrupt in the last cell

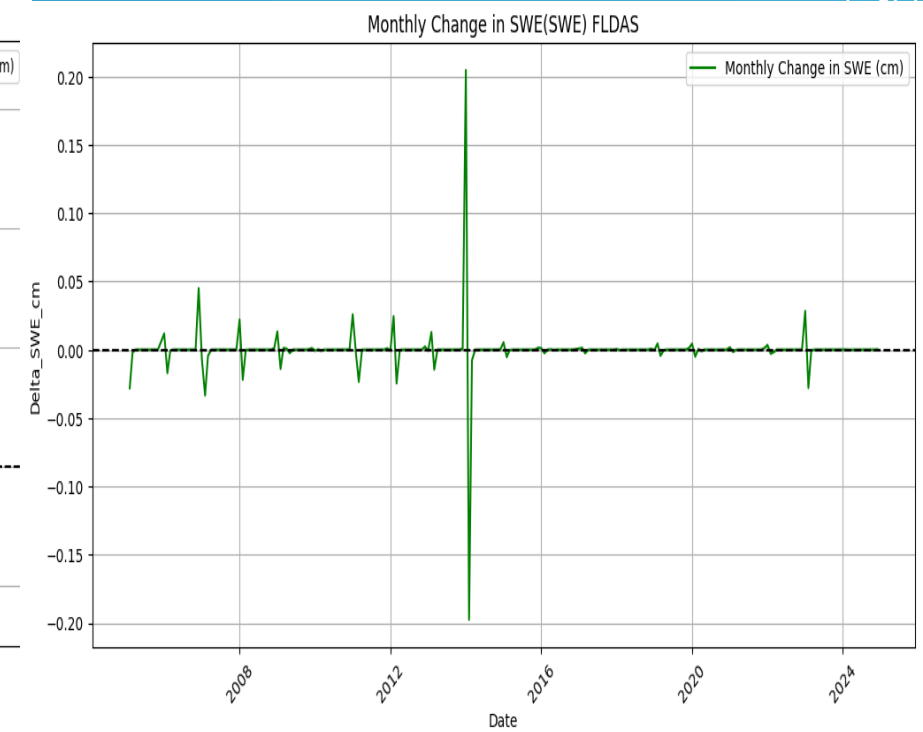
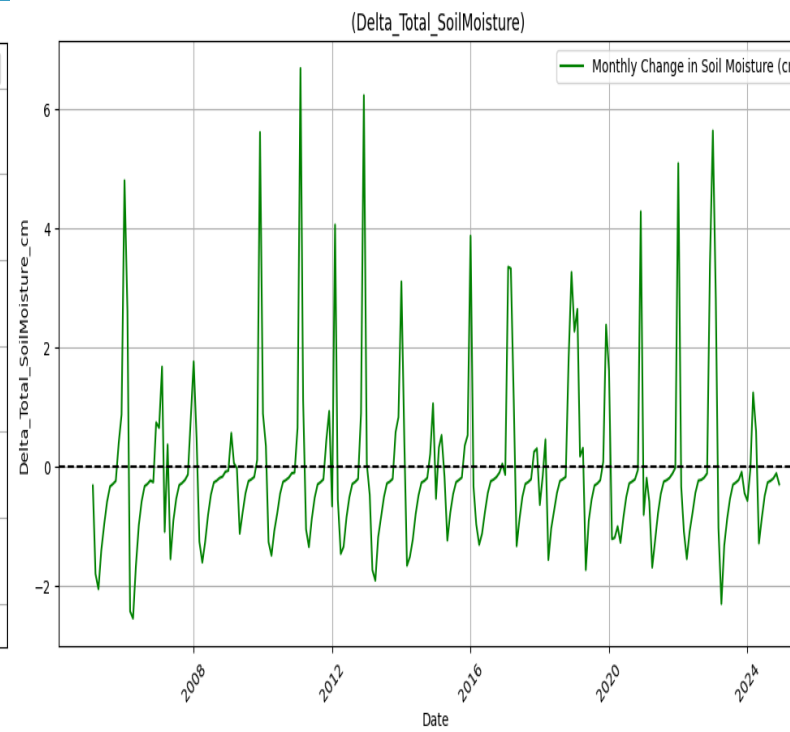
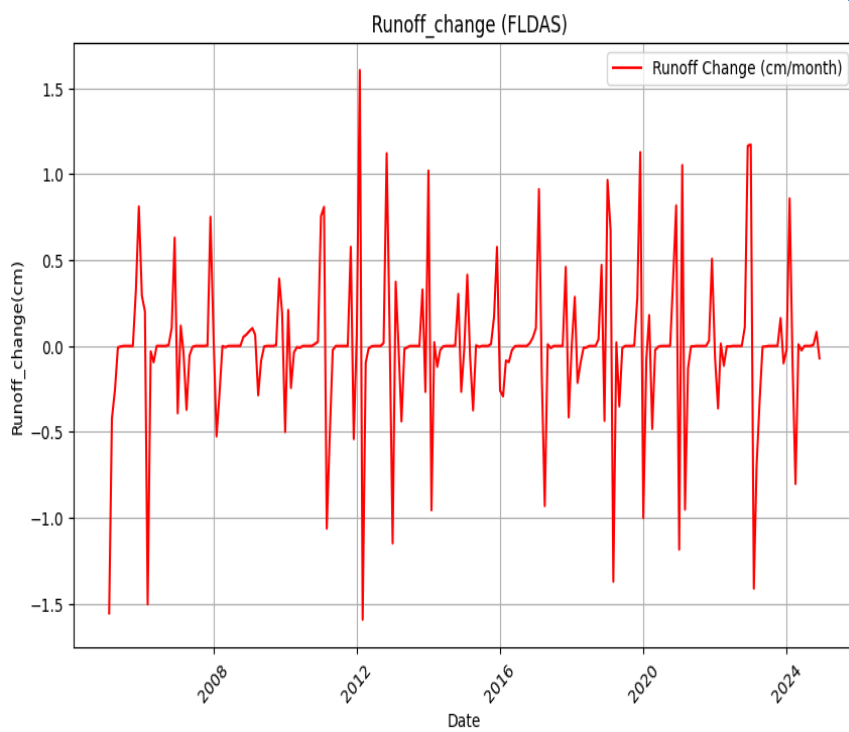
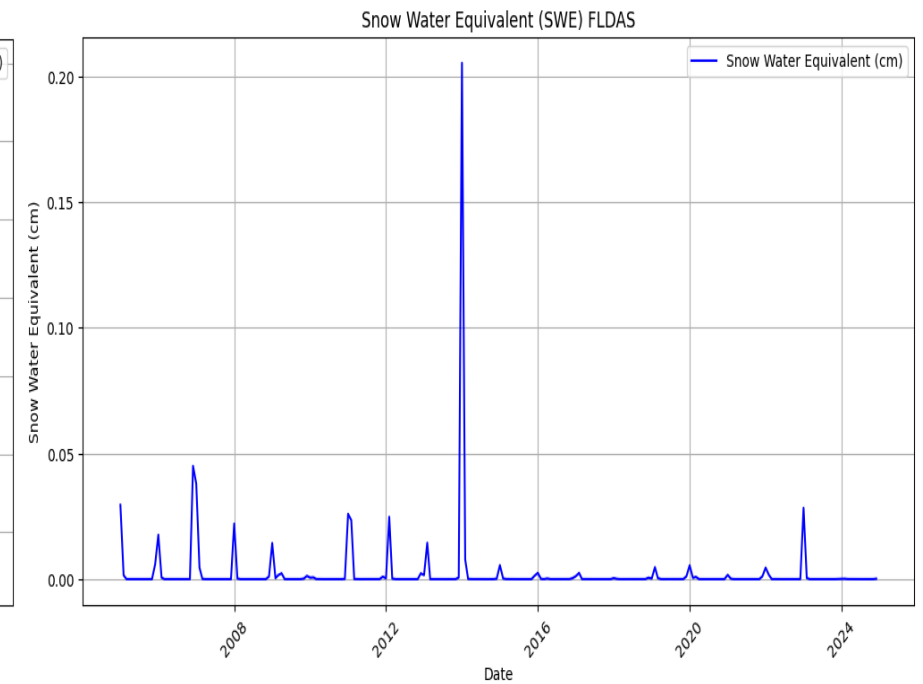
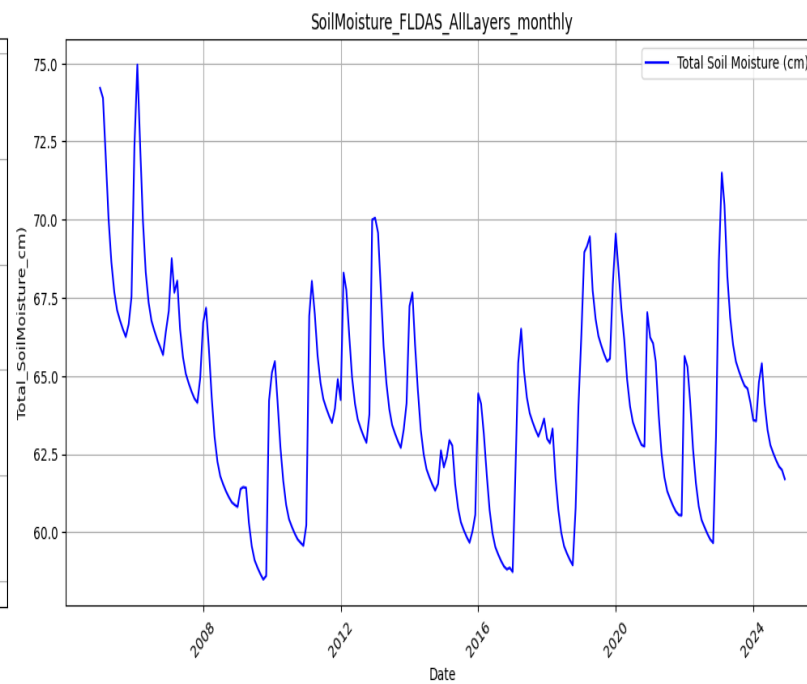
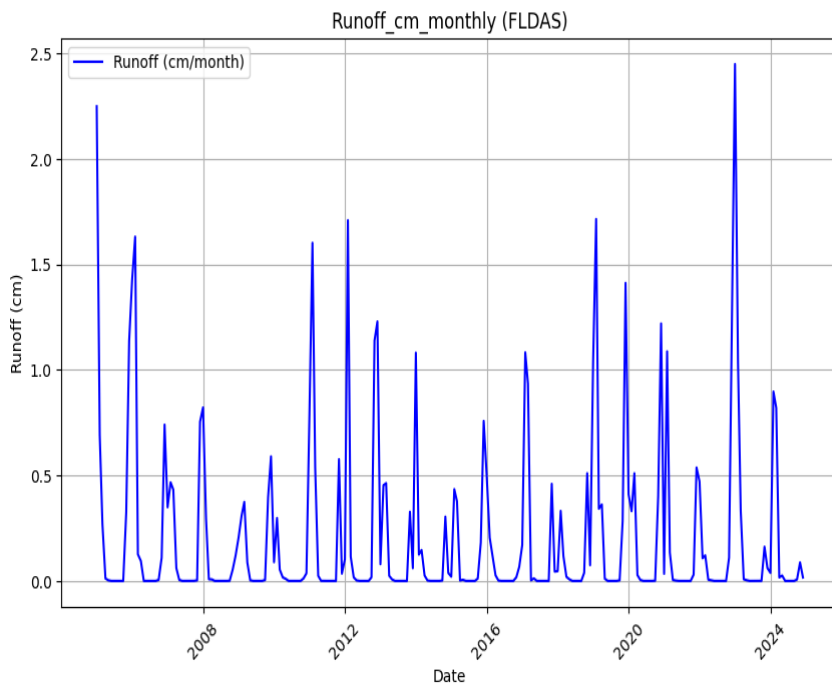
Show how to use the 'roi' object in Earth Engine

Load another dataset for comparison

What can I help you build?









Commands + Code + Text ▶ Run all

Connect ^



```
[ ] | .....  
plt.show()
```

FLDAS سری زمانی آب معادل برف و تغییرات آن با

```
[ ] |  
# مسیر پوشه ذخیره در گوگل درایو  
output_folder = '/content/drive/MyDrive/SWE_FLDAS'  
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)
```

```
# 1. FLDAS از (SWE) داده‌های آب معادل برف
```

Gemini، سری مدل‌های زبانی بزرگ (LLM) و چندمدلی است که توسط **Google** توسعه داده شده است.

Google Colab محیطی ابری برای نوت‌بوک‌های پایتون است که امکان اجرا در مرورگر را فراهم می‌کند.

ترکیب این دو ابزار یعنی بتوانی در **Colab** به **Gemini** متصل شوی و از آن برای تولید محتوا، تحلیل داده، تولید کد یا سایر تسک‌ها استفاده کنی.

```
month = date.format('MM')  
year = date.format('YYYY')  
  
stats = img.reduceRegion(  
    reducer=ee.Reducer.mean(),
```

Gemini



Hello, Mohammad Ebrahim

How can I help you today?

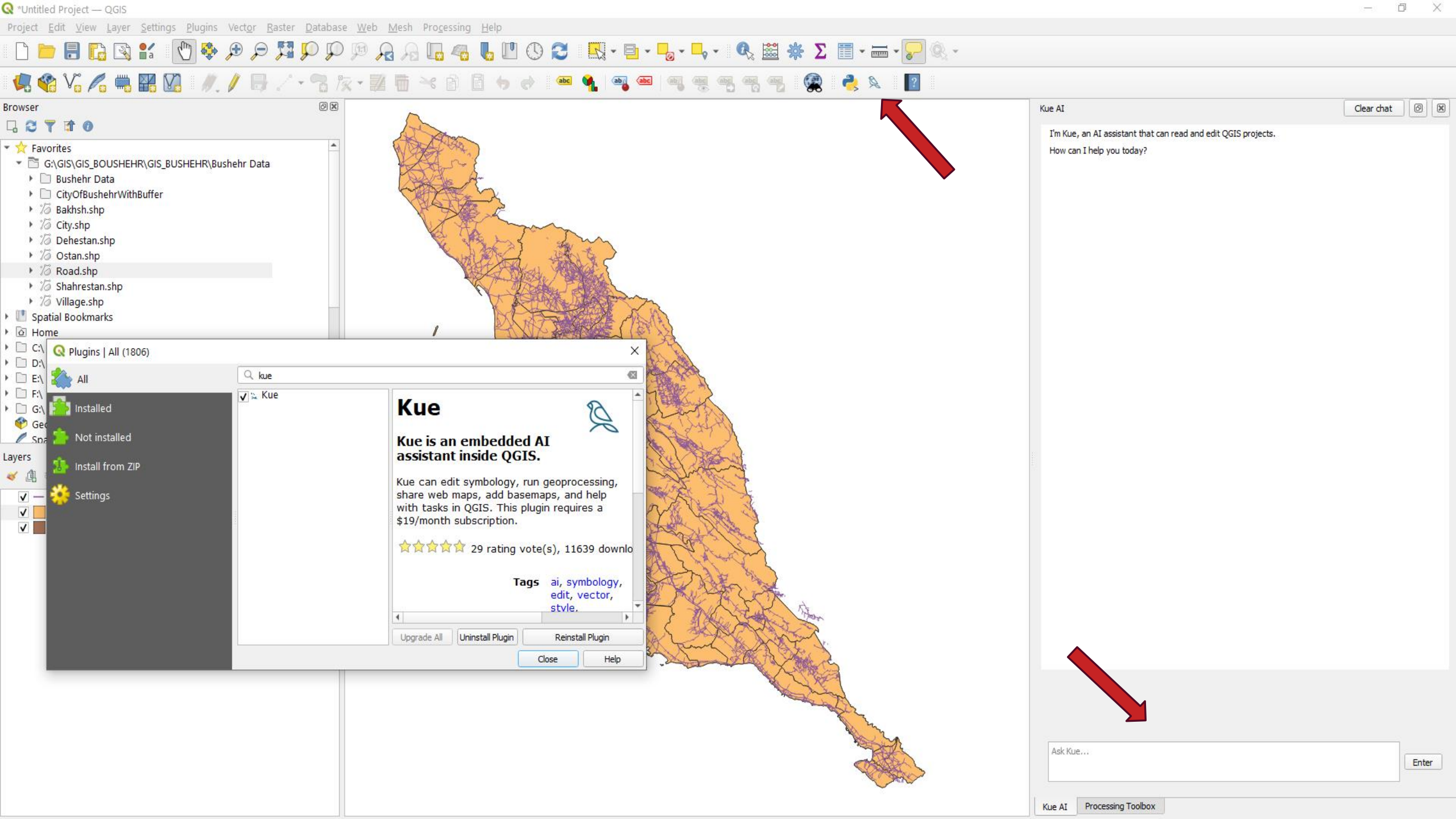
Explain the KeyboardInterrupt in the last cell

Show how to use the 'roi' object in Earth Engine

Load another dataset for comparison

What can I help you build?





ریزمقیاس سازی (Downscaling)

ریزمقیاس سازی (Downscaling) فرایندی است که طی آن داده‌های کم‌رزولوشن با استفاده از روابط آماری، فیزیکی یا یادگیری ماشین به داده‌های با تفکیک بالاتر تبدیل می‌شوند.

$$f(TWS_{GRACE}, X_1, X_2, \dots, X_n) = fineTWS$$

TWS_{GRACE}: تغییرات جرم کل آب از GRACE

TWS_{fine}: تغییرات جرم کل آب ریزمقیاس شده

X_i: داده‌های کمکی با وضوح بالاتر (مثل NDVI، بارش، دما، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک)

f: تابع مدل سازی (رگرسیون، Random Forest، XGBoost، شبکه عصبی و ...)

الگوریتم های یادگیری ماشین در ریزمقیاس سازی داده های GRACE

الگوریتم	توضیح	منابع ورودی پیشنهادی	متغیر های هدف
Random Forest (RF)	مجموعه ای از درخت های تصمیم گیری با متوسط گیری خروجی	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Gradient Boosting (XGBoost / LightGBM)	درخت های تصمیم با بهبود مرحله ای خطاها	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Support Vector Regression (SVR)	مدل خطی یا غیر خطی با کرنل برای پیش بینی مقادیر پیوسته	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Linear / Polynomial Regression	مدل خطی یا چند جمله ای	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE

الگوریتم های یادگیری عمیق در ریزمقیاس سازی داده های GRACE

الگوریتم	توضیح	منابع ورودی پیشنهادی	متغیر های هدف
Deep Neural Networks (DNN)	شبکه عصبی با چند لایه مخفی	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Convolutional Neural Networks (CNN)	شبکه عصبی با لایه های کانولوشنی	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Recurrent Neural Networks (RNN / LSTM)	شبکه عصبی بازگشتی برای داده های سری زمانی	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE
Hybrid Models (CNN-LSTM, RF+DL)	ترکیب یادگیری مکانی و زمانی	داده های تکمیلی اقلیمی و محیطی	تغییرات کل آب زمینی GRACE

ورودی های مورد نیاز و داده های مکمل جهت ریزمقیاس سازی

نوع داده	رزولوشن مکانی	رزولوشن زمانی	کاربرد در ریزمقیاس سازی
GRACE / GRACE-FO	~110 km or 1°	ماهانه	پایه‌ی اصلی تحلیل و متغیر هدف در مدل ریزمقیاس سازی
Precipitation بارش	5–10 km	روزانه / ماهانه	متغیر ورودی مؤثر بر تغییرات آب زیرزمینی
water surface stream رواناب		روزانه / ماهانه	یکی از مؤلفه‌های مؤثر در تفکیک سیگنال GRACE
تبخیر و تعرق Evapotranspiration	500 m – 10 km	8 روزه / ماهانه	جزء منفی تراز آب و شاخص تنش آبی سطحی
رطوبت خاک Soil Moisture	9–25 km	روزانه / ماهانه	یکی از مؤلفه‌های مؤثر در تفکیک سیگنال GRACE
برف و یخ Snow Water Equivalent	0.25° – 500 m	ماهانه / روزانه	حذف مؤلفه برف از سیگنال GRACE
پوشش زمین و NDVI	500 m	ماهانه	شاخص‌های سبزی‌نگی و کاربری اراضی در تخمین ذخیره آب
ارتفاع و شیب DEM	30 m	ثابت	به‌عنوان ویژگی کمکی در مدل‌های ریزمقیاس سازی
برداشت انسانی از منابع آب زیرزمینی	متغیر	سالانه	برای تصحیح اثر انسانی بر GRACE
داده‌های مشاهداتی چاه‌ها (In-situ)	نقطه‌ای	ماهانه / فصلی	برای صحت‌سنجی و آموزش مدل‌های ML

کتابخانه‌های Python در ریزمقیاس‌سازی داده‌های GRACE

کتابخانه	کاربرد	توضیح
scikit-learn	الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML)	پیاده‌سازی مدل‌هایی مانند SVM, Random Forest, Regression برای تخمین داده‌های GRACE در وضوح بالاتر
tensorflow / pytorch	یادگیری عمیق (DL)	آموزش مدل‌های CNN یا LSTM برای ریزمقیاس‌سازی مکانی یا زمانی داده‌های GRACE
xgboost / lightgbm	مدل‌های تقویتی (Boosting)	مدل‌های دقیق و سریع برای پیش‌بینی تغییرات آب زیرزمینی با ترکیب داده‌های GRACE، بارش و تبخیر
rasterio	پردازش نقشه‌های GeoTIFF	برای کار با نقشه‌های خروجی GRACE و داده‌های پیش‌بینی‌شده در قالب رستر
geostatspy / pykrige	زمین‌آمار (Kriging, Cokriging)	برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های GRACE با روش‌های زمین‌آمار به جای یادگیری ماشین
geemap.ml	مدل‌های ML در محیط GEE	اتصال مستقیم بین مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های GEE در Colab (پشتیبانی از Random Forest و CART در ابر)

گام به گام ریزمقیاس سازی GRACE در Python Colab

گام ۱: آماده سازی محیط کاری

۱. نصب و فعال سازی کتابخانه ها در Colab

۲. وارد کردن کتابخانه های مورد نیاز برای پردازش و مدل سازی

گام ۲: تعریف محدوده و بازه زمانی

گام ۳: فراخوانی داده های GRACE و داده های مکمل

گام ۴: هم مقیاس سازی زمانی و مکانی

۱. میانگین ماهانه برای داده های روزانه

۲. Resample داده ها به یک رزولوشن مکانی (مثلاً ۰.۰۵° یا ۵km)

گام ۵: استخراج داده ها برای آموزش مدل

۱. تعریف منطقه و استخراج مقادیر پیکسل ها

۲. ادغام داده ها به یک دیتافریم برای مدل ML

گام ۶: آموزش مدل یادگیری ماشین

۱. تقسیم داده به آموزش و تست

۲. مدل سازی

۳. ارزیابی مدل

گام ۷: ریزمقیاس سازی نهایی و مصور سازی

۱. اعمال مدل آموزش دیده روی تصاویر ماهانه

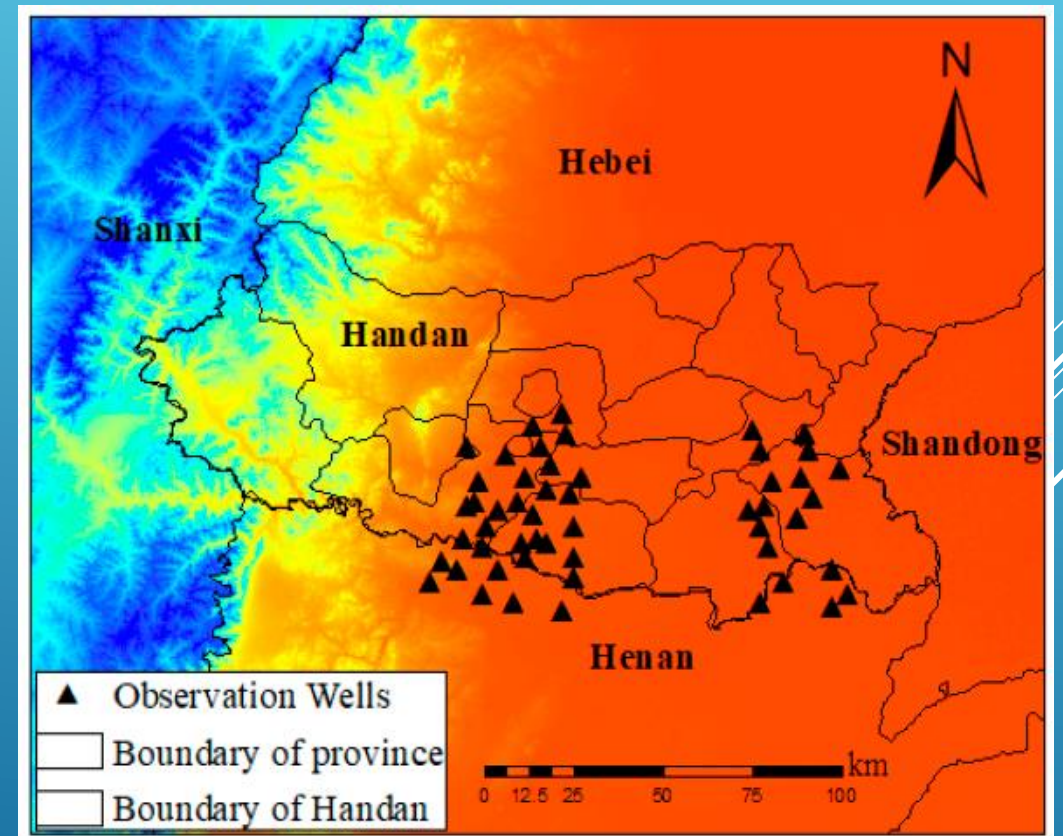
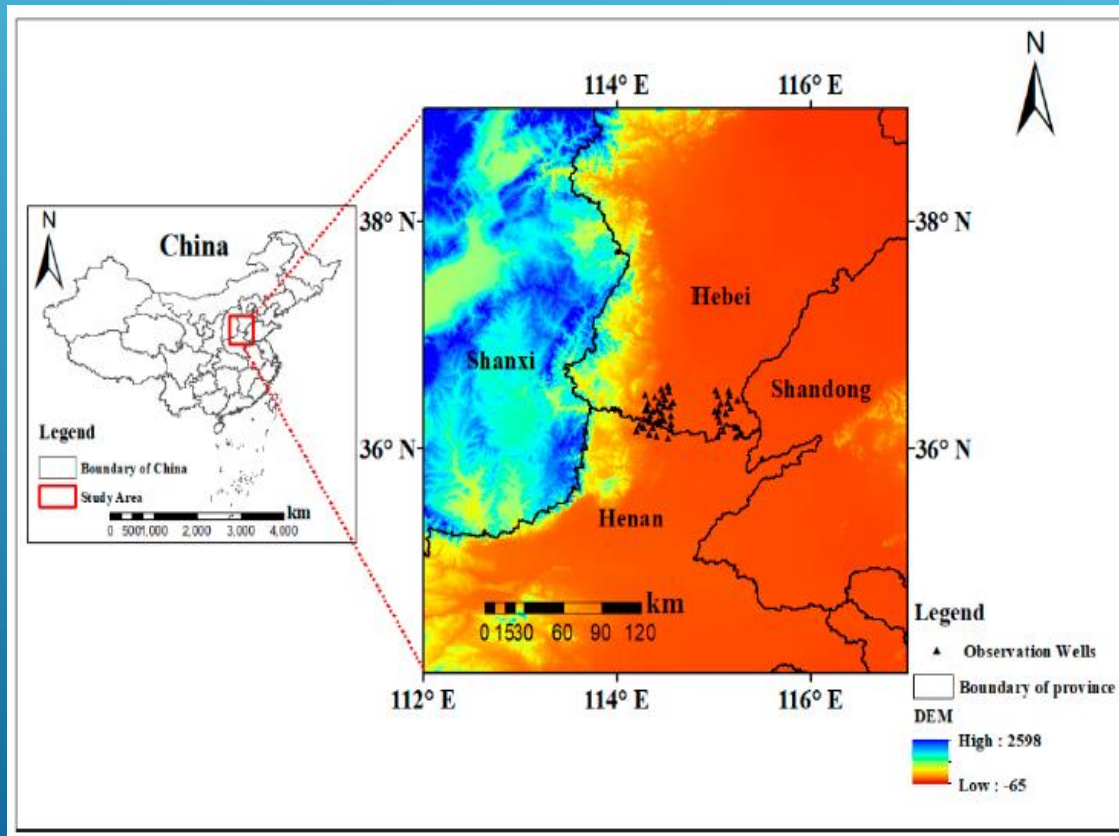
۲. مصور سازی در Colab

Downscaling of GRACE-Derived Groundwater Storage Based on the Random Forest Model

Li Chen, Qisheng He *, Kun Liu, Jinyang Li and Chenlin Jing

Published: 11 December 2019

Remote Sens. 2019, 11, 2979; doi:10.3390/rs11242979



۱. فراخوانی دیتاست ها، فیلتر زمانی، فیلتر مکانی

۱. شش متغیر هیدرولوژیکی کلیدی (ورودی ها) داده های مدل NOAH نسخه GLDAS-1 با وضوح مکانی 0.25×0.25 درجه طی بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۳ تا جولای ۲۰۱۶ شامل

بارش (Precipitation)، تبخیر و تعرق واقعی (ET)، رواناب سطحی (Runoff)، رطوبت خاک (Soil Moisture, SM)، آب معادل برف (Snow Water Equivalent, SWE)، آب تاج گیاه (Canopy Water, CW)

۲. پیش پردازش:

داده های با تفکیک مکانی 0.25 درجه به 1 درجه باز نمونه گیری می شوند.

مقادیر میانگین ماهانه هر متغیر در هر پیکسل محاسبه می شود.

۳. مدل های یادگیری ماشین TWS مشاهداتی GRACE و شش متغیر هیدرولوژیکی در تفکیک مکانی 1 درجه آموزش داده می شود.

۳: تصحیح باقیمانده (Residual Correction)

۱. باقیمانده TWS:

ابتدا TWS شبیه سازی شده توسط مدل RF از TWS مشاهداتی GRACE کم می شود

$$RF TWS - GRACE TWS = Residual$$

۲. محاسبه توزیع باقیمانده در تفکیک ۱ درجه

میانگین باقیمانده ها برای هر پیکسل ۱ درجه محاسبه می شود

۳. درونیابی باقیمانده به تفکیک ۰.۲۵ درجه

برای افزایش وضوح مکانی، باقیمانده ها با تابع مکعبی (Cubic Interpolation) از ۱ درجه به ۰.۲۵ درجه درونیابی می شوند.

۴: اعمال مدل مدل جنگل تصادفی، مدل ماشین بردار پشتیبان، مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل رگرسیون خطی چندگانه بر روی متغیرهای ۰.۲۵ درجه

۱. مدل آموزش داده شده در مرحله ابر روی شش متغیر هیدرولوژیکی با وضوح ۰.۲۵ درجه اعمال می شود تا TWS تخمینی با وضوح ۰.۲۵ درجه به دست آید.

۲. جمع بندی TWS نهایی ۰.۲۵ درجه

TWS تخمینی ۰.۲۵ درجه + باقیمانده ۰.۲۵ درجه = TWS کاهش مقیاس شده نهایی

۵. استخراج (GWS) Groundwater Storage

۱. کسر مؤلفه‌های سطحی و خاکی

از TWS کاهش مقیاس شده، مقادیر SM، SWE و CW مدل GLDAS NOAH با وضوح ۰.۲۵ درجه کسر می‌شوند

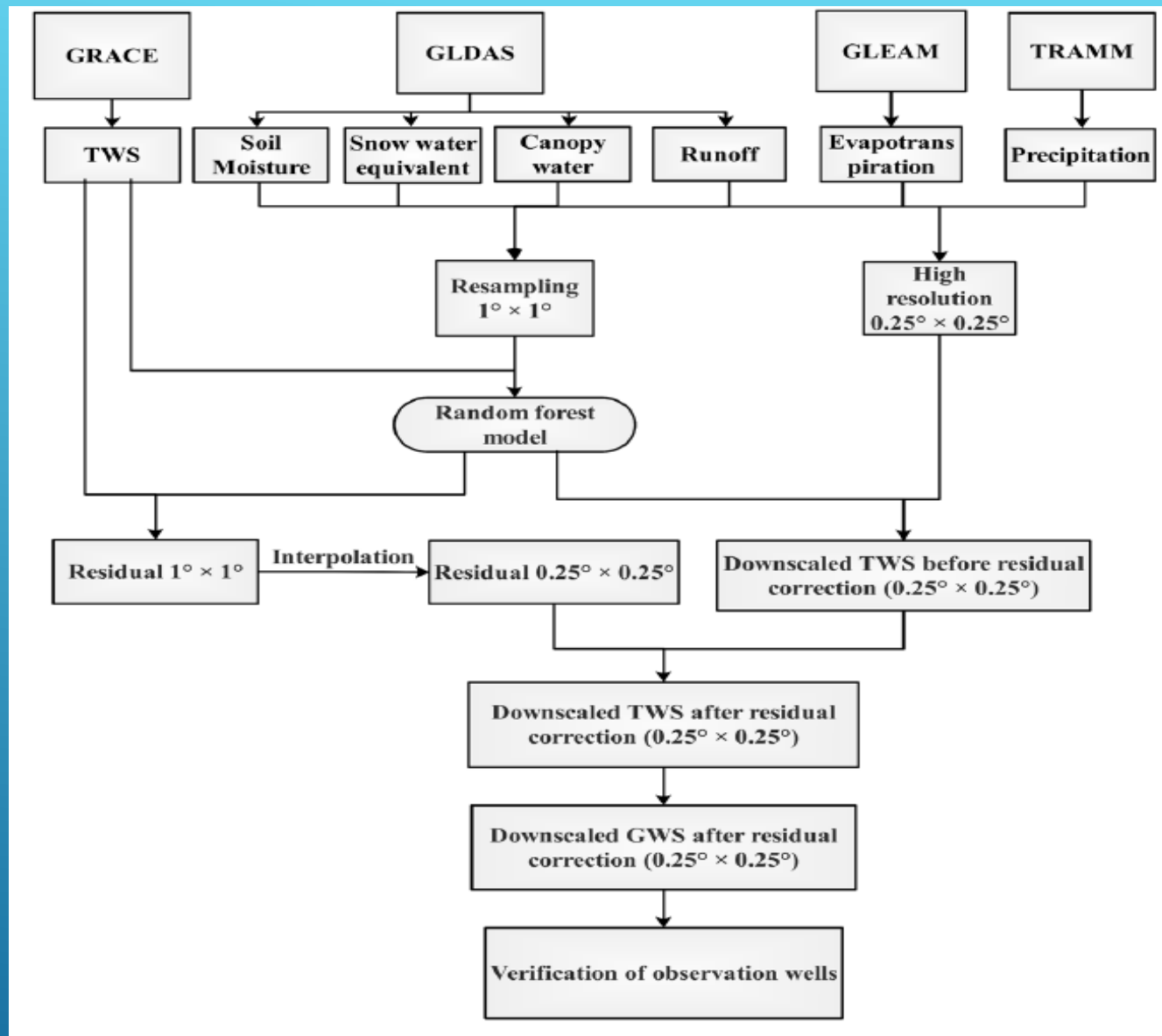
$$(CW + SWE + SM) - 0.25 \cdot TWS = GWS$$

۶. مقایسه داده‌ها و تحلیل خطا

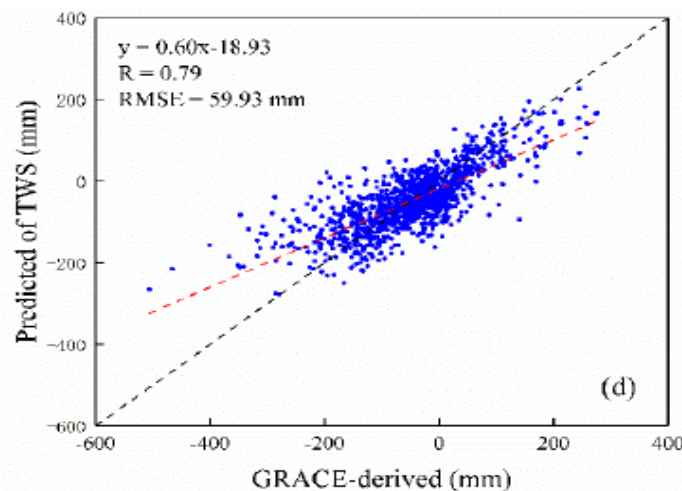
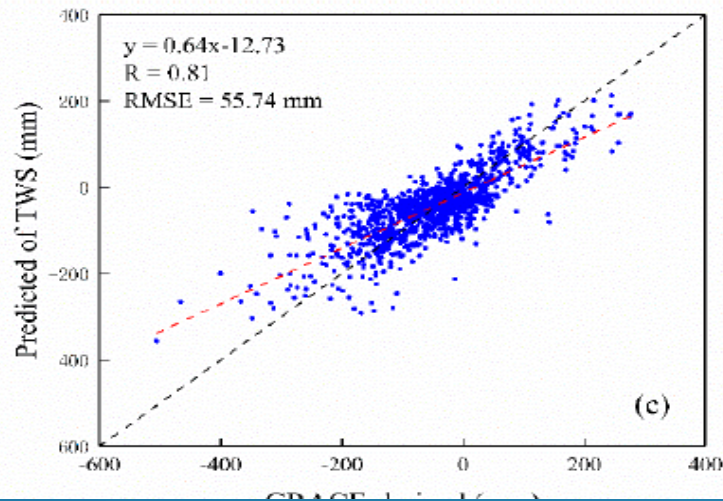
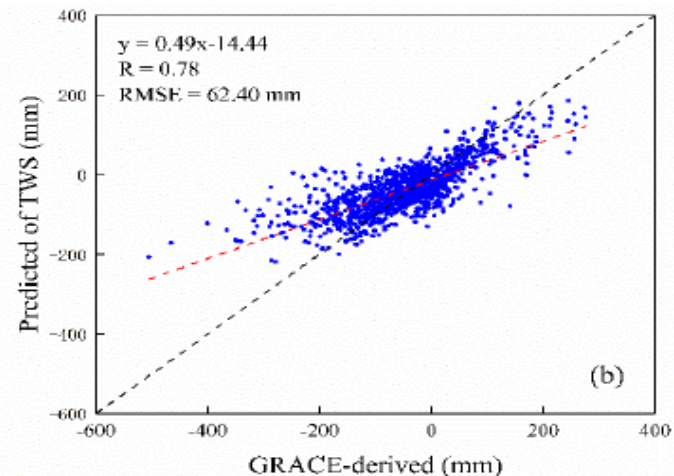
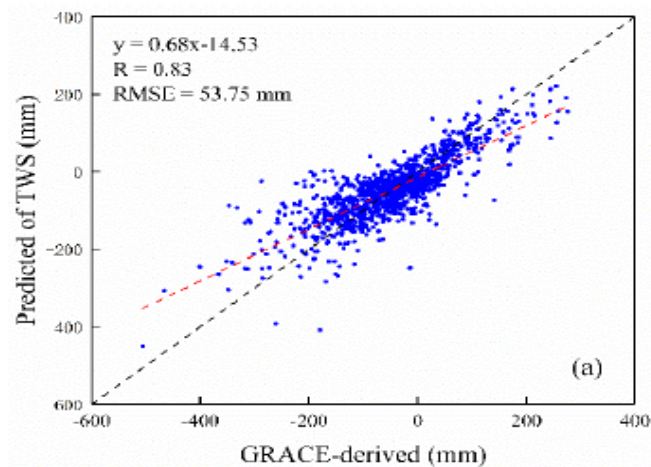
۱. ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش (NSE)، خطای مطلق میانگین (MAE)

۷. اعتبارسنجی

۲. مقایسه نتایج GWS کاهش مقیاس شده با داده‌های سطح آب اندازه‌گیری شده و GWS محاسبه شده از مدل GLDAS



فلوچارت فرایند ریزمقیاس سازی در تحقیق



برآورد دقت روش‌های یادگیری ماشین

(الف) مدل جنگل تصادفی

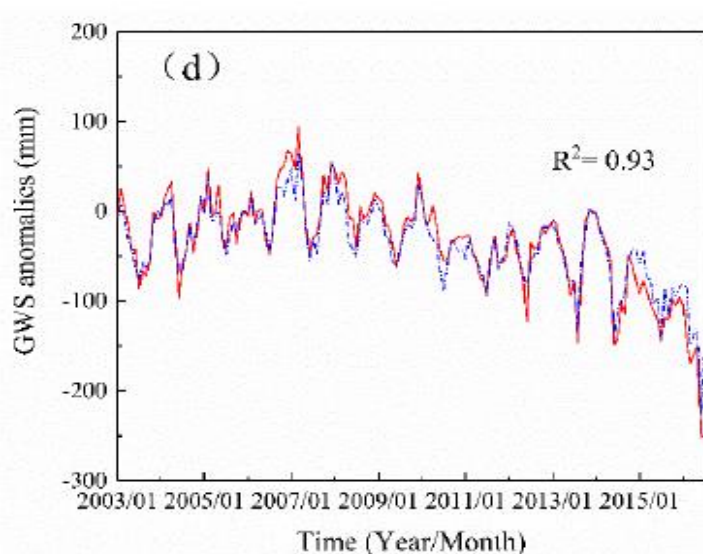
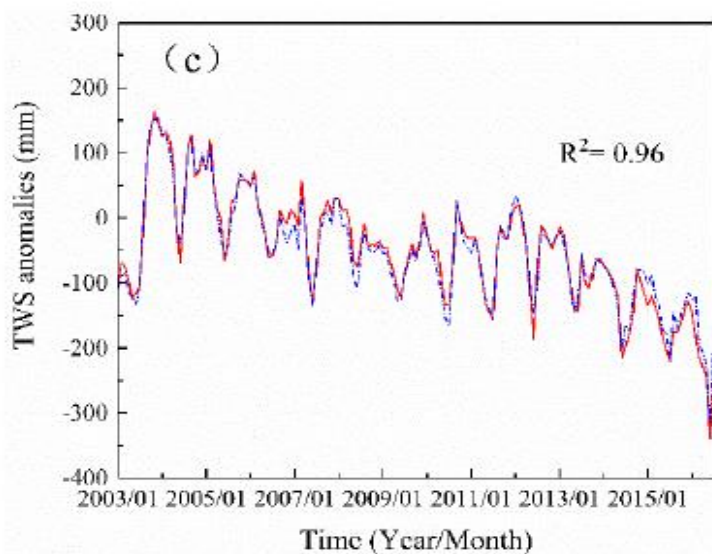
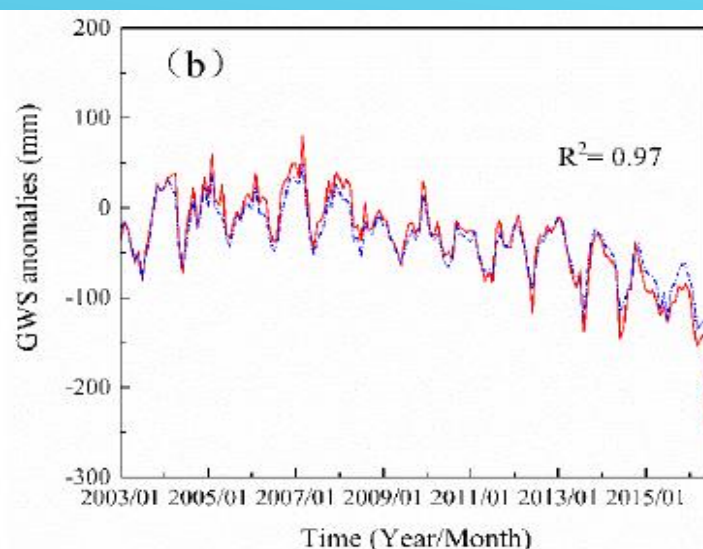
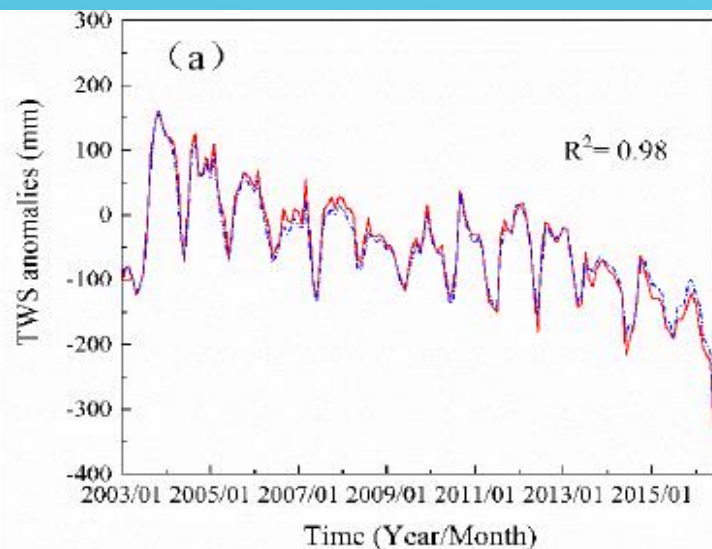
(ب) مدل ماشین بردار پشتیبان

(ج) مدل شبکه عصبی مصنوعی

(د) مدل رگرسیون خطی چندگانه

Table 1. Results of modeling accuracy of four machine learning methods.

Models	R	RMSE (mm)	MAE (mm)	NSE
RF	0.83	53.75	38.97	0.68
SVR	0.78	62.40	44.83	0.57
ANN	0.81	55.74	41.23	0.66
MLR	0.78	59.93	44.84	0.61



— GRACE-derived - - - Downscaled

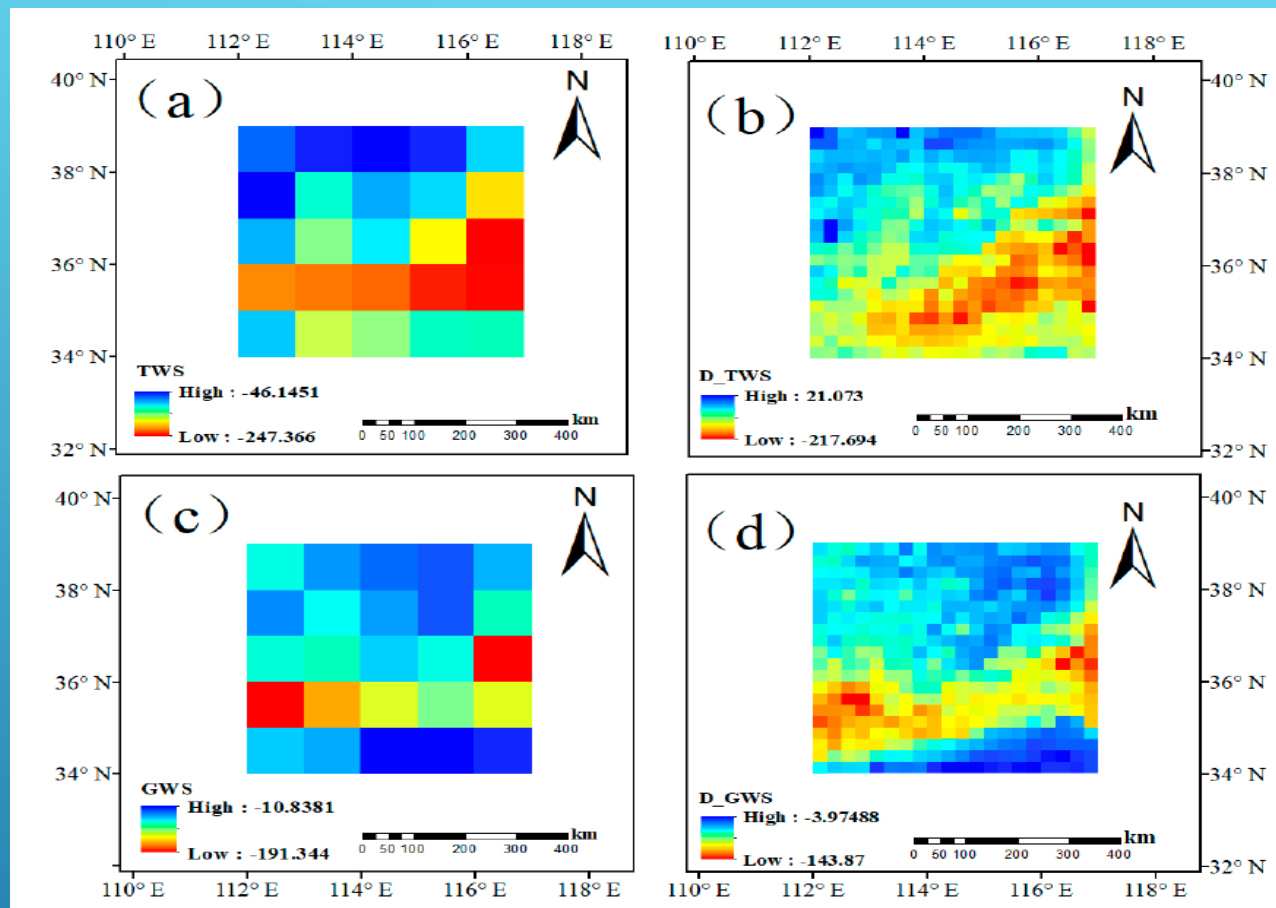
(الف) تغییرات TWS در کل منطقه مطالعه قبل و بعد از کاهش مقیاس

(ب) تغییرات GWS در سراسر منطقه مطالعه قبل و بعد از کاهش مقیاس

(ج) تغییرات TWS قبل و بعد از کاهش مقیاس در منطقه معتبر Handan که ۵۷ چاه مشاهده‌ای دارد

(د) تغییرات GWS قبل و بعد از کاهش مقیاس در منطقه معتبر Handan

خط قرمز ذخیره آب به دست آمده از ماهواره **GRACE** و خط آبی نشان دهنده نتایج کاهش مقیاس



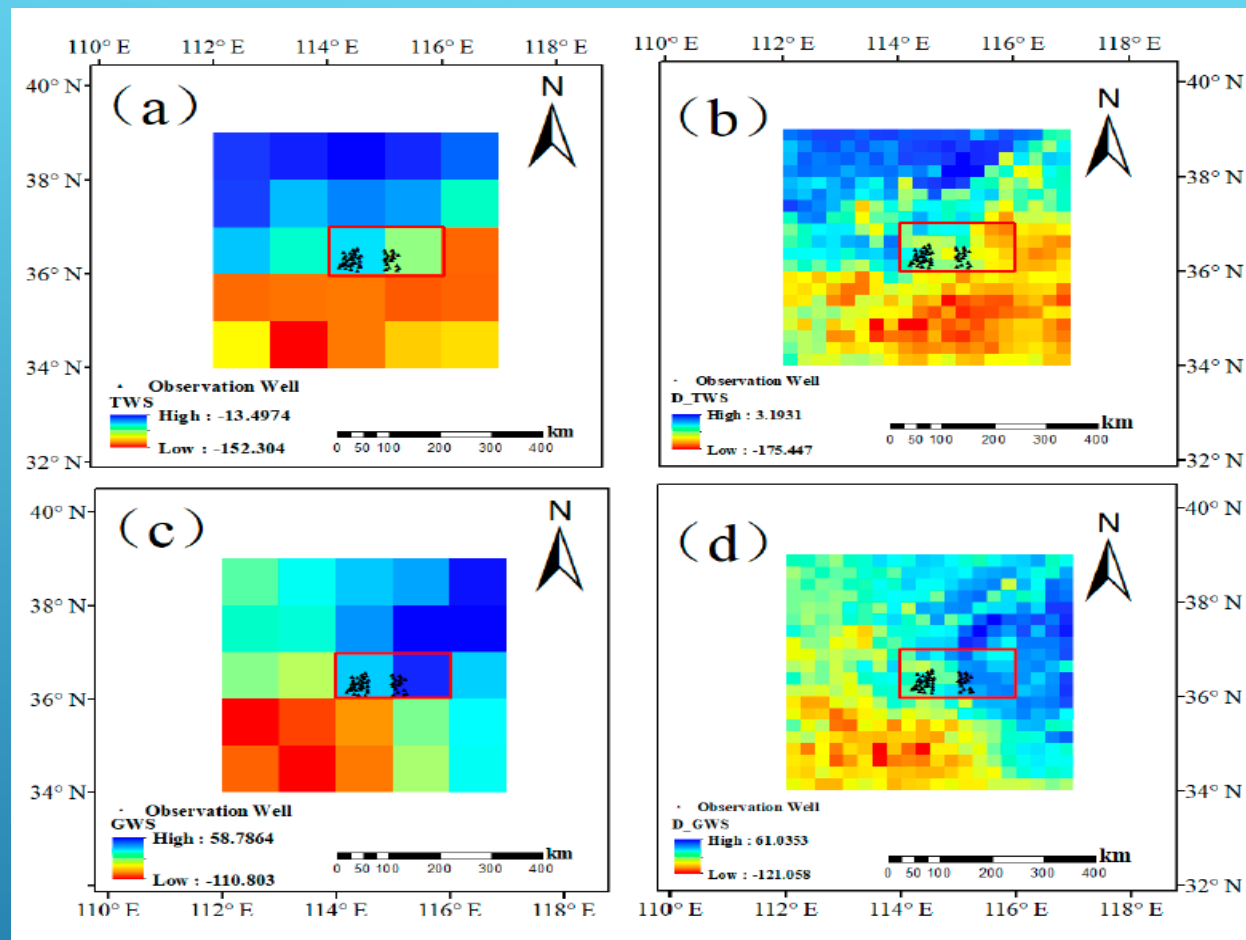
تغییرات فضایی TWS و GWS قبل و بعد از کاهش مقیاس در فوریه ۲۰۱۴

(a) TWS به دست آمده از GRACE ؛

(b) TWS پس از کاهش مقیاس در کل منطقه؛

(c) GWS به دست آمده از GRACE ؛

(d) GWS پس از کاهش مقیاس در کل منطقه.



تغییرات فضایی TWS و GWS قبل و بعد از کاهش مقیاس در فوریه ۲۰۰۳.

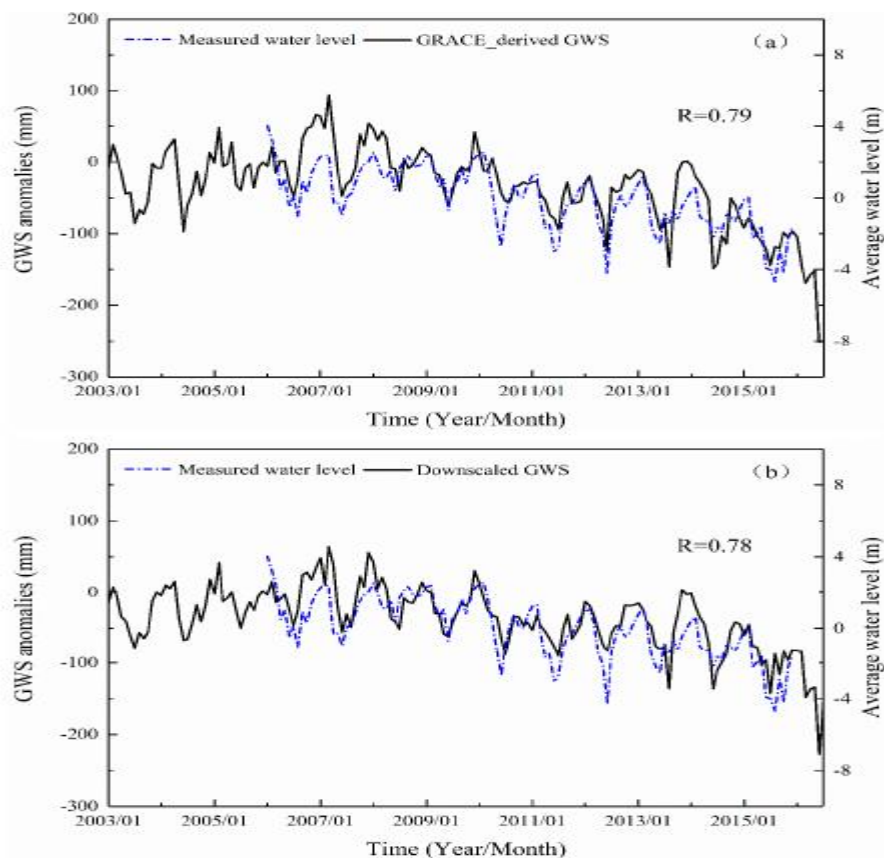
(a) TWS به دست آمده از GRACE ؛

(b) TWS پس از کاهش مقیاس در کل منطقه؛

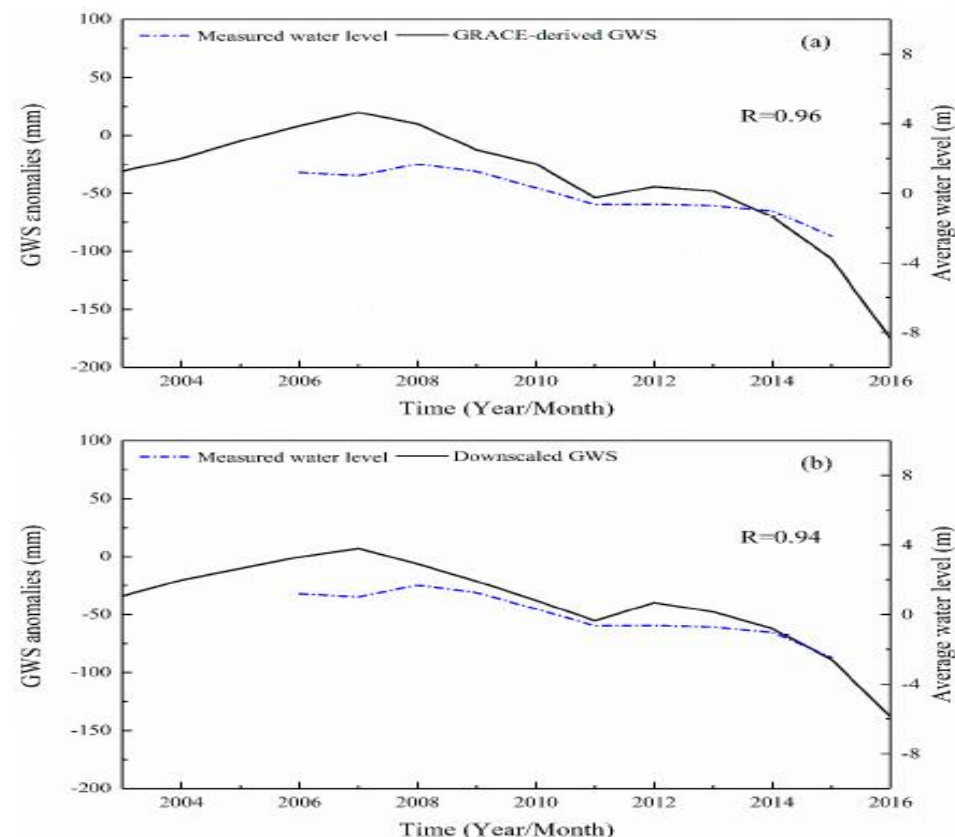
(c) GWS به دست آمده از GRACE ؛

(d) GWS پس از کاهش مقیاس در کل منطقه.

مستطیل قرمز نشان دهنده شبکه اعتبارسنجی است.



تأیید صحت مقیاس ماهانه چاه‌های پایش آب زیرزمینی
 (a) نتیجه تأیید GWS استخراج‌شده از GRACE و سطح آب
 اندازه‌گیری‌شده
 (b) نتیجه تأیید GWS پس از کاهش مقیاس و سطح آب
 اندازه‌گیری‌شده



تأیید صحت مقیاس سالانه چاه‌های پایش آب زیرزمینی
 (a) نتیجه تأیید GWS استخراج‌شده از GRACE و سطح
 آب اندازه‌گیری‌شده
 (b) نتیجه تأیید GWS پس از کاهش مقیاس و سطح آب
 اندازه‌گیری‌شده

روش‌های سنجش از دور فضایی و هوایی برای مطالعه و پایش آبهای زیرزمینی زیرزمینی

تکنیک	قابلیت‌ها	مزایا	معایب
اندازه‌گیری‌های گراویمتریک	GRACE و GRACE-FO: تغییر ذخیره آب زیرزمینی را با استفاده از اندازه‌گیری‌های گراویمتریک در رزولوشن ۳۰ روزه و مساحت تقریبی (۳۰۰ کیلومتر مربع) اندازه‌گیری می‌کند.	امکان مشاهده تصویر کلی از ناهنجاری‌های ذخیره آب زیرزمینی در سطح جهان.	مقیاس فضایی باعث می‌شود استفاده در آبخوان‌های کوچک بدون مدل‌سازی اضافی دشوار باشد و تغییرات جرمی با فرکانس بالا ثبت نمی‌شوند.
اندازه‌گیری تغییرات سطحی زمین	تغییرات حرکت زمین برای تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دنبال می‌شود. تغییرات ناشی از تغییر فشار منفذی و تنش مؤثر با تغییر ذخیره آب زیرزمینی است. زیرتکنیک‌ها شامل: InSAR (ثبت تغییرات میلی‌متری در رزولوشن مسیر متر)، GNSS (اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای در سطح جهانی)، رادار ارتفاع‌سنجی (< ۱ سانتیمتر/سال در رزولوشن مسیر ۱ کیلومتر) لیدار (رزولوشن ۳ سانتیمتر در شبکه‌های ۱ کیلومتری، ICESat-۲).	امکان ثبت پیوسته تغییرات سطحی زمین. رزولوشن زمانی و مکانی بالا (یا تراکم ایستگاه‌ها در GNSS) امکان استفاده مؤثر در مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌کند.	نیاز به شناخت مناسب ویژگی‌های زمین‌شناسی برای ارتباط دقیق پاسخ‌های غیرخطی تغییر سطح زمین با تغییرات ذخیره آب زیرزمینی.

روش‌های سنجش از دور فضایی و هوایی برای مطالعه و پایش آبهای زیرزمینی زیرزمینی

تکنیک	قابلیت‌ها	مزایا	معایب
سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد (AEM)	رسانایی الکتریکی برای تخمین سطح آب اندازه‌گیری می‌شود. امکان بررسی آبخوان‌های کم عمق (۱-۳ متر) و عمیق (۳۰۰-۴۰۰ متر) وجود دارد.	امکان بررسی سریع مناطق وسیع با هزینه کم.	نیاز به شناخت دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان. ظرفیت محدود در سیستم‌های شور.

اندازه‌گیری تغییرشکل سطح زمین

تحلیل سری‌های زمانی فرونشست و برآمدگی سطح زمین برای برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان‌های قابل تراکم بهره‌برداری شده استفاده می‌شود

ابزارهای مورد استفاده شامل ۱-رادار سنجش تداخل سنجی (InSAR)، ۲-سامانه جهانی ناوبری ماهواره‌ای (GNSS)،

۳-ارتفاع‌سنجی راداری و ۴-لیدار برای تغییرات سطح زمین هستند که تغییرشکل سطح زمین را با دقت عمودی بالا اندازه‌گیری می‌کنند

Sneed, 2001

۱. رادار تداخل سنجی (InSAR)

محدودیت‌های استفاده از InSAR در کاربردهای آب زیرزمینی

پوشش و نمونه‌برداری محدود: تنها Sentinel-1 از آژانس فضایی اروپا پوشش کافی و تکرار مناسب برای پایش جهانی فراهم می‌کند

تغییرات آبخوان‌ها با گرادیان‌های مکانی کم و بازه‌های زمانی طولانی رخ می‌دهد: محصولات InSAR با وضوح مکانی متوسط برای مشاهده تغییر شکل‌های سطحی مرتبط با ذخیره آب زیرزمینی مناسب هستند

روش پیشرفته سنجش از دور برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین با دقت میلی متر تا سانتی متر

معرفی نخستین ماهواره SEASAT در سال ۱۹۸۸

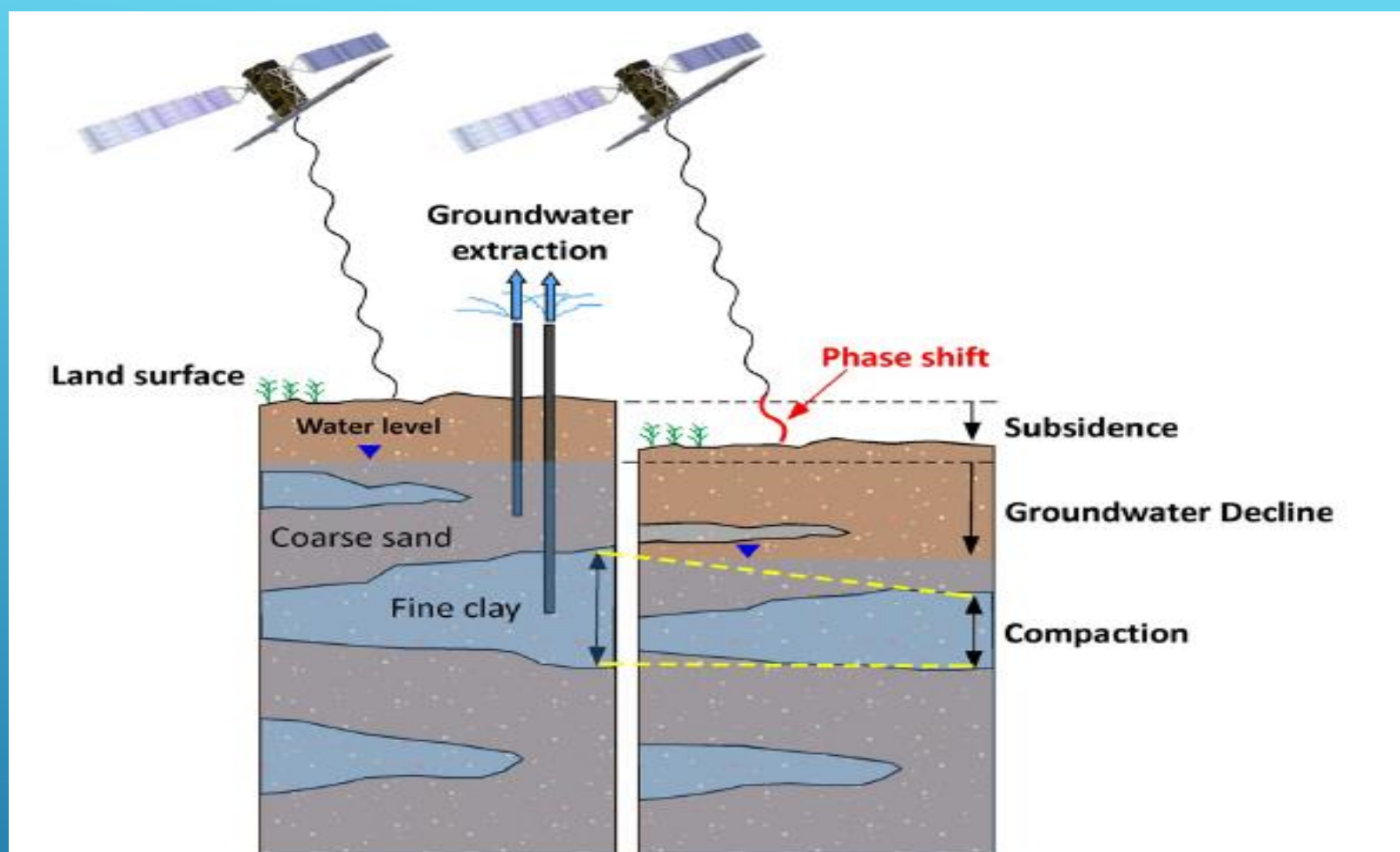
کاربردها شامل ژئودزی، زمین‌شناسی، ارزیابی مخاطرات طبیعی، پایش زیرساخت‌ها و مطالعات آب زیرزمینی

نحوه عملکرد با تحلیل اختلاف فاز بین دو تصویر راداری ثبت شده در زمان‌های متفاوت برای محاسبه جابجایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره

در آب زیرزمینی برای پایش نشست زمین ناشی از افت سطح آب و برآورد تغییرات تدریجی ذخیره آبخوان‌ها

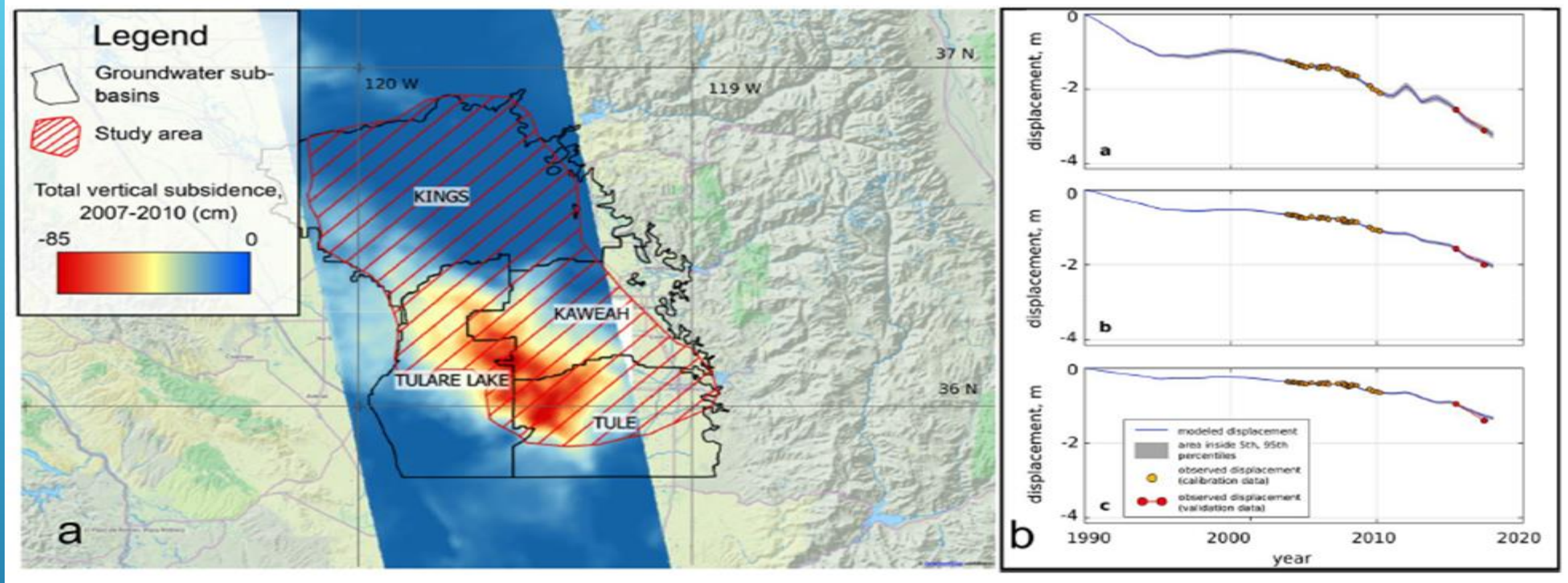
عوامل مؤثر بر دقت شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی، پوشش سطحی، شرایط جوی و یون سپهر و تغییرات پوشش گیاهی و بخار آب

ماهواره مناسب برای پایش Sentinel-1 با پوشش گسترده و تکرار زمانی مناسب است



سیستم **InSAR** تغییر شکل سطح زمین را با اندازه گیری اختلاف فاز موج راداری بین دو گذر اندازه گیری می کند. از آنجا که تغییرات آب زیرزمینی به دنبال آن باعث پاسخ الاستیک یا غیرالاستیک سطح زمین می شود، می توان از **InSAR** برای استنباط تغییر حجم آب زیرزمینی با اندازه گیری تغییر شکل سطح استفاده کرد. (doi.org/10.1029/2022WR032219)

Remote Sensing of Groundwater: Current Capabilities and Future Directions: Kyra H. Adams¹ , John T. Reager¹ , Paul Rosen¹ , David N. Wiese¹ , Tom G. Farr¹, Shanti Rao¹ , Bruce J. Haines¹, Donald F. Argus¹ , Zhen Liu¹ , Ryan Smith² , James S. Famiglietti³ , and Matthew Rodell⁴, (Watre resources research, 2022)



(a) نقشه نشست عمودی کلی استخراج شده از InSAR از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۰ در چند زیرحوضه آب زیرزمینی در دره مرکزی کالیفرنیا.

(b) داده‌های تغییرشکل مدل شده و مشاهداتی، شامل نشست مدل شده (خط آبی)، خطا (خاکستری)، تغییرشکل استخراج شده از InSAR با استفاده از Envisat و ALOS (نارنجی؛ استفاده شده برای کالیبراسیون)، و جابجایی کلی از Sentinel-1 (قرمز؛ از کالیبراسیون حذف شده اما برای اعتبارسنجی استفاده شده) برای سه مکان در زیرحوضه Kaweah. (Modified from Smith et al., 2017 and Smith & Knight, 2019).

۲. سامانه جهانی ناوبری ماهواره‌ای GNSS

سامانه‌ای شامل مجموعه‌ای از سیستم‌های موقعیت‌یابی مانند GPS ایالات متحده

با استفاده از شبکه‌ای از ماهواره‌ها و ایستگاه‌های زمینی، موقعیت سه‌بعدی نقاط را با دقت میلی‌متری تعیین می‌کند

در کاربردهای آب زیرزمینی، داده‌ها از ایستگاه‌های ثابت جمع‌آوری شده و تغییرات عمودی سطح زمین ناشی از برداشت یا تغذیه آب زیرزمینی را آشکار می‌کنند

با گسترش جهانی ایستگاه‌های GNSS، این روش ابزاری ارزشمند برای پایش پیوسته و دقیق تغییر شکل‌های مرتبط با آب زیرزمینی شده است

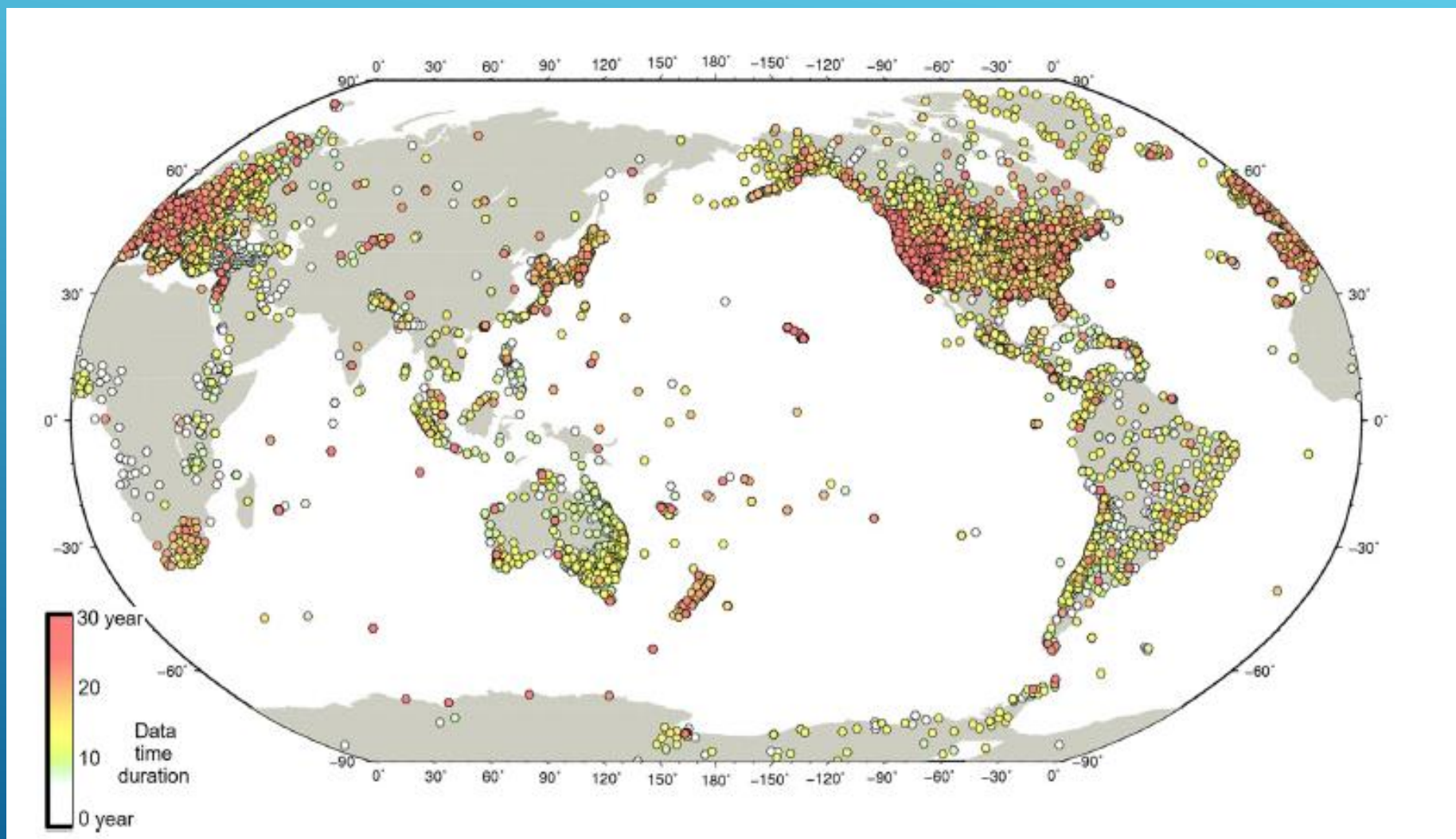
GNSS می‌تواند نشست زمین ناشی از فشردگی آبخوان‌ها یا واکنش الاستیک پوسته زمین به تغییر فشار آب زیرزمینی را با دقت چند میلی‌متر شناسایی کند

ایستگاه‌های GNSS حتی در مناطقی که مستقیماً بر روی آبخوان‌ها قرار ندارند، می‌توانند نشانه‌های غیرمستقیم تغییر ذخیره آب زیرزمینی را ثبت کنند

شبکه‌های متراکم GNSS در مناطقی مانند دره مرکزی کالیفرنیا نشست‌های ناشی از برداشت آب زیرزمینی را با دقت بالا ردیابی کرده و پاسخ‌های الاستیک مناطق پیرامونی را نشان داده‌اند

ترکیب داده‌های GNSS با مشاهدات GRACE و InSAR امکان تحلیل جامع‌تری از پویایی آب‌های زیرزمینی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی فراهم کرده است

ایستگاه‌های GNSS با داده‌های ۳ تا ۲۸ ساله که توسط آزمایشگاه ژئودزی نوادا (Blewitt و همکاران، ۲۰۱۸) تحلیل شده‌اند تا تغییرات ذخیره کل آب با استفاده از تغییر مکان سطح زمین ارزیابی شود.



۳. ارتفاع سنجی راداری در پایش آب زیرزمینی

ارتفاع سنجی راداری ابتدا برای بررسی اقیانوس ها و یخ کره طراحی شد اما اکنون برای شناسایی و پایش فرونشست زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی کاربرد دارد

این فناوری از بازتاب عمودی پالس های راداری برای اندازه گیری تغییر ارتفاع سطح زمین استفاده می کند و برخلاف **InSAR** وابسته به همبستگی زمانی قوی در ویژگی های زمینی نیست

مطالعات انجام شده با مأموریت های ماهواره های **Jason-1**، **TOPEX/Poseidon**، **Envisat** و **Jason-2** فرونشست بلندمدت در مناطق کشاورزی کالیفرنیا، چین و تایوان را با دقت بالا شناسایی کردند و با داده های **GNSS** همخوانی داشتند

ویژگی های مهم:

- دقت عمودی بالا توانایی تشخیص تغییر ارتفاع بیش از ۱ سانتی متر در سال
- **رزولوشن مکانی حدود ۱ کیلومتر در امتداد مسیر ماهواره**
- پوشش مکانی و زمانی گسترده مناسب برای پایش های بلندمدت
- **کاربرد ویژه در مناطق صاف و کشاورزی با اثر کم پوشش گیاهی یا ساخت و ساز**
- ارتفاع سنجی راداری ابزار مکملی برای **InSAR** و **GNSS** در برآورد غیرمستقیم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی است، به ویژه در نواحی گسترده و هموار

۴. لیدار

لیدار روشی پیشرفته برای تشخیص تغییرات ارتفاع زمین به عنوان نماینده برداشت آب زیرزمینی است

ماهواره‌های ICESat (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶) و ICESat-2 (۲۰۱۸ تا کنون) به ارتفاع سنج لیزری مجهز هستند و برای اندازه‌گیری ارتفاع پوشش‌های یخی، ضخامت یخ دریا، ارتفاع پوشش گیاهی، عمق سنجی و توپوگرافی زمین به کار می‌روند

ICESat ارتفاع سطح زمین را با دقت تا ۲ سانتی‌متر و دقت عمودی حدود ۳ سانتی‌متر بر روی سطوح هموار اندازه‌گیری کرد

ICESat-2 نقشه‌های شبکه‌بندی شده با تفکیک مکانی یک کیلومتر از ارتفاع زمین و پوشش گیاهی در مناطق هدف ارائه می‌دهد و رزولوشن طولی آن حدود ۰.۷ متر است

هر دو ماهواره نقاط را صرفاً در طول مسیر نمونه‌برداری می‌کنند و نقشه نهایی سطح زمین با ترکیب داده‌های چندین عبور ماهواره از مسیرهای مختلف به دست می‌آید

در سال ۲۰۱۵، داده‌های ICESat برای کمی‌سازی فرونشست زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در دشت شمالی چین استفاده شد و با داده‌های GRACE مقایسه شد.

سهم پوشش گیاهی در سیگنال ICESat با استفاده از شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) از داده‌های MODIS ارزیابی شده است

اندازه‌گیری‌های لیدار معمولاً همراه با داده‌های GRACE برای ارائه تصویر جامع از الگوی مصرف آب زیرزمینی و واکنش آبخوان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند

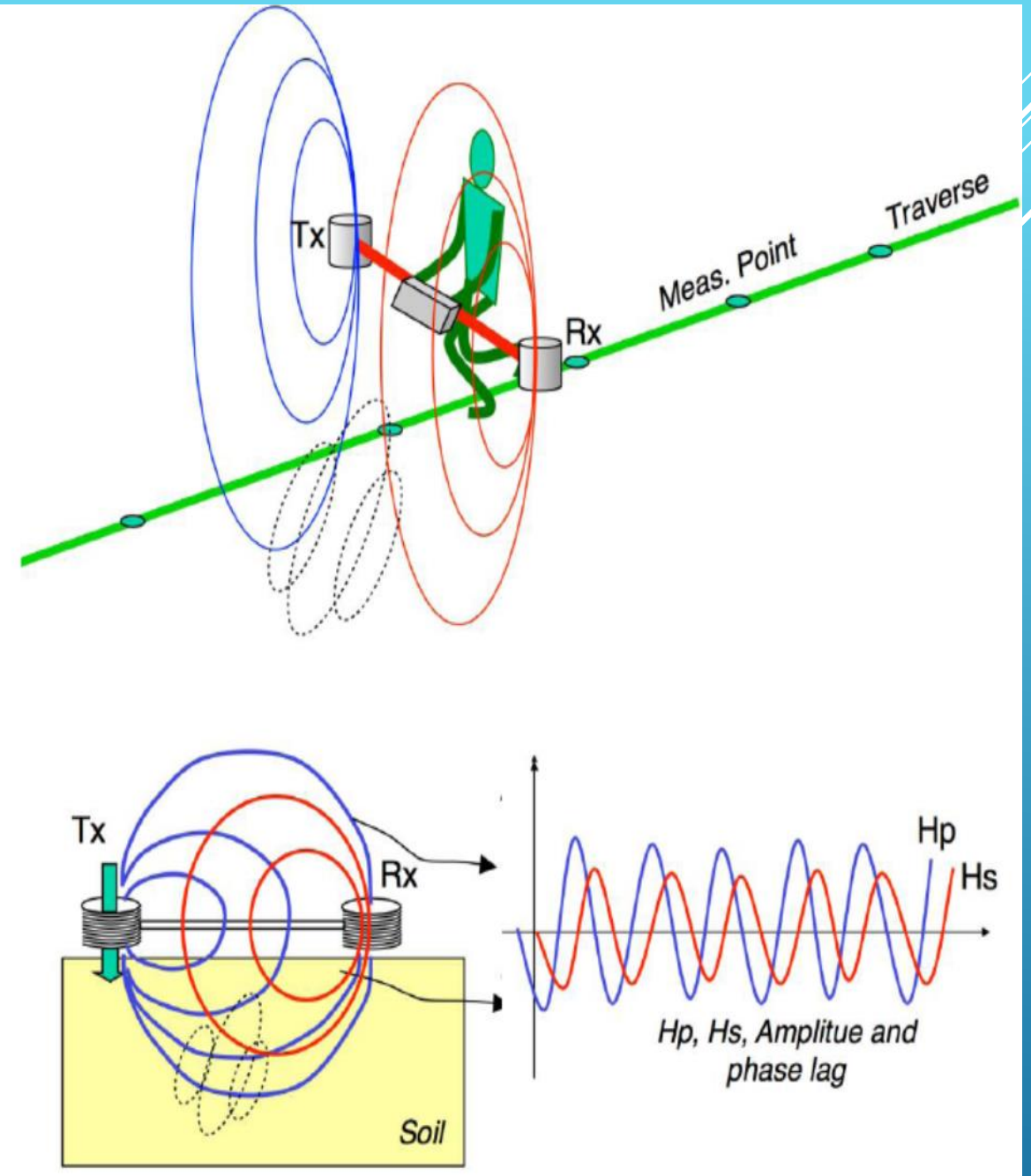
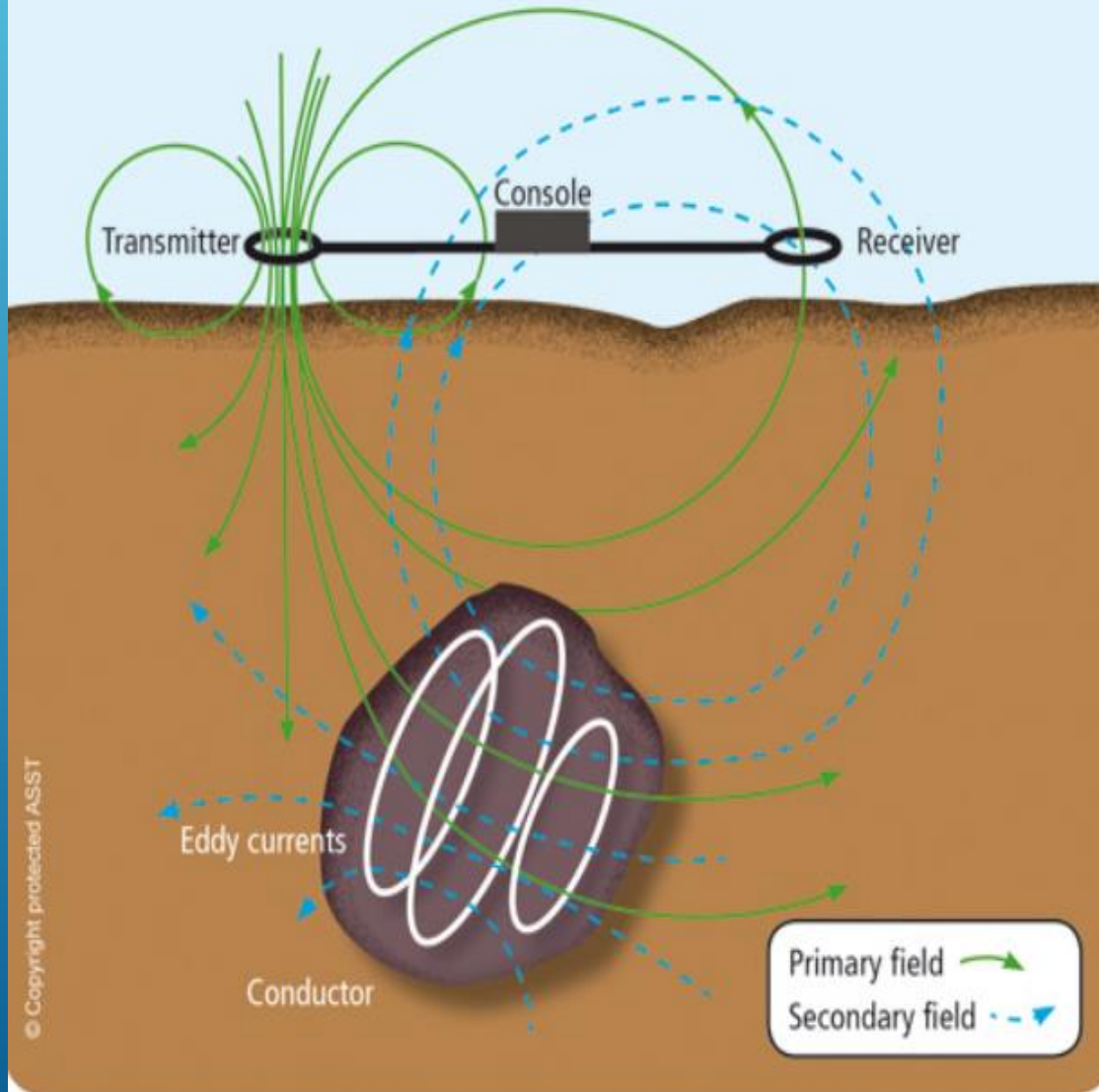
سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد (AEM)

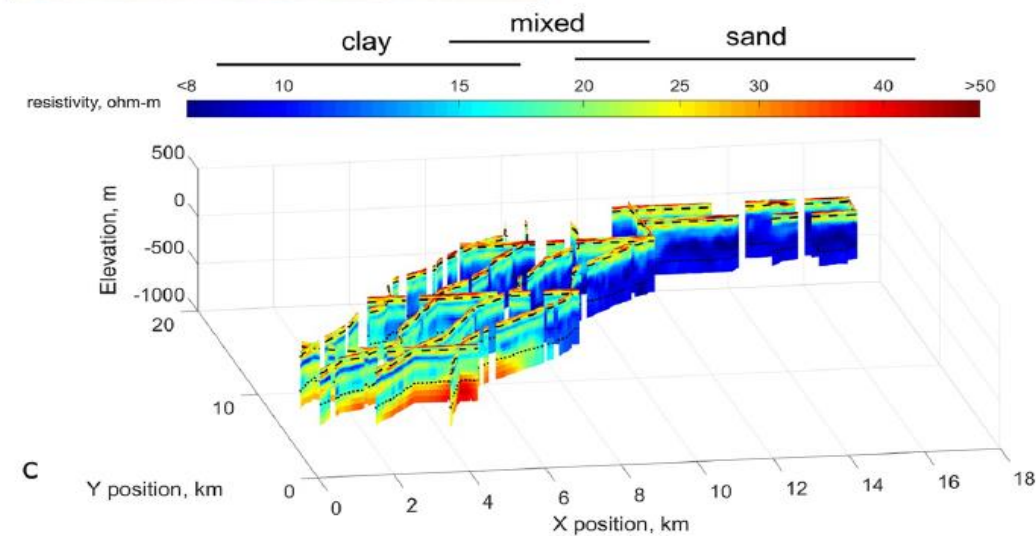
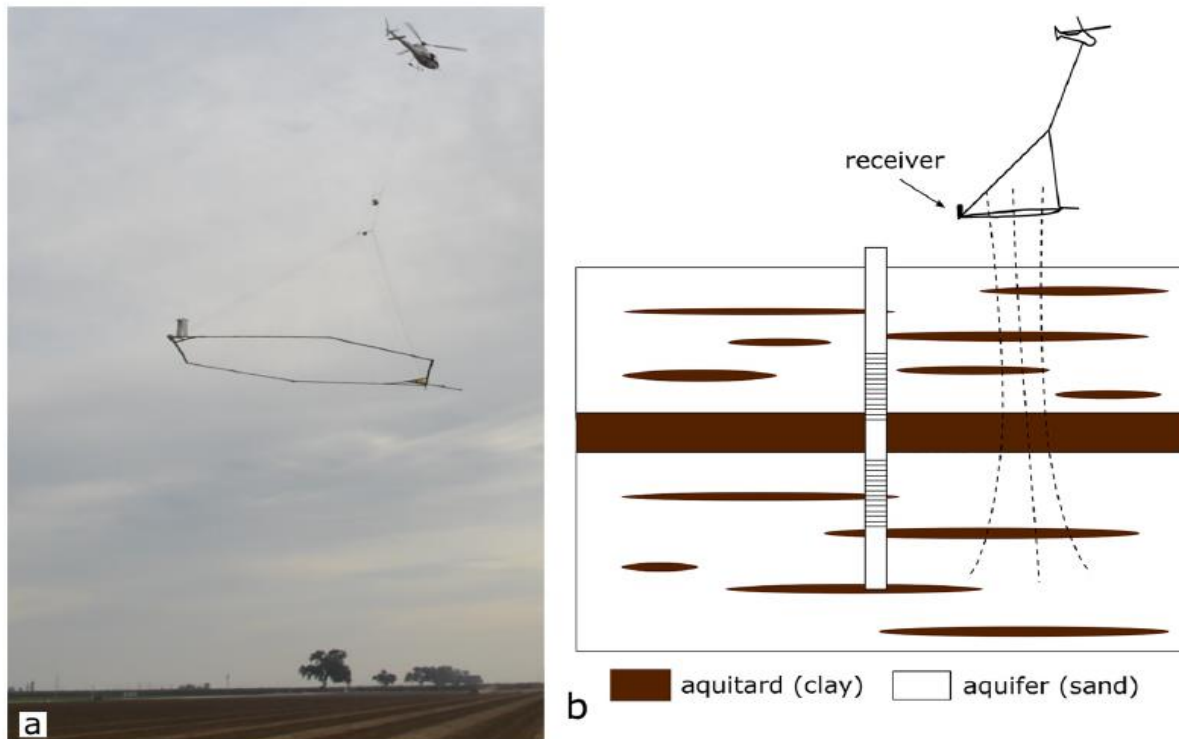
سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد (AEM) روش‌هایی سریع و کم‌هزینه برای بررسی سیستم‌های آکیفر در مقیاس وسیع، از کم‌عمق (۱-۳ متر) تا عمیق (۳۰۰-۴۰۰ متر)

به دلیل وابستگی به هدایت الکتریکی، AEM نسبت به ارتفاع سطح آب، خصوصیات زمین‌شناسی آکیفر (به ویژه مرزهای بین مواد مقاوم مانند سنگ‌بستر، مواد با مقاومت متوسط مانند ماسه و مواد هادی مانند رس) و توزیع شوری حساس است

در تعیین محدوده‌های آب شور با استفاده از AEM در محیط‌های مختلف میدانی، از جمله مناطق ساحلی با نفوذ آب شور آکوایفرهای آلوده به نمک) و مناطق دارای آب تولیدی از استخراج نفت و گاز استفاده می‌شود.

SHALLOW ELECTROMAGNETIC INDUCTION





سیستم‌های AEM با ایجاد جریان‌های الکتریکی از طریق سیم‌پیچ‌ها عمل می‌کنند. با تغییر این جریان‌ها، چه از طریق خاموش شدن سریع یا تغییر تناوب، میدان‌های مغناطیسی نفوذکننده در زمین تولید می‌شوند که جریان‌های گردابی در زیرسطح ایجاد می‌کنند. یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه که شدت آن تابعی از توزیع هدایت زیرسطح است، از این جریان‌های گردابی ایجاد می‌شود و سپس توسط سیم‌پیچ‌های گیرنده شناسایی می‌گردد.

(a) سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد (AEM SkyTEM) در حال جمع‌آوری داده بر فراز دره سان خوان، کالیفرنیا،

(b) نمودار ساده‌شده‌ای از سیستم AEM، میدان‌های مغناطیسی ایده‌آل به صورت خطوط نقطه‌چین نشان داده شده‌اند

(c) مقاومت معکوس شده به دست آمده با AEM، سطح آب زیرزمینی به صورت خط نقطه‌چین نشان داده شده است.

پیشرفت های آینده

۱. مأموریت های مبتنی بر گرانش

مأموریت GRACE-FO ادامه مأموریت GRACE با عمر اسمی حدود ۷ سال است و بسته به شرایط خورشیدی و سلامت ابزارها ممکن است طولانی تر شود

مأموریت آینده Mass Change برای ادامه و بهبود اندازه گیری تغییرات جرمی زمین پیشنهاد شده و احتمالاً با همکاری بین المللی اجرا شده است

ترکیب داده های GRACE با مدل های سطح زمین، InSAR یا شبکه های GNSS زمینی برای غلبه بر محدودیت ها پیشنهاد شده است
بهبود وضوح زمانی با افزایش بسامد نمونه برداری از طریق دو جفت ماهواره هم راستا یا چند جفت ماهواره کوچک امکان پذیر است
افزایش وضوح مکانی با پرتاب ماهواره ها در ارتفاع پایین تر و استفاده از سامانه های جبران گر درگ فعال مشابه مأموریت GOCE امکان پذیر است

Wiese, Visser, & Nerem, 2011; Wiese, Visser, & Han, 2011; Wiese et al., 2012

GRACE-C شامل دو ماهواره یکسان است که با فاصله حدود ۲۰۰ کیلومتر از یکدیگر در مدار با ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتر و میل ۸۹ درجه پرواز خواهند کرد. پرتاب این مأموریت زودتر از اواخر سال ۲۰۲۸ از کشور آمریکا انجام نخواهد شد. همانند مأموریت های پیشین، GRACE-C برای اندازه گیری تغییرات بسیار کوچک فاصله بین دو ماهواره ناشی از تغییرات گرانش زمین با دقتی در حد میکرون طراحی شده است.

آژانس‌های فضایی بین‌المللی سرمایه‌گذاری زیادی در مأموریت‌های SAR انجام می‌دهند و این روش به ابزار آینده‌دار برای شناسایی تغییرات آب زیرزمینی تبدیل شده است.

برنامه عملیاتی Copernicus سازمان ESA شامل حداقل دو ماهواره Sentinel-۱ باند C است که در مدار تکرار دقیق ۱۲ روزه و با فاصله ۶ روز از هم پرواز می‌کنند و پوشش زمینی با تراکم نمونه‌برداری مکانی و زمانی کافی برای اندازه‌گیری نشست یا برآمدگی سطح فراهم می‌کند

مأموریت NASA-ISRO SAR (NISAR) در سال‌های آینده پرتاب می‌شود و نمونه‌برداری جهانی هر ۱۲ روز در باند L ارائه خواهد داد و برای حداقل ۵ سال طراحی شده است

ترکیب داده‌های Sentinel-۱ با NISAR می‌تواند تراکم نمونه‌برداری زمانی را افزایش دهد و خطاها را با تجمیع داده‌ها یا در فرآیند وارون‌سازی مدل کاهش دهد

داده‌های این سیستم‌ها دارای پوشش مکانی و زمانی متراکم هستند و برای Sentinel-۱ در دسترس عموم و برای NISAR در آینده آزاد خواهند بود

بازار تجاری SAR در حال رشد است و بسیاری از شرکت‌های نوپا صورت‌فلکی‌های کوچک SAR برای کاربردهای تجاری طراحی می‌کنند

این ماهواره‌ها معمولاً وضوح بالا و عرض کم دارند و برای پوشش مناطق وسیع با استراتژی نمونه‌برداری اینترفرومتریک متراکم مناسب نیستند

با این حال وضوح و دقت ذاتی سیستم‌های SAR غیرنظامی و تجاری برای اندازه‌گیری تغییرات آبخوان در طول زمان کافی است

۳. شبکه‌های GNSS

شبکه‌های GNSS به مرور زمان متراکم‌تر می‌شوند و در بسیاری از مناطق جهان مانند ایالات متحده، اروپا و ژاپن، تراکم شبکه به حدی است که امکان پایش زمین به‌طور جهانی فراهم می‌شود.

پیشرفت در فناوری گیرنده‌های GNSS اهمیت زیادی دارد؛ گیرنده‌های ژئودزی با کیفیت، کم‌هزینه، کوچک و با مصرف پایین انرژی در دسترس هستند.

کوچک شدن و سبک شدن قطعات مانند گیرنده‌ها، آنتن‌ها و پنل‌های خورشیدی امکان استقرار استراتژیک آسان‌تر را فراهم می‌کند با رشد مستمر شبکه جهانی GNSS، پایش آب زیرزمینی و پاسخ‌های سطحی مرتبط با آن مانند نشست الاستیک و غیرالاستیک و بلندشدگی تکتونیکی ناشی از کاهش بار با استفاده از GNSS قابل اعتمادتر خواهد بود.

تلفیق داده‌های مختلف سنجش از دور

روش‌های سنجش از دور در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت عمل می‌کنند و هر روش به تنهایی تنها برای محدوده خاصی مناسب است.

ترکیب روش‌های مختلف سنجش از دور کاربرد این تکنیک‌ها را افزایش می‌دهد و امکان درک پاسخ زمین‌شناسی مرتبط با تغییرات آب زیرزمینی و برآورد بهتر عدم قطعیت را فراهم می‌کند

مثال برجسته دره مرکزی کالیفرنیا است که ترکیب داده‌های GRACE و GRACE-FO کاهش سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و نشست زمین با InSAR و GNSS پیوسته ثبت شده است

همبستگی روند کاهش آب زیرزمینی با الگوهای نشست از Sentinel-1 می‌تواند شکاف بین داده‌ها را کاهش دهد

کاهش آب زیرزمینی و نشست در مقیاس زیرحوضه با داده‌های GRACE/GRACE-FO ریزمقیاس، چاه‌ها، Sentinel-1 و GNSS مقایسه شده و تفاوت در بزرگی و تأخیر زمانی بین کاهش آب و نشست ثبت شده مشخص شده است

رویکرد تراز آبی نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های مختلف سنجش از دور می‌تواند تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را در مقیاس‌های مکانی دقیق‌تر از GRACE برآورد و پایش کند و رابطه دینامیک مکانی-زمانی بین ذخیره آب زیرزمینی و پاسخ الاستیک/غیرالاستیک زمین‌شناسی را روشن کند

Famiglietti و همکاران، ۲۰۱۱؛ Scanlon و همکاران، ۲۰۱۲؛ Amos و همکاران، ۲۰۱۴؛ Faunt و همکاران، ۲۰۱۶؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۹؛ Vasco و همکاران، ۲۰۲۲؛ Kim و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ahamed و همکاران، ۲۰۲۲

A photograph of a cave interior. The walls and ceiling are covered in white, mineral-rich deposits that look like stalactites and stalagmites. A pool of clear, blue water is visible in the center of the cave. The lighting is soft, highlighting the textures of the rock formations.

با تشکر از توجه شما