



دوره‌ی ۳۲، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۲۵، زمستان ۱۳۹۸، صفحات ۶۵-۵۱
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2019.126204.1218

پژوهش‌های آبخیزداری

پایش نوسان آبخوان دشت بیرجند با تصویرهای ماهواره‌ی گرینس و تحلیل‌های مکانی جی‌آی‌اس

مبین افتخاری

(نویسنده‌ی مسئول)* کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

کاوش مددی

دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی سنجش‌ازدور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فن‌آوری پیشرفته‌ی کرمان، کرمان، ایران

محمد اکبری

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: Mobineftekhari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۱۲ شهریور ۱۳۹۸

چکیده

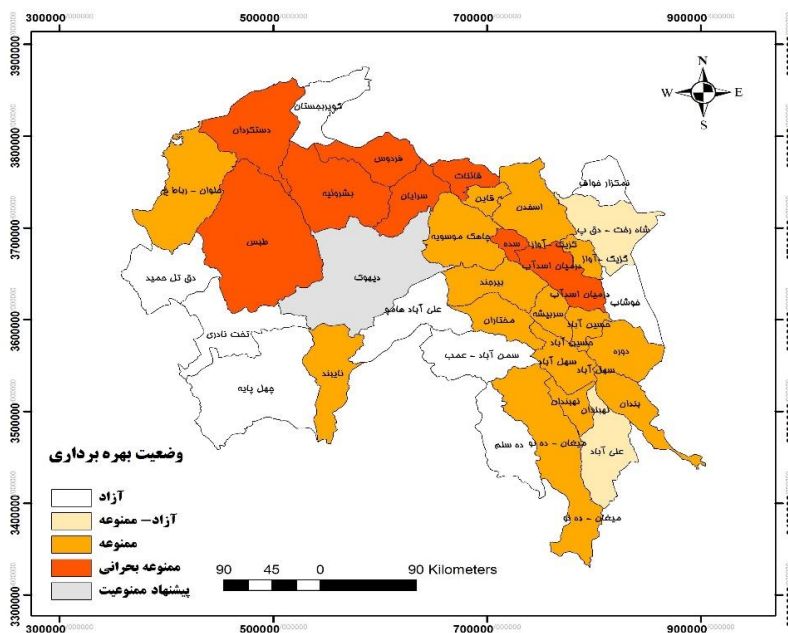
با توجه به افزایش کاربرد آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، مدیریت به‌کاربردن آب‌های زیرزمینی بسیار مهم است. شناسایی تغییر و نوسان تراز آب‌های زیرزمینی می‌تواند به تصمیم‌گیری درست کمک کند. ماهواره‌ی گرینس طرح مشترک ناسا و سازمان فضایی آلمان است که برای پایش تغییر گرانشی کره‌ی زمین و نوسان کمی ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی با توان تفکیک مکانی چندصد کیلومتری به فضا پرتاب شد. با توجه به این‌که اندازه‌گیری‌های زمینی در مقیاس منطقه‌ی پایش کمی آب‌های زیرزمینی به‌اندازه‌ی کافی نیست، داده‌های منحصربه‌فرد این ماهواره برای پایش تغییرات کمی سالانه‌ی ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی به‌کاربرده می‌شود. پردازش داده‌ها در سامانه‌ی شبکه‌ی موتور گوگل‌ارت با سه الگوریتم JPL، GFZ و CSR انجام، و نتیجه‌ها با داده‌های مشاهده‌ی (پیزومتری) ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ مقایسه کرده شد. این مقایسه با ایجاد کردن وایزی خطی بین تغییرهای به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های سنجنده‌ی GRACE و داده‌های مشاهده‌ی انجام شد، که نتیجه‌ی آن همبستگی ۶۹ درصدی بین تغییرهای به‌دست‌آمده از دو روش بود. برای تحلیل مکانی و زمانی، تراز ایست‌آبی آبخوان با نرم‌افزار ARC GIS پهنه‌بندی شد. نتیجه‌ها نشان داد که در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ به‌دلیل کمبود بارش‌ها، تغذیه‌نشدن آبخوان، و برداشت اضافه، تراز ایست‌آبی افت بسیاری کرده است.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، سنجش‌ازدور، موتور گوگل‌ارت، GRACE

مقدمه

سال‌های اخیر، افزایش یافتن نیازهای آبی، محدودبودن آب‌های سطحی، و بهره‌برداری کردن بیش‌ازاندازه از آب‌های زیرزمینی باعث به‌بارآمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور شده است. آب زیرزمینی، منبع عمده و تنها منبع مطمئن و دائمی تأمین آب در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک و به‌ویژه در زمان روی‌دادن خشک‌سالی‌های کشاورزی و آب‌شناختی است. با توجه به این‌که توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها در کشور ایران مناسب نیست، آب‌های زیرزمینی اهمیت بسیار دارد. متأسفانه، از مدت‌ها پیش از راه قنات‌ها، و از ۱۳۴۹ هـ ش به بعد با رشدکردن و توسعه‌یافتن فن‌آوری حفاری برای چاه‌های نیمه‌عمیق، بهره‌برداری بیش‌ازحدی از این منبع شده است. صدمه‌هایی که از بهره‌برداری بیش‌ازحد به هر یک از آبخوان‌های آبرفتی کشور وارد شده متناسب با شرایط اقلیمی و منطقه‌یی آن محدوده متفاوت است. در آبخوان‌های استان خراسان جنوبی افت دائم تراز آب زیرزمینی مشکل‌های متعددی از جمله خشک‌شدن قنات‌ها و چشمه‌ها، کاهش آب‌دهی چاه‌ها و خشک‌شدن پی‌آمد آن‌ها، هزینه‌های کفشکنی، مصرف انرژی اضافی برای آب‌کشی، و پدیده‌ی فرونشست را سبب شده است. بهره‌برداری بی‌رویه و مهارنشده در اغلب محدوده‌های بررسی‌شده‌ی استان خراسان جنوبی سبب شده است که تراز آب زیرزمینی سالانه افت کند (شکل ۱). به همین دلیل، بیش از نیمی از آبخیزهای استان به‌دلیل بحرانی بودن تراز ایست‌آبی و برداشتن بی‌رویه در وضعیت ممنوع است (شرکت آب منطقه‌یی خراسان جنوبی ۲۰۰۸).

در تراز جهانی، حجم آب ذخیره‌شده در سفره‌های آب زیرزمینی حدود ۲۴ میلیون کیلومتر مکعب برآورد شده است، که نیمی از آب‌های شیرین دنیا و حدود ۲/۵٪ از کل آب‌های کره‌ی زمین است (اوکی و کناع ۲۰۰۶). آب‌های زیرزمینی نقش مهمی در حفظ زیست‌بوم‌ها و چرخه‌های آب‌شناسی و منابع آب دارد (زکتسر و لوایکیگا ۱۹۹۳؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ سفکلوس ۲۰۰۲). آب‌های زیرزمینی منبعی حیاتی برای میلیون‌ها انسان در مصرف کشاورزی، صنعتی و خانگی است (گیردنو ۲۰۰۹). کاربرد بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی موجب کاهش یافتن تراز آن در بسیاری از منطقه‌های جهان شده است (گلیسن و همکاران ۲۰۱۲). حجم تجمعی خالص خالی‌شدن سفره‌های آب زیرزمینی از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۸ دست‌کم ۴۵۰۰ میلیارد مترمکعب برآورد شده است، که بیش‌تر در آبخوان‌های عمده در هند، ایالات متحده، عربستان سعودی، چین و آبخوان‌های دیگر است. البته به‌دلیل قطعیت نداشتن درباره‌ی متوسط آب‌دهی ویژه، همه‌ی برآوردها در تردید است (ودا و همکاران ۲۰۱۲). تنها در ایالات متحده‌ی آمریکا، کاهش حجم آب‌های زیرزمینی در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مکعب تخمین زده، و بیش‌ترین آن تا سال ۲۰۰۰ در حدود ۲۴ کیلومتر مکعب در سال برآورد کرده شده است (کنیکو ۲۰۱۱). شناختن دقیق داشته‌های آب هر منطقه (سطحی و زیرزمینی)، برای برنامه‌ریزی پایدار و توسعه‌ی منبع‌های آب ضروری است، و با انجام‌دادن پژوهش‌های دقیق بر آن‌ها و تهیه‌کردن تراز (بیان) آبخوان‌ها، امکان‌پذیر است. با افزایش یافتن بی‌رویه‌ی جمعیت در



شکل ۱- وضعیت بهره‌برداری محدوده‌های بررسی‌شده‌ی حوزه‌ی عمل شرکت آب منطقه‌یی استان خراسان جنوبی.

بررسی شد. های و همکاران (۲۰۱۹) نیز تغییر پوشش گیاهی و آب‌های زیرزمینی را با مدل‌های وایزلی خطی تحلیل کردند و نشان دادند که در محل‌هایی که فعالیت‌های انسان بیش‌تر شده، مصرف منابع آب‌های زیرزمینی هم بیش‌تر شده است. آن‌ها بر اساس داده‌های مختلف، حوزه‌ی گسترش فعالیت‌های انسانی در محیط طبیعی و مناطق تأثیر یافته را تخمین زدند.

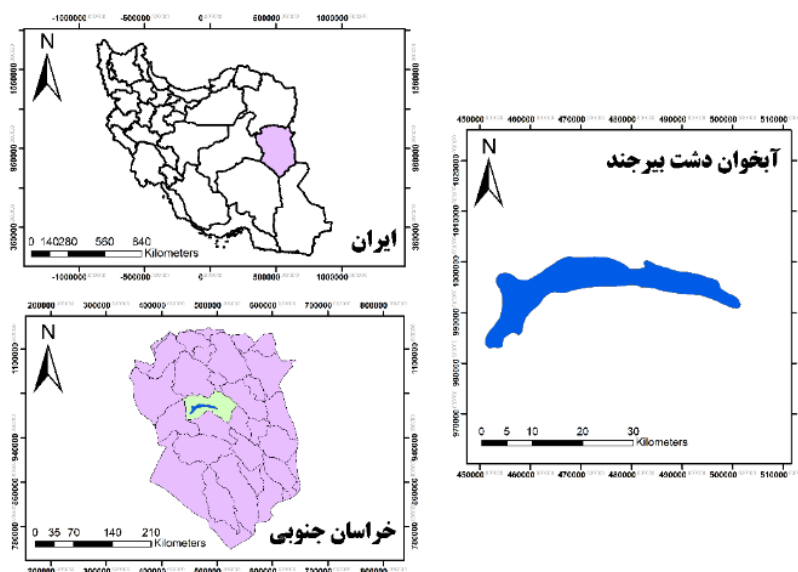
بررسی پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده‌ی توانایی ماهواره‌ی گریس در تحلیل و پایش کردن خشک‌سالی و تغییر آب‌شناختی مناطق مختلف است. این داده‌ها منبعی مطمئن و تخصصی در حوزه‌ی بررسی تغییر تراز منابع آب زیرزمینی است. از این‌رو، با توجه به شرایط خاص و بحرانی دشت بیرجند از دید منابع آبی، ارزیابی و شناسایی کردن تغییر منبع آب زیرزمینی که اصلی‌ترین منبع آب منطقه است، اهمیت ویژه‌ی دارد. در این پژوهش نوسان آب‌های زیرزمینی آبخوان بیرجند در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ با ماهواره‌ی گریس پایش و تحلیل شد. برای تحلیل مکانی نوسان آبخوان بیرجند، نقشه‌های پهنه‌بندی از ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ با چاه‌های مشاهده‌ی نصب‌شده در آبخوان تهیه شد.

مواد و روش‌ها

محدوده‌ی بررسی‌شده

دشت بیرجند از محدوده‌های آبخیز کویر لوت بین طول‌های $41^{\circ} 58'$ تا $46^{\circ} 59'$ شرقی و عرض‌های $35^{\circ} 32'$ تا $38^{\circ} 08'$ شمالی است. مساحت کلی آن $3406/72$ کیلومتر مربع است که از این مقدار $900/63$ و $2506/09$ کیلومتر مربع به ترتیب مساحت دشت و بلندی‌ها است. بر اساس پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ی و بهره‌برداری، و با در نظر گرفتن پهنه‌هایی که پژوهش‌های ژئوفیزیک در آن شده بود، دو آبخوان آبرفتی تشخیص داده‌شد. آبخوان دشت بیرجند بزرگ‌ترین آبخیز استان و متوسط بارندگی در آن 170 میلی‌متر در سال است (شرکت آب منطقه‌ی خراسان جنوبی ۲۰۰۸). (شکل ۲)

وس و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی منطقه‌ی دجله و فرات و غرب ایران در ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ با ماهواره‌ی گریس ۱ کاهش بیش از 17 میلی‌متر بر سال، و کاهش بیش از 91 کیلومتر مکعب حجم آب‌های زیرزمینی را نشان دادند. نتیجه‌ی جودکی (۲۰۱۴) در بررسی نوسان آب‌های زیرزمینی منطقه‌ی خاورمیانه از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با ماهواره‌ی گریس کاهش چشم‌گیر تراز ایست‌آبی آبخوان‌های غرب ایران و شمال عراق را نشان داد. چاه‌های مشاهده‌ی نصب‌شده در آبخوان‌های غرب کشور و بررسی‌های سنجش‌از‌دور در این ۹ سال نشان‌دهنده‌ی بیش از 25 گیگا تن بر سال کاهش آب‌های زیرزمینی بود. با حذف اثرهای طبیعی افت تراز ایست‌آبی دانسته شد که بیش از دو سوم افت آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه بوده است. فروتن و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی نوسان آب زیرزمینی مناطق مرکزی و شمال غرب با ماهواره‌ی گریس نشان دادند که از ۲۰۰۵ به بعد تراز آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و شمال غرب ایران به‌طور متوسط 15 میلی‌متر در سال افت کرده است. تمرکز خاکی و همکاران (۲۰۱۸) در شناسایی تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی ایران با ترکیب داده‌های گریس در مدل آب‌شناختی W3RA بر تغییر منابع آبی زیرسطحی و رطوبت خاک در شش بخش اصلی آبخیز ایران بود. نتیجه‌های تحقیق آن‌ها نشان داد که آب‌های زیرزمینی ایران در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ به‌طور متوسط $8/9$ میلی‌متر در سال کاهش یافته است. آن‌ها با تحلیل همبستگی کانونی، وابستگی تغییر ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی را با اثرهای آب‌وهوایی و زیست‌محیطی بررسی کردند، و بین بارندگی و تغییر آب‌های زیرزمینی همبستگی متوسط $0/81$ را نشان دادند. فرایارت و رامیلین (۲۰۱۸) نشان دادند که داده‌های گریس منبع اطلاعاتی مناسبی برای ارزیابی کردن ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی در تراز منطقه‌ی است. از جمله در این تحقیق روش‌های اصلی به‌کاربرده‌شده برای پایش کردن تغییر آب‌های زیرزمینی و کاربردهای داده‌های گریس برای آن

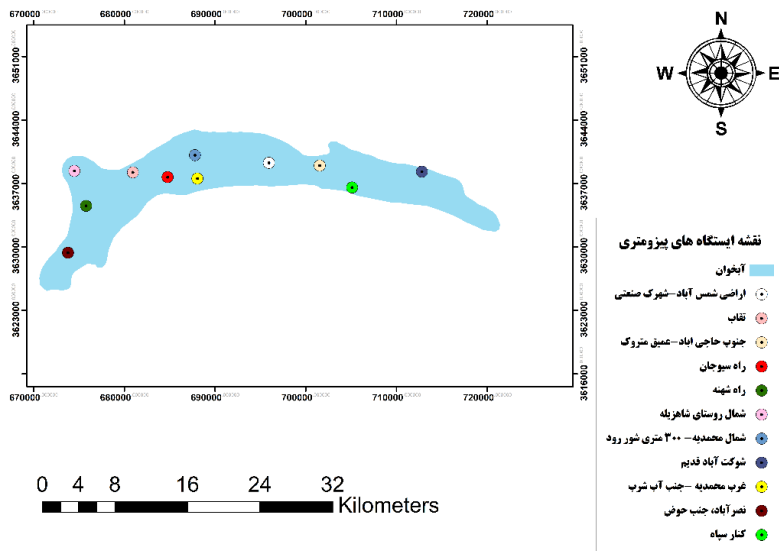


شکل ۲- موقعیت کلی دشت بیرجند.

۲ ماهواره‌ی هم‌مدار در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از تراز زمین و با زاویه‌ی میل $۸۹/۵$ درجه بود. فاصله‌ی تقریبی دو ماهواره از یکدیگر تقریباً ۲۲۰ کیلومتر بود. سامانه‌ی راداری در باند K و با دقت $۱\mu\text{m/s}$ فاصله و سرعت نسبی بین دو ماهواره را لحظه‌یی اندازه‌گیری می‌کرد (تپلی و همکاران ۲۰۰۴). برای اعتبارسنجی نتیجه‌ها و پهنه‌بندی تراز ایست‌آبی آبخوان داده‌های ۱۱ چاه مشاهده‌یی (شرکت آب منطقه‌یی خراسان جنوبی ۲۰۰۸) به‌کاربرده شد (شکل ۳).

داده‌ها

برای تخمین زدن تغییر تراز آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند ۱۵۱ تصویر ماهواره‌ی گریس با ابعاد ۳۶۱×۱۸۰ نقطه در اندازه‌ی کیلومتر مکانی، در گروه زمانی از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ به‌کاربرده شد. دو سازمان NASA^۱ و DLR^۲ زوج ماهواره‌ی ثقل‌سنجی گریس را در ۱۷ مارچ ۲۰۰۲ از ایستگاهی در روسیه به فضا پرتاب کردند و مأموریت علمی آن در ۲۷ اکتبر ۲۰۱۷ به پایان رسید (سازمان فضایی ناسا ۲۰۰۴). مأموریت گریس شامل



شکل ۳- موقعیت چاه‌های مشاهده‌یی در آبخوان دشت بیرجند.

1- National Aeronautics and Space Administration
2- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

ترکیب کردن سنجه‌های خروجی مدل GLDAS تعیین، و ضریب هم‌ساز^۳ کرووی محاسبه می‌شود (فورست و همکاران ۲۰۱۲) و اثرهای آب‌شناختی از روی این ضریب حذف می‌شود (وهر و همکاران ۱۹۹۸). اختلاف ضریب کرووی هم‌ساز که اثرهای آب‌شناسی از روی آن برداشته شده با ضریب به‌دست‌آمده از ماهواره‌ی گریس محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی آخر تبدیل موجک برای تصفیه کردن (Filtering) به‌کار برده می‌شود تا تغییر آب‌های زیرزمینی برآورد شود. تغییر به‌دست‌آمده از ضریب هم‌ساز ماهانه را می‌توان به نوسان آب تبدیل کرد (رابطه‌ی ۱)

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \frac{a \cdot \rho_{ave}}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} \cdot \bar{P}_{nm}(\cos(\theta)) \cdot (\Delta J_{nm} \cos m\lambda + \Delta K_{nm} \sin m\lambda) \quad (1)$$

است. برای بهتر کردن برآورد میدان ثقل کروی زمین می‌توان ضریب W_n را در معادله‌ی ۱ وارد کرد (وهر و همکاران، ۱۹۹۸).

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \frac{a \cdot \rho_{ave}}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} \cdot W_n \cdot \bar{P}_{nm}(\cos(\theta)) \cdot (\Delta J_{nm} \cos m\lambda + \Delta K_{nm} \sin m\lambda) \quad (2)$$

$$b = \frac{\ln 2}{1 - \cos\left(\frac{r}{a}\right)} \quad (3)$$

$$W_0 = \frac{1}{2\pi} \quad (4)$$

$$W_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right) \quad (5)$$

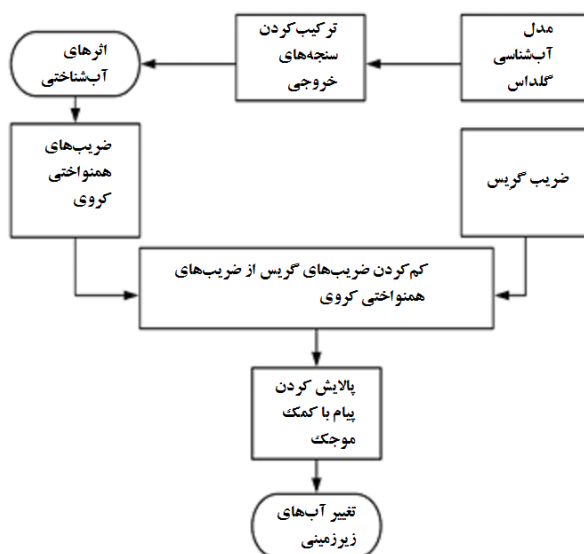
$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (6)$$

جنوب پدیدار می‌شود. موجک ابزار مناسبی برای پلایش (فیلتر) کردن و محلی کردن پیام (سیگنال) و بررسی کردن اثر تغییر محلی و زمانی در میدان جاذبه است. از آن‌جا که گریس می‌تواند کل تغییرات جرم را در قالب مهم‌ترین اثرها مثلاً تغییر در ذخیره‌ی آب، رصد کند، اگر هدف بررسی تغییر آب‌های زیرزمینی باشد حذف اثرهای آب‌شناسی ضروری است. سامانه‌ی تحلیل و شبیه‌سازی زمین در پوشش جهانی (شکل ۴) ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ی و مشاهده‌های زمین-مرجع است، که بر اساس مدل‌های پیشرفته‌ی خشکی‌ها و روش‌های پیشرفته‌ی ترکیب داده‌ها ایجاد شده است، و وضعیت بهینه از شکل سطح زمین را تعیین می‌کند (اسپرینگر و همکاران ۲۰۱۷).

پردازش تصویرهای GRACE
تغییر در توزیع جرم زمین سبب ایجاد تغییر در میدان ثقل آن می‌شود. بنابراین، با اندازه‌گیری تغییر میدان ثقل می‌توان به تغییر ایجاد شده در توزیع جرم پی برد، و کاهش و افزایش جرم در آن تعیین کرد. برای بررسی کردن میدان ثقل زمین در بازه‌های زمانی متفاوت، می‌توان ماهواره‌ی ثقل‌سنجی گریس کمک گرفت (شکل ۵). برای تعیین کردن وضعیت بهینه‌ی سطح زمین و حذف کردن اثرهای آب‌شناسی مدل GLDAS به‌کار برده می‌شود، که در ماهواره‌ی گریس مدل GLDAS است (تجدرول و همکاران ۲۰۰۸). اثرهای آب‌شناختی با

در این رابطه $\rho_{ave} = 5517 \text{ Kg/m}^3$ میانگین جرم حجمی سطحی زمین، k_n عددهای لاو، ΔJ_{nm} و ΔK_{nm} تغییر ماهانه‌ی ضریب هم‌ساز کرووی و \bar{P}_{nm} تابع بهنجار شده‌ی راهنما

در معادله‌ی ۳ مقدار I شعاع میانگین‌گیری و a شعاع متوسط زمین است. رابطه‌ی ۴ نیز رابطه‌ی بازگشتی برای محاسبه‌ی هسته‌ی ۴ میانگین‌گیری W است که مقدار آن با تغییر شعاع میانگین‌گیری تغییر می‌کند. پاسخ رابطه‌ی ۲ نیز ناهنجاری چگالی سطحی است، و با تقسیم کردن آن بر چگالی آب نوسان ارتفاعی آب برای منطقه به‌دست می‌آید. یکی از مهم‌ترین مسائل بحرانی در داده‌های گریس این است که به‌دلیل زاویه‌ی میل ۸۹/۵ درجه‌ی مدار گردش این ماهواره به‌دور زمین، انباشتگی داده در جهت شمال-جنوب و همبستگی مکانی بین داده‌های گریس به‌وجود می‌آید (لی و همکاران ۲۰۱۸). در نقشه‌های جغرافیایی این همبستگی‌ها به‌صورت نوارهایی در جهت شمال



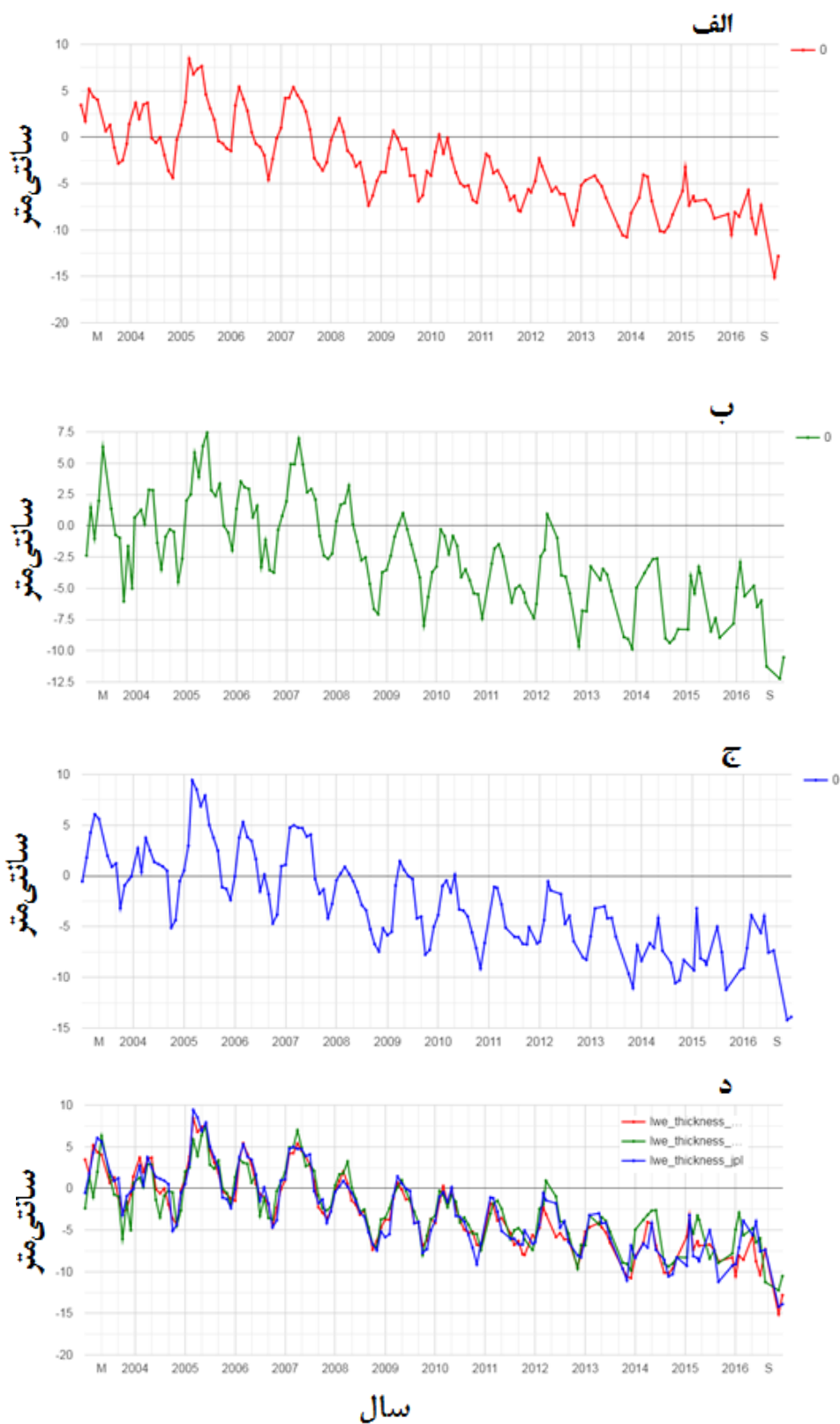
شکل ۴- مرحله‌های تخمین‌زدن تغییر نوسان آبخوان، به‌کاررفته برای دشت بیرجند.

نتایج

تغییر تراز ایست‌آبی آبخوان با داده‌های ماهواره‌ی گریس و سه الگوریتم GFZ، JPL و CSR، به‌دست‌آمد (شکل ۵). بازه‌ی زمانی تغییر ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ است.

داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره‌ی گریس در سامانه‌ی موتور گوگل‌ارت (شرکت گوگل) با سه الگوریتم سازمان‌های GFZ^۵، JPL^۶ و CSR^۷ پردازش شد. در بررسی تغییر مکانی تراز ایست‌آبی آبخوان، پهنه‌بندی در نرم‌افزار ArcGIS به روش کریجینگ معمولی^۸ (به‌دلیل کمینه‌بودن خطای آن از سایر روش‌ها) انجام شد.

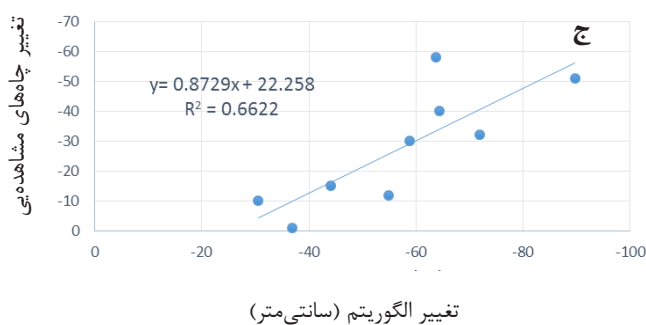
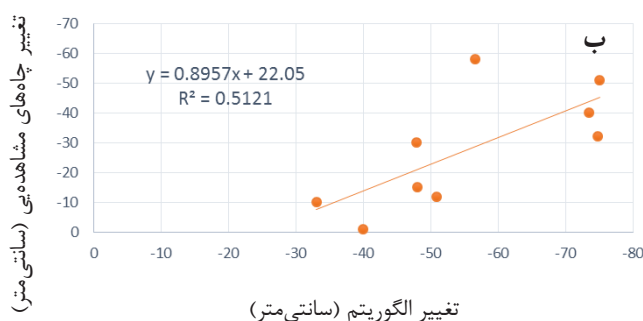
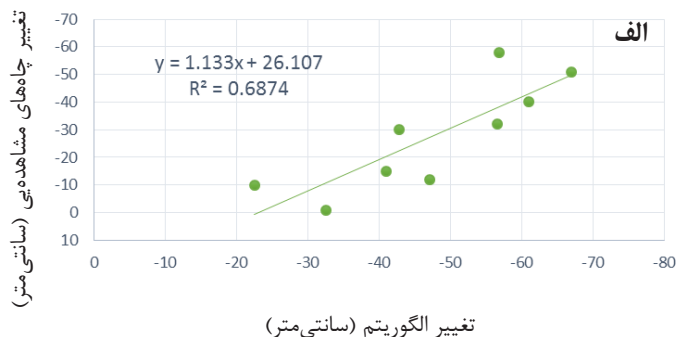
5- Geoforschungszentrum
6- Jet Propulsion Laboratory
7- Center for Space Research at the University of Texas
8- Kriging Ordinary



شکل ۵ - نوسان تراز آبخوان دشت بیرجند با الگوریتم‌های ماهواره‌ی گریس الف (CSR ب) GFZ ج) JPL د) ترکیب هر سه.

برای بررسی الگوریتم‌های داده‌شده‌ی ماهواره‌ی گریس، بین GFZ، JPL، CSR و چاه‌های مشاهده‌یی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ وایازی خطی اعمال شد (شکل ۶).

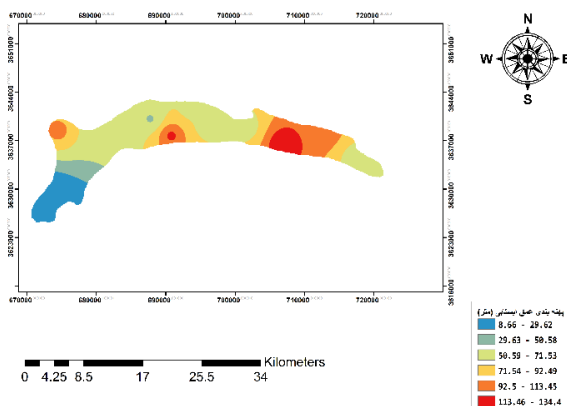
تغییر به‌دست‌آمده از داده‌های این ماهواره با هر سه الگوریتم



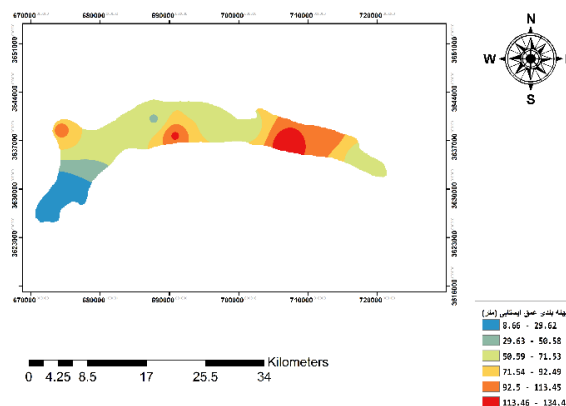
شکل ۶- وایازی خطی الگوریتم‌ها و چاه‌های مشاهده‌یی آبخوان دشت بیرجند الف) GFZ ب) JPL ج) CSR.

نتیجه‌ی پهنه‌بندی به‌روش کریجینگ معمولی برای تحلیل مکانی تراز ایست‌آبی این آبخوان با داده‌های مشاهده‌یی در شکل ۷ آورده شد.

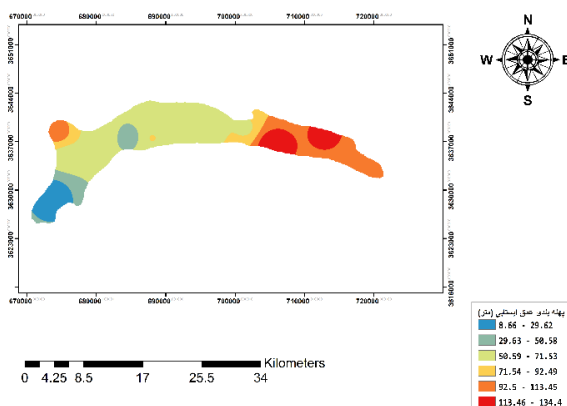
ضریب همبستگی خطی بین مدل‌های GFZ، JPL، و CSR به ترتیب ۰.۶۹٪، ۰.۵۱٪ و ۰.۶۶٪، و بیانگر مناسب‌تر بودن مدل GFZ برای پایش کمیت آب‌های زیرزمینی آبخیز دشت بیرجند است.



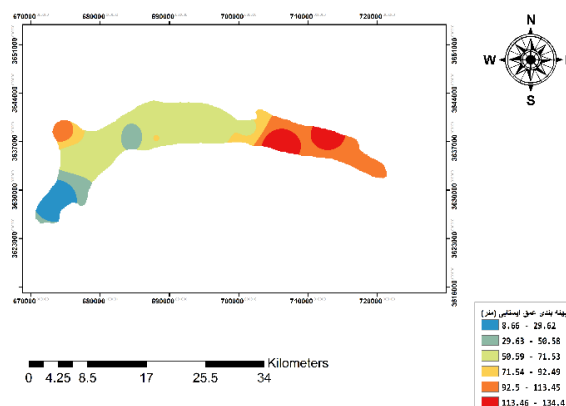
(ا)



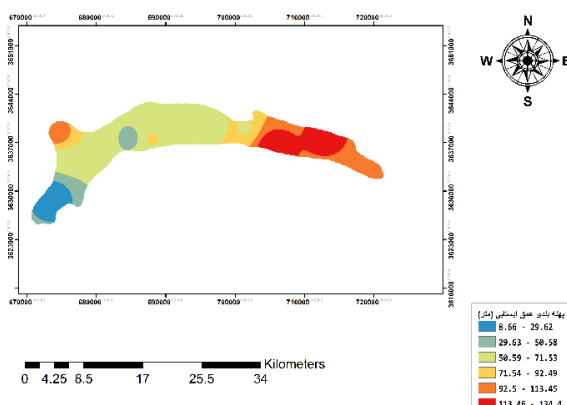
(ب)



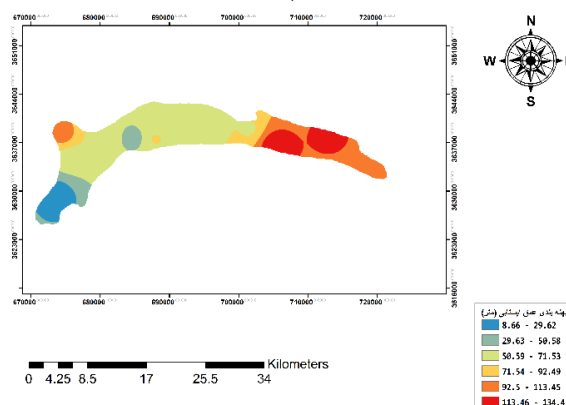
(ج)



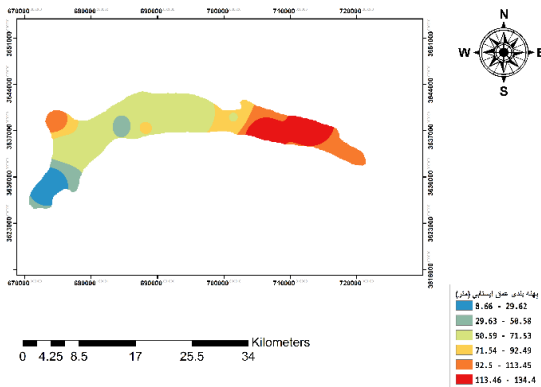
(د)



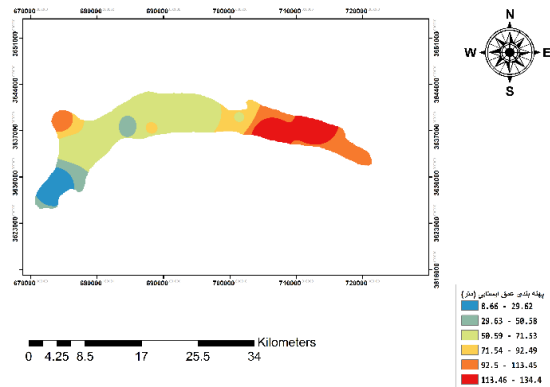
(ه)



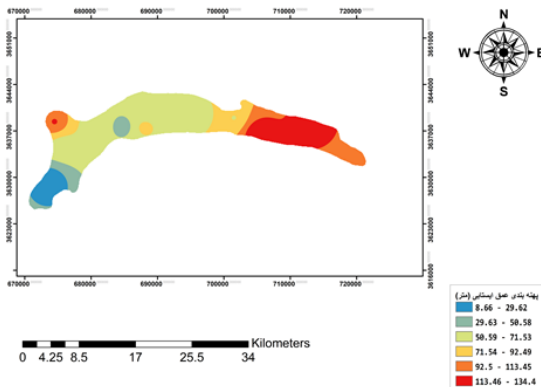
(و)



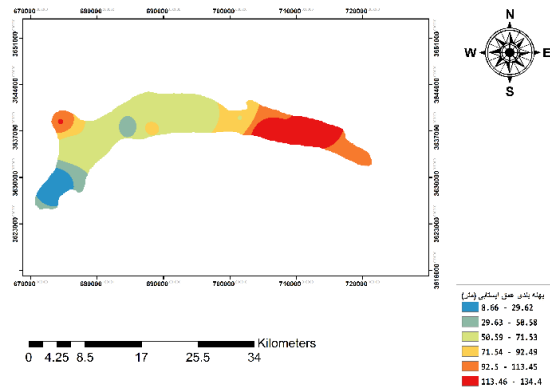
(ب)



(د)



(ز)

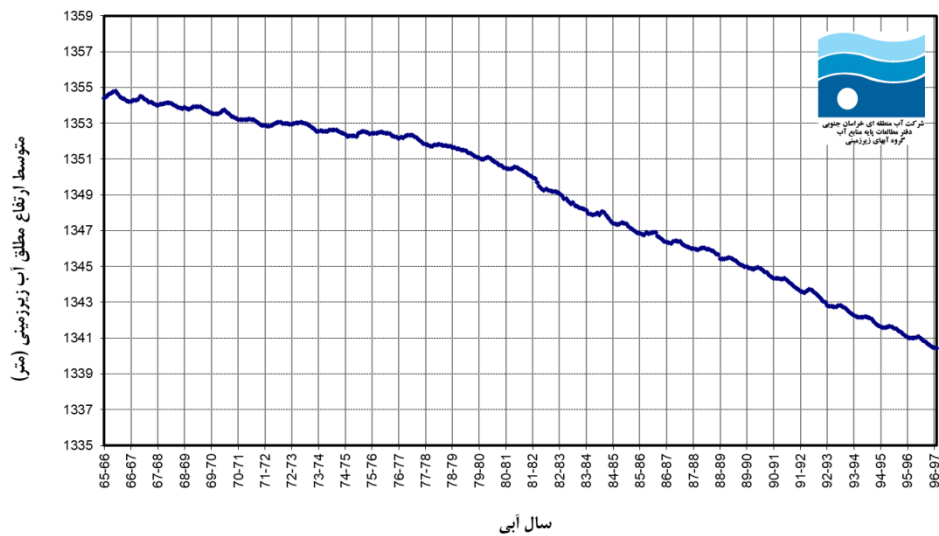


(و)

شکل ۷ - پهنه‌بندی تراز ایستابی در سالهای الف (۱۳۸۷-۱۳۸۸ ب) ۱۳۸۸-۱۳۸۹ پ) ۱۳۸۹-۱۳۹۰ ت) ۱۳۹۰-۱۳۹۱ ث) ۱۳۹۱-۱۳۹۲ ج) ۱۳۹۲-۱۳۹۳ د) ۱۳۹۳-۱۳۹۴ ذ) ۱۳۹۴-۱۳۹۵ و) ۱۳۹۵-۱۳۹۶ ی) ۱۳۹۶-۱۳۹۷.

تغییر تراز ایستابی از روی نقشه‌های پهنه‌بندی کاملاً نزولی است، و تراز آب در این آبخوان افت کرده است، که تحلیل و پایش مدل‌های سنجنده‌ی گریس برای این حوزه نیز بیانگر افتی بیش از ۲۷ میلی‌متر در سال است. نتیجه‌ی دیگری که می‌تواند استنباط افت کردن تراز آب در این آبخوان را ثابت کند، نمودار آبی است (شرکت آب منطقه‌ی خراسان جنوبی ۲۰۰۸) و متوسط ارتفاع مطلق آب زیرزمینی را در سال‌های مختلف آبی نشان می‌دهد (شکل ۸). با بررسی چاه‌های مشاهده‌ی نصب‌شده در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ می‌توان دریافت که کسری مخزن آبخوان دشت بیرجند در ۱۰ سال گذشته ۷۶/۸۶ میلیون مترمکعب است.

پهنه‌بندی بیانگر این است که تراز ایستابی جنوب غربی آبخوان بالاتر از سایر مناطق آبخوان است، و علت اصلی آن پست‌تر بودن منطقه در دشت است. تراز ایستابی در شرق و جنوب شرق پایین‌تر است؛ این تراز در بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله افت شدید کرده، و مساحت مناطق با تراز ایستابی پایین‌تر در درازمدت پیشرفت کرده است. در مناطق غربی و جنوب غربی که تراز ایستابی آن‌ها در ۱۳۸۷-۱۳۸۸ بیش‌ترین بود از ۸ متر به ۱۱ متر در ۱۳۹۶-۱۳۹۷ کم شده است، و در مناطق شرقی و مرکزی آبخوان که تراز ایستابی پایین‌تر از سایر مناطق آبخوان است در سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۷ نزدیک به ۶ متر افت کرده است. همانند نتیجه‌های به‌دست‌آمده از داده‌های گریس، روند کلی



شکل ۸- نمودار آبی آب زیرزمینی دشت بیرجند از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۶

تا ۱۳۹۷ در نرم‌افزار ArcGIS به روش کریجینگ معمولی انجام شد. وایازی خطی بین نتیجه‌های سه الگوریتم، GFZ، JPL، CSR و پیزومترها، ۶۹٪ همبستگی نشان داد. با توجه به این که توان تفکیک داده‌های گریس به کار برده شده از ابعاد آبخوان بزرگ‌تر است، هم‌پوشانی داده‌های زمینی منطقه و داده‌های ماهواره‌ی گریس مطلق نیست. به عبارتی، آبخوان‌های مجاور بر داده‌های ماهواره‌ی گریس اثر دارد، و خود این باعث می‌شود که ضریب همبستگی از اندازه‌ی دل‌خواه کمی فاصله بگیرد. البته، چون وضعیت دشت‌های مجاور هم مانند دشت بیرجند بحرانی است (شکل ۱) اثر آن‌ها کم‌تر است، ولی به‌طور کلی هرچه آبخوان بررسی شده گسترده‌تر باشد، به‌نحوی که همخوانی آن با توان تفکیک داده‌های گریس بیشتر باشد، انتظار اعتمادپذیری و ضریب همبستگی بیشتر می‌رود. با توجه به همبستگی مناسب به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که محققان و سازمان‌ها ممکن است داده‌های گریس را همچون روشی کم‌هزینه و آسان برای پایش و تحلیل کردن نوسان تراز آب‌های زیرزمینی به کار ببرند. به‌طور کلی تا کنون سه ماهواره‌ی ثقل‌سنجی کاربردی^{۱۰}، CHAMP^{۱۱}، GRACE^{۱۰} و GOCE^{۱۰} به فضا پرتاب شده است. پژوهشگران برای پایش آب‌های زیرزمینی عموماً از ماهواره‌ی گریس استفاده کرده‌اند، به دلیل این که توان تفکیک مکانی این ماهواره بیشتر، عمر آن بیشتر، و

میزان افت تراز آب‌های زیرزمینی دشت بیرجند از سال ۱۳۸۳-۱۳۸۴ شدیدتر شده است (شکل ۸). با توجه به تقسیم‌کردن استان خراسان به سه استان خراسان شمالی، رضوی و جنوبی در همان سال‌ها، به نظر می‌رسد که این پدیده ارتباط مستقیمی با توسعه‌ی جمعیتی، صنعتی و کشاورزی ناشی از این رخداد سیاسی اجتماعی در استان خراسان جنوبی و آبخیز دشت بیرجند دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

کم‌شدن ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی یکی از بحران‌های پیش روی قرن است، به‌طوری که همه‌ی کشورها را بر آن داشته است که در زمینه‌ی مدیریت و حفظ این ذخیره‌ی ارزشمند اقدام‌های اساسی انجام دهند. از دیرباز احداث چاه‌های مشاهده‌ی یکی از روش‌های معمول در بررسی تراز سفره‌های زیرزمینی و آگاهی از روند تغییر آن بوده است، اما متأسفانه به دلیل هزینه‌های زیاد برای ساختن آن، بهره‌برداری از آن، و دسترس نبودن کافی همه‌ی منطقه‌ها برای بررسی کمیت آب‌های زیرزمینی، روشی به صرفه نیست. در این پژوهش داده‌های ماهواره‌ی گریس در ارزیابی نوسان تراز آب در آبخوان دشت بیرجند به کار برده شد. برای تحلیل مکانی و زمانی تراز ایست‌آبی دشت، پهنه‌بندی بر اساس عمق تا تراز ایست‌آبی و با ۱۱ چاه مشاهده‌ی و به تفکیک از سال ۱۳۸۷

10- Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer

11- CHALLENGING Mini-Satellite Payload

تغییر ذخیره‌ی آب‌های زیرزمینی قزوین به‌دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره‌ی گریس در تراز ۹۹٪ معنادار بود (فرجی و همکاران ۲۰۱۷). با توجه به این‌که منطقه‌ی بررسی‌شده‌ی قزوین نزدیک به دریای خزر است، لازم است تاثیر فرآیند جزر و مد اصلاح و حذف شود، اما استان خراسان جنوبی فاصله‌ی زیادی با دریای خزر و دریای عمان دارد، بنابراین نیازی به پالایش و تصحیح‌کردن نیست، و این باعث افزایش دقت در پژوهش این مقاله، در مقایسه با منطقه‌های نزدیک به آب‌های آزاد و دریاچه‌ها است.

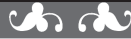
تحلیل حسینی (۲۰۱۴) در پیش‌بینی تراز ایست‌آبی آبخوان دشت بیرجند به روش شبکه‌ی عصبی، و مدل‌سازی چاه‌های مشاهده‌یی از ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷ نشان داد که تراز پیژومترها در ۵ سال آینده مانند پیژومتر نصب‌شده در محمدیه از ۱۳۴۰ به ۱۳۳۸، پیژومتر شمس‌آباد از ۱۳۵۳ به ۱۳۵۱، تقاب از ۱۳۱۶ به ۱۳۱۴، رکات از ۱۳۴۷ به ۱۳۴۶، حاجی‌آباد از ۱۳۷۰ به ۱۳۶۸ خواهد رسید، و پیژومترهای دیگر نیز افت خواهد کرد، که با نتیجه‌های ماهواره‌ی گریس در تعیین افت تراز ایست‌آبی آبخوان دشت بیرجند مطابق است.

زمان تصویربرداری آن کوتاه‌تر است (حسینی ۲۰۱۴). به‌کاربردن سامانه‌ی موتور گوگل‌ارث برای پردازش داده‌های ثقل‌سنجی، مشکل‌هایی از قبیل حجم زیاد داده‌ها، نیاز به تهیه‌ی سامانه‌های قدرتمند برای پردازش داده‌ها، و مشکل‌های پیش پردازش داده‌ها را برطرف، و تحلیل‌کردن مجموعه‌ی زمانی موضوع‌های مختلف مانند پایش نوسان تراز آب‌های زیرزمینی را آسان می‌کند.

یکی از ویژگی‌های به‌کاربردن داده‌های ماهواره‌یی ثقل‌سنجی گریس در مقایسه با روش‌هایی همچون شبکه‌ی عصبی مصنوعی دادن امکان دستیابی به دقت زیاد در تحلیل نوسان آب‌های زیرزمینی با هزینه‌ی اندک است. محتشم و همکاران (۲۰۱۰) با ۱۶ پیژومتر نصب‌شده و داده‌های ۱۵ ساله تراز ایست‌آبی آبخوان دشت بیرجند را با شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که عمل‌کرد مدل شبکه‌ی عصبی در منطقه مناسب است، اما با توجه به هزینه‌ی نصب و افزایش تعداد چاه‌های مشاهده‌یی، و از طرفی وابستگی این مدل به تعداد پیشینه‌ی اندازه‌گیری‌های مشاهده‌یی، به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ی گریس ممکن است گزینه‌ی مناسب‌تری باشد. یکی دیگر از ویژگی‌های روش به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ی گریس مناسب‌تر بودن آن برای مناطق کویری و دور از فضا‌های آبی است. همبستگی داده‌های

- Faraji Z, Kaviani A, Ashrafzadeh A. 2017. Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. Iranian journal of ecohydrology.4(2):463–476. (In Persian).
- Forootan E, Rietbroek R, Kusche J, Sharifi M A, Awange J L, Schmidt M, Omondi P, Famiglietti J. 2014. Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data, Remote Sensing of Environment. 140: 580–595.
- Förste C, Shako R, Flechtner F, Dahle C, Abrykosov O, Neumayer K H, Barthelmes F, König R, Bruinsma S L, Marty J C, Lemoine J M, Balmino G, Biancale R. 2012. A new release for EIGEN-6 - the latest combined global gravity field model including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse, (Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, Abstract No. EGU2012-2821, 2012), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2012).
- Frappart F, Ramillien G. 2018. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. Remote Sensing.10(6):829-854.
- Giordano M. 2009. Global Groundwater? Issues and Solutions. Annual Review of Environment and Resources. 34(1):153–178.
- Gleeson T, Wada Y, Bierkens M F P, van Beek L P H. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature. 488:197–200. grace.jpl.nasa.gov.
- Hao Z, Zhao H, Zhang C, Zhou H, Zhao H, Wang H. 2019. Correlation Analysis Between Groundwater Decline Trend and Human-Induced Factors in Bashang Region. Water.11(3):473–496.
- Hosseini B. 2014. Evaluation of efficiency and precision of different gravimetric satellite systems such as Goce, Grace and Champ. Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for The Degree of M.Sc. in Geodesy. Islamic Azad University Taft Branch. (In Persian).
- Jackson R B, Carpenter S R, Dahm C N., McKnight D M, Naiman R J, Postel S L, Running S W. 2001. Water in a changing world. Ecological Applications. 11: 1027–1045.
- Joodaki G. 2014. Earth Mass Change Tracking Using GRACE Satellite Gravity Data. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- Khaki M, Forootan E, Kuhn M, Awange J, van Dijk A I J M, Schumacher M, ShariF M A. 2018. Determining Water Storage Depletion within Iran by Assimilating GRACE data into the W3RA Hydrological Model. Advances in Water Resources .114: 1–18.
- Konikow L F. 2011. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. Geophysical Research Letters. 38 (17).
- Li F, Wang Z, Chao N, Song Q. 2018. Assessing the Influence of the Three Gorges Dam on Hydrological Drought Using GRACE Data. Water. 10(5):669-686.
- Mohtasham M, Dehghani A A, Akbarpour A, Mef-tah M, Etebari B. 2010. Groundwater Level Determination by Using Artificial Neural Network (Case study: Birjand Aquifer). Iranian Journal of Irrigation and drainage. 1(4): 1–10. (In Persian).
- Oki T, Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. Science. 313: 1068–1072.
- Sophocleous M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. Hydrogeology Journal. 10: 52–67.
- Southern Khorasan Regional Water Company.

2008. Report on prolongation of the prohibition of the study area of Birjand. 4616. (In Persian).
- Springer A, Eicker A, Bettge A, Kusche J, Hense A. 2017. Evaluation of the Water Cycle in the European COSMO-REA6 Reanalysis Using GRACE. *Water*. 9(4): 289–313.
- Tajdarul H, Syed James S, Famiglietti M, Rodell J, Chen C, Wilson R. 2008. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *WATER RESOURCES RESEARCH*. 44:1–15.
- Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, Reigber C. 2004. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*. 31(9).
- Voss K A, Famiglietti J S, Lo M, de Linage C, Rodell M, Swenson S C. 2013. Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resource Research*. 49(2): 904–914.
- Wada Y, van Beek L P H, Sperna Weiland F C, Chao B F, Wu Y H, Bierkens M F P. 2012. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys Geophysical Research Letters*. 39(9).
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *JGR Solid Earth*. 103(12): 30205–30229.
- Zektser I S, Loaiciga H A. 1993. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: Past, present and future. *Journal of Hydrology*. 144(1):405–427.



Watershed Management Research

VOL. 32, No. 4, Ser. No: 125, Winter 2020, pp. 51-65
DOI: 10.22092/wmej.2019.126204.1218

Monitoring the Fluctuations of the Birjand Plain Aquifer Using the GRACE Satellite Images and the GIS Spatial Analyses

Mobin Eftekhari

(Corresponding Author)* M.Sc. in Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Young Researchers and Elite Club, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad , Iran

Kavosh Madadi

M.Sc. in Remote Sensing Engineering, University of Industrial and Technological Advanced Studies, Kerman, Iran.

Mohamad Akbari

Assistant Professor of Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

*Corresponding Author Email: Mobineftekhari@yahoo.com

Received: 12 May 2019

Accepted: 03 September 2019

Abstract

Over-exploitation of a limited resource, especially in arid and semi-arid regions such as Iran, entails a strict management of groundwater. In this context, identification of changes and fluctuations in groundwater level can help to make the right decision. The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), a joint mission of NASA and the German Aerospace Center, makes detailed measurements of the Earth's gravity field anomalies and fluctuations in groundwater resources at a spatial resolution of a few hundred kilometers. Due to the lack of the in-situ measurements at a regional scale for the quantitative groundwater monitoring, this satellites unique data are used to monitor the quantitative annual changes in the groundwater resources. Data processing was performed on the Google Earth Engine Web platform using the JPL, GFZ and CSR algorithms. Results were compared using the piezometric data from 2008 to 2018. This comparison was performed by a linear regression between the changes obtained from GRACE algorithms and the piezometric data, which resulted in a 69% correlation of these two methods. In order to perform spatial and temporal analysis of the water level of the aquifer, the zoning was performed using the ArcGIS software. The results indicated that, the water level in the studied aquifer has been significantly reduced during the 2008 to 2018 period due to a lack of rainfall, thus the net recharge and over-extracting.

Keywords: Geographical Information System, google Earth Engine, GRACE, groundwater, remote sensing