نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

Vol.12, No.2, Summer 2024

۱۰۳ -۱۲٤

مقاله پژوهشی

تحلیل بلند مدت همبستگی بین تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهداتی و تغییرات ذخایر آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از مشاهدات ماهواره گریس در تهران

هانی محبوبی[1*]، یحیی جمور[2]

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

چکیده

ذخایر آب زیرزمینی *(GWS)* در آبخوان‌ها از مهمترین منابع تأمین آب شرب و آب مورد نیاز کشاورزی در ایران است. جمعیت استان تهران بیش از ۹ میلیون نفر بوده و نیمه جنوبی شهر تهران دارای اقلیم نیمه‌خشک و بارش کم است؛ همچنین در اقلیم نیمه‌مرطوب شمالی و کوهپایه‌ای هم میانگین بارندگی خیلی چشمگیر نیست، لذا جبران آب زیرزمینی تخلیه شده بسیار سخت است. ازاین‌رو، پایش دقیق تغییرات *GWS* استان حائز اهمیت است. امروزه ماهواره‌های دوقلوی گریس *(GRACE)* یک ابزار مناسب هستند که با کمک مدل‌های هیدرولوژی می‌توانند به تخمین و ارزیابی تغییرات ماهیانه *GWS* کمک نمایند. علاوه‌براین، مشاهدات چاه‌های پیزومتری نیز برای اینگونه مطالعات بسیار ضروری است. ماهواره‌های گریس تغییرات شتاب ثقل زمین در یک منطقه را در اثر تغییرات ذخایر آبی زمین *(TWS)*، بلافاصله حس می‌کنند ولی اینگونه تغییرات در مشاهدات چاه‌ها با یک تأخیر زمانی دریافت می‌گردد. در این تحقیق از سه نوع داده با نرخ ماهیانه در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۴ (دی‌ماه ۱۳۸۲) تا دسامبر ۲۰۱۶ (آذرماه ۱۳۹۵) جهت بررسی تغییرات بلندمدت *GWS* در تهران استفاده شده است. ابتدا از داده‌های ماهواره گریس به روش ماسکون که به‌صورت نقاط شبکه‌ای با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵ درجه منتشر شده‌اند، تغییرات *TWS* استخراج شده و سپس با استفاده از داده‌های مدل داده‌گواری شده جهانی زمین *(GLDAS)* که دارای قدرت تفکیک مکانی مشابه می‌باشد، پارامترهایی که مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آب‌های زیرزمینی هستند تخمین زده می‌شود. درنهایت تغییرات *GWS* از کم‌کردن این دودسته داده محاسبه می‌گردد. همچنین از داده‌های چاه‌های مشاهداتی که به‌صورت ماهیانه ثبت شده‌اند نیز برای ارزیابی همبستگی تغییرات به‌دست‌آمده استفاده شده است. جهت انجام آنالیز همبستگی، تأخیر زمانی بین سری زمانی تغییرات آب چاه‌ها و سری زمانی تغییرات *GWS* به‌دست‌آمده از مشاهدات گریس با روش میان-همبستگی به دست آمد. بیشترین ضریب همبستگی سری زمانی چاه‌ها۰٫۷۲ و میانگین ضرایب همبستگی ۰٫۲۱ است.

کلیدواژه‌ها : ذخایر آب زیرزمینی، ذخایر آب زمینی، ماهواره گریس، مدل داده‌گواری شده جهانی زمین، میان-همبستگی.

[*] نویسنده مکاتبه کننده: تهران، حکیمیه، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست.

تلفن: ۷۳۹۳۲۴۱۱

Email: h_mahbuby@sbu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

۱- مقدمه

منابع آب زیرزمینی بزرگترین و مهم‌ترین منابع آب شیرین هستند و نقش مهمی را در اکوسیستم و فعالیت‌های بشر ایفا می‌کنند؛ بنابراین واضح است که پایش تغییرات این منابع یکی از اولویت‌های سیاست‌های آبی باشد. چاه‌های مشاهداتی مهم‌ترین و دقیق‌ترین ابزار مشاهده تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی یک منطقه هستند؛ اما باتوجه‌به هزینه‌های حفاری و عدم امکان حفر چاه در برخی مناطق، امروزه روش‌های سنجش از دوری شامل ترکیب مشاهدات ماهواره گریس[1] با مدل‌های هیدرولوژی جهت تخمین تغییرات ذخایر آب زیرزمینی به طور چشمگیری توسعه یافته‌اند. ماهواره‌های دوقلوی گریس در دو گذر متوالی از یک منطقه قادر به تشخیص تغییرات شتاب ثقل در آن منطقه بوده و نهایتاً با توجه به اینکه مهم‌ترین عامل کوتاه‌مدت این تغییر می‌تواند تغییرات ذخایر آب زمینی باشد، تغییرات شتاب ثقل را به تغییرات ذخایر آب زمینی *(TWS)*[2] تبدیل می‌کنند. منظور از ذخایر آب زمینی همه نوع آبی است که می‌تواند در زمین ذخیره شود از جمله آب ذخیره شده در سدها، رودخانه، دریاچه، آب ذخیره شده در پوشش برف، آب ذخیره شده به شکل رطوبت در خاک، آب ذخیره شده در قالب پوشش گیاهی و آب ذخیره شده در آبخوان‌های زیرزمینی؛ بنابراین، با استفاده از مدل‌هایی که تغییرات ذخایر آب را نشان می‌دهند، می‌توان تغییرات ذخایر آبی به جز آبخوان‌ها را استخراج کرده و با کم‌کردن آنها از تغییرات ذخایر کلی آب زمینی به‌دست‌آمده از مأموریت گریس به تغییرات ذخایر آب زیرزمینی *(GWS)*[3] دست‌یافت. قدرت تفکیک داده‌های ماهواره‌های گریس حدود ۳ درجه در طول و ۳ درجه در عرض است و این قدرت تفکیک ضعیف می تواند کاربرد داده‌های این ماهواره‌ها را به تنهایی محدود کند[۱و۲]. در مطالعات فراوانی به واسطه تلفیق داده‌های مأموریت گریس با مدل‌ها یا منابع دیگر داده که می‌توانند بخشی از مولفه‌های تغییرات آب‌های سطحی یا زیرسطحی را پیش‌بینی کنند، قدرت تفکیک بهتری نتیجه شده است [۳، ۴، ۵ و ۶]. به این فرایند اصطلاحاً ریزمقیاس‌سازی[4] می‌گوییم. ریز مقیاس سازی در دو نوع تلفیق با مدل یا اصطلاحاً ریزمقیاس سازی دینامیکی [۷، ۸ و ۹] و تلفیق با داده یا ریزمقیاس سازی آماری صورت می‌پذیرد[۱۰، ۱۱ و ۱۲].

داده‌های سطح ۲ ماهواره‌های گریس شامل ضرایب هارمونیک‌های کروی هستند که تغییرات شتاب ثقل را به صورت ضخامت آب معادل بیان می‌کنند. این ضرایب توسط مراکز پردازش *JPL*[5]، *GFZ*[6] و *CSR*[7] به ترتیب تا درجه و مرتبه ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ تولید شده‌اند. نوع دیگر داده‌های چگال توده[8] هستند که در آن مشاهدات فواصل بین ماهواره‌های دوقلو با استفاده از توابع پایه هارمونیک‌های کلاه کروی سطحی در مقیاس محلی و با رزولوشن بیشتری درونیابی شده و به تغییرات ضخامت آب معادل مبدل می‌گردد. این داده‌ها در سطح ۳، به شکل نقاط منظم شبکه‌ای و با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵ درجه در اختیار کاربر قرار می‌گیرند [۱۳]. اگر ریز مقیاس سازی به روش دینامیکی صورت پذیرد عموماً از مدل‌های سیستم داده‌گواری جهانی زمین *GLDAS*[9] یا مدل‌های هیدرولوژی نظیر *WaterGAP(WGHM)*[10] یا *SWAT*[11] جهت برآورد پارامترهای مؤثر بر ذخایر آب

[1] *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*
[2] *Terrestrial water storage*
[3] *Ground water storage*
[4] *Downscaling*
[5] *NASA Jet Propulsion Laboratory*
[6] *German Research Centre for Geosciences*
[7] *Center for Space Research*
[8] *Mascon*
[9] *Global land data assimilation system*
[10] *WaterGAP hydrology model*
[11] *Soil and water assessment tool*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

زمینی استفاده می‌گردد. اگر تغییرات آب زیرزمینی از این روش به طور دقیق محاسبه شده باشد، بایست همبستگی مناسبی با تغییرات سطح آب چاه‌ها داشته باشد. عموماً این اتفاق در هر زمان و مکانی رخ نمی‌دهد و در یک سری بازه‌های زمانی همبستگی بهتر خواهد بود. همچنین مناطقی نیز وجود دارند که میزان همبستگی تغییرات آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از دو منبع مختلف کم است. نکته قابل‌توجه در بررسی همبستگی ذخایر آب زیرزمینی محاسبه شده با کمک مأموریت گریس و تغییرات سطح آب چاه‌ها آن است که عوامل مهمی نظیر بارش[1] یا تخلیه آبخوان[2] که به‌سرعت منجر به تغییر *TWS* مشاهده شده توسط ماهواره‌ها می‌شوند، با همان سرعت روی مشاهدات ثبت شده توسط چاه‌ها اثر نمی‌گذارند. مدتی طول خواهد کشید تا آب ناشی از بارش منجر به تغییر مشاهدات سطح آب چاه‌ها شود یا بالعکس تخلیه آبخوان بتواند روی مشاهدات چاه اثر بگذارد. این مدت بسته به هندسه آبخوان‌ها، عمق چاه و شرایط محیطی می‌تواند برای هر چاه متفاوت باشد که ازاین‌پس به این اختلاف زمانی پارامتر تأخیر زمانی چاه می‌گوییم.

در این مقاله تأخیر زمانی چاه‌های تهران تخمین زده شده است. همچنین هدف اصلی بررسی تغییرات بلندمدت آب‌های زیرزمینی بوده که از داده‌های ماهواره گریس و مدل *GLDAS* استخراج شده‌اند و همچنین به دنبال آنالیز همبستگی بین این تغییرات استخراج شده با چاه‌ها هستیم. اهمیت این پژوهش آن است که روشن می‌شود تا چه اندازه می‌توان بر مطالعاتی اتکاء نمود که تغییرات ذخایر آب زیرزمینی را صرفاً با استفاده از داده‌های ماهواره‌های گریس و مدل بررسی کرده و اصطلاحاً ریزمقیاس سازی دینامیکی انجام داده‌اند. مطالعاتی از جمله بهانجا و همکاران (۲۰۱۶)، لایش و همکاران (۲۰۱۶)، و زبکا و همکاران (۲۰۲۰)، استراسبرگ و همکاران (۲۰۰۷)، به آنالیز همبستگی *GWS* مستخرج از ریزمقیاس سازی داده‌های گریس با تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهداتی پرداخته‌اند [۵، ۱۴و ۱۵].

در مطالعه‌ای که توسط بهانجا و همکاران (۲۰۱۶)، انجام شده، آنالیز همبستگی *GWS* مستخرج از ریزمقیاس سازی داده‌های گریس با تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهداتی در هندوستان انجام شد. دراین مطالعه از مشاهدات بیش از ۳۲۰۰ چاه در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ استفاده شده و نشان داده شد که داده‌های ماسکون گریس همبستگی بیشتری با سطح آب چاه‌ها نسبت به داده‌های در قالب هارمونیک‌های کروی داشته‌اند [۱۴]. استراسبرگ و همکاران (۲۰۰۷) به ضریب همبستگی ۰٫۵۸ بین *GWS* محاسبه شده از گریس و مشاهده شده در چاه‌های آمریکا از ابتدای ۲۰۰۳ تا انتهای ۲۰۰۵ دست یافتند [۱۶].

در حیطه آنالیز همبستگی بین این دو منبع داده در منطقه ایران، حافظ پرست (۱۴۰۱)، نبوی و همکاران (۱۳۹۹) و گل محمدی و جودکی (۱۳۹۹)، مطالعاتی انجام داده‌اند[۱۷، ۱۸و ۱۹] . همچنین، امیری و همکاران (۲۰۲۳)، مطالعه‌ای را در استان یزد برای سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ انجام داده و به ضریب همبستگی ۰٫۵۸ بین *GWS* محاسبه شده از گریس و مشاهدات چاه‌های آب دست یافتند [۲۰].

در این تحقیق سعی بر آن است که همبستگی *GWS* محاسبه شده به کمک ماهواره‌های گریس و مشاهده شده از چاه‌ها در تهران در بازه زمانی طولانی ۱۳ساله بین دی‌ماه ۱۳۸۲ تا آذرماه ۱۳۹۵ بررسی گردد. برای این منظور از داده گرید ماسکون با قدرت تفکیک ۰٫۲۵ درجه در طول و عرض استفاده شده و همچنین جهت استخراج ذخایر آبی غیرمربوط به آبخوان از مدل *GLDAS* با قدرت تفکیک ۰٫۲۵ بهره بردیم. از سوی دیگر داده‌های چاه‌های مشاهداتی تهران که شامل ۲۹۵ چاه فعال در این بازه زمانی می‌باشد به کار گرفته شد. این مطالعه اولاً، می‌تواند نحوه رفتار و تغییرات مکانی-

[1] *Precipitation*
[2] *Aquifer depletion*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

زمانی کمیت حیاتی *GWS* را نشان دهد و ثانیاً به کمک ارزیابی همبستگی با چاه‌ها، می توان دریافت که ذخایر آبی مستخرج از مدل‌های هیدرولوژی و داده‌های ماهواره گریس در استان تهران تا چه اندازه صحت داشته و در کدام مناطق تهران از صحت بیشتری برخوردارند.

۲- روش تحقیق

در این بخش ابتدا به بررسی انواع داده به کار رفته در این مطالعه و پراکندگی مکانی و زمانی آنها می‌پردازیم. سپس مراحل تولید *GWS* بررسی شده و نهایتاً به آنالیز مکانی-زمانی چگونگی همبستگی *GWS* با داده‌های ثبت شده از سطح چاه‌های مشاهداتی پرداخته شده است.

۲-۱- انواع داده

به‌طورکلی سه دسته داده در این تحقیق به کار گرفته شده است. داده‌های *TWS* ماهواره‌های گریس، داده‌های مربوط به ذخایر آب غیر زیرزمینی که از مدل *GLDAS* گرفته شده و داده‌های ثبت شده چاه‌های مشاهداتی. بازه زمانی مطالعه شامل ژانویه ۲۰۰۴ (دیماه ۱۳۸۲) تا دسامبر ۲۰۱۶ (آذرماه ۱۳۹۵) می باشد. منطقه مطالعه استان تهران محدوده به طول‌های جغرافیایی ۵۰٫۲ تا ۵۳٫۲ و عرض‌های ۳۴٫۸ تا ۳۶٫۴ است. پارامتر *TWS* از داده های سطح ۳ که به صورت مقادیر ارائه شده روی نقاط شبکه‌ای منظم هستند و به شیوه ماسکون تهیه شده‌اند، گرفته شده است. این داده شامل تغییرات آب‌های زمینی است که در قالب ضخامت آب معادل به صورت ماهانه ارائه می‌شود. قدرت تفکیک مکانی این شبکه نقاط ۰٫۲۵ درجه در طول و عرض بوده و قدرت تفکیک زمانی ماهیانه دارد. اپک مرجع زمانی این منبع داده روز اول ژانویه سال ۲۰۰۲ می‌باشد. مقادیر *TWS* روی نقاط شبکه‌ای توسط موسسه تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس *(CSR)*[1] منتشر شده است [۱۳].

جهت دستیابی به ذخایر آب زیرزمینی می‌بایست ذخایر غیر زیرزمینی را از *TWS* کم کنیم. برای این منظور، از مدل *GLDAS* که حاوی آب ذخیره شده به شکل رطوبت در خاک *SMS*[2] ، آب ذخیره شده به شکل برف *SWE*[3] و آب ذخیره شده در قالب پوشش گیاهی *CWS*[4] می‌باشد، استفاده شده است [۲۱]. ذخایر آبی ارائه شده در این مدل با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵ درجه در طول و عرض و قدرت تفکیک زمانی ماهانه در اختیار کاربران قرار می‌گیرند. همچنین جهت آنالیز ارتباط بین تغییرات *GWS* با پارامترهای هواشناسی نظیر بارش و تبخیر-تعرق[5] که تأثیر بسزایی در تغییرات *TWS* یک منطقه دارند، از اطلاعات هواشناسی موجود در مدل *GLDAS* با قدرت تفکیک مشابه نیز استفاده شده است. اپک مرجع زمانی این منبع داده اول ژانویه ۲۰۰۰ است. مقادیر ذخایر آب روی این نقاط شبکه‌ای توسط اداره ملی هوافضای ایالات متحده *(NASA)*[6] منتشر شده‌اند [۲۲].

منبع داده دیگری که در این مطالعه استفاده شده، سطح آب ثبت شده *(WL)*[7] در چاه‌های مشاهداتی استان تهران است. تعداد ۲۹۵ چاه به صورت ماهیانه در بازه زمانی مطالعه دارای داده ثبت شده هستند که در سطح استان پراکنده می‌باشند. قدرت تفکیک مکانی داده‌های چاه‌ها مناسب است و در برخی مناطق فواصل چاه‌ها کمتر از یک کیلومتر می‌باشد، گرچه در نواحی شمالی و شمال غربی استان که حفر چاه ساده نبوده، مناطق خالی از داده وجود دارد. شکل)، پراکندگی مکانی چاه‌های مشاهداتی را در بازه زمانی مطالعه توسط نماد آبی رنگ به تصویر می‌کشد. مرجع سطح آب ثبت شده در این چاه‌ها نسبت به سطح زمین (توپوگرافی) بوده است. اطلاعات چاه‌های مشاهداتی از دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب

[1] *Center for Space Research*

[2] *Soil moisture storage*

[3] *Snow water equivalent*

[4] *Canopy water storage*

[5] *Evapotranspiration*

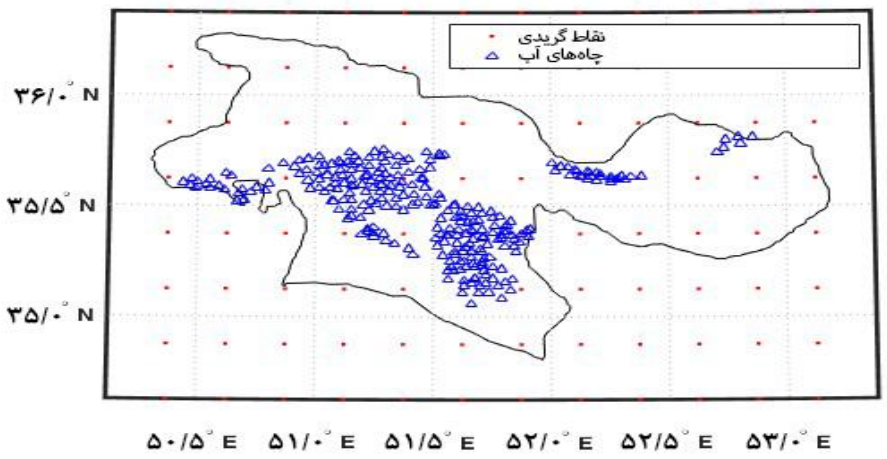
[6] *National Aeronautics and Space Administration*

[7] *Water level*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

ایران دریافت شده است.
نقاط قرمز شکل(۱)، پراکندگی مکانی داده‌های مربوط به ذخایر آب را که از ماهواره‌های گریس و مدل *GLDAS* دریافت کرده‌ایم روی نقاط شبکه‌ای منظم به فواصل ۰/۲۵ درجه نمایش می‌دهد.



شکل۱: پراکندگی شبکه نقاط منظم داده‌های ذخایر کلی آب زمینی و داده‌های مدل *GLDAS* به همراه جانمایی چاه‌های مشاهداتی استان تهران

۲-۲- محاسبه ذخایر آب زیرزمینی

جهت محاسبه *GWS* در نقاط شبکه‌ای، اولین چالش عدم همزمانی *TWS* دریافتی از مأموریت گریس با مقادیر ذخایر آب غیر زیرزمینی به‌دست‌آمده از مدل *GLDAS* می‌باشد. این عدم همزمانی اولاً به تفاوت در مرجع زمانی داده‌ها برمی‌گردد؛ یعنی مرجع زمانی داده‌های *TWS* مأموریت گریس اول ژانویه ۲۰۰۲ بوده، درحالیکه مرجع زمانی داده‌های *CWS*، *SMS* و *SWE* اول ژانویه ۲۰۰۰ است؛ لذا یک شیفت زمانی دوساله بایست به داده‌های دسته اول اعمال شود.
نکته دوم عدم همزمانی داده‌های دسته اول و دوم پس از اعمال شیفت زمانی است. یعنی ممکن است گاهی داده‌های گریس در یک یا دو اپک ثبت نشده باشند و یا حتی داده‌هایی که به‌صورت ماهیانه و مرتب ثبت شده‌اند، چند روز با اپک داده‌های مدل *GLDAS* تفاوت داشته باشد. برای این منظور، داده‌های گریس در اپک داده‌های *GLDAS* درونیابی خطی شده و ذخایر آب زیرزمینی در اپک‌های *GLDAS* به‌صورت منظم ماهیانه محاسبه شده است.
نکته دیگری که برای دستیابی به *GWS* بایست در نظر داشت آن است که داده‌های *TWS* گریس به‌صورت آنومالی هستند. یعنی میانگین *TWS* در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۰۴ تا آخر دسامبر ۲۰۰۹ که می‌شود ۷۲ ماه از مقادیر *TWS* نقاط شبکه‌ای کم شده است. لذا بایست مقادیر سایر ذخایر آب و نیز پارامترهایی نظیر بارش و تبخیر-تعرق که در این مطالعه به کار رفته‌اند، به همین صورت در این بازه زمانی میانگین‌گیری شده و با کسر کردن از داده‌های روی نقاط شبکه‌ای به آنومالی مبدل گردد. پس از محاسبه آنومالی ذخایر آب ذخیره شده در گیاهان، خاک و برف با کم‌کردن مجموع آن از آنومالی ذخایر کلی *(TWSA)* مطابق رابطه(۱)، به آنومالی ذخایر آب زیرزمینی *(GWSA)* دست می‌یابیم:
رابطه(۱)

$$GWSA=TWSA-(SMSA+SWEA+CWSA)$$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

داده‌های مشاهداتی سطح آب هر چاه نیز بایست در همان خط زمانی گریس میانگین‌گیری شده و با کم‌کردن سطح آب ثبت شده از میانگین به آنومالی سطح آب چاه *(WLA)* مبدل گردد تا با سایر داده‌ها همخوانی داشته باشند.

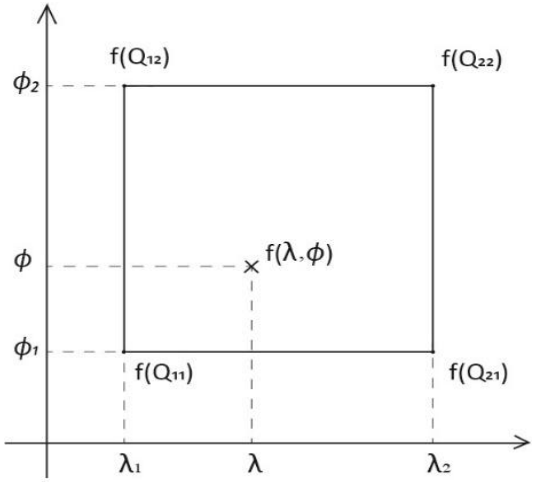
در مرحله آخر با آنالیز میان-همبستگی[1]، پارامترهای تبدیل *GWSA* و *WLA* محاسبه می‌گردند و به همبستگی بین آنها دست می‌یابیم. در اینجا بایست توجه داشت که اولاً، جنس داده‌های چاه با داده‌های ماهواره گریس یکسان نیست یعنی *GWSA* و *WLA* از لحاظ محدوده تغییرات با هم متفاوت هستند. ثانیاً، بایست به تأخیر زمانی بین این دو توجه داشت؛ بدین معنی که غالباً پاسخ چاه به تغییرات آب‌های زیرزمینی کمی با تأخیر می‌باشد و این تأخیر بایست برای هر چاه جداگانه محاسبه گردد. ثالثاً، مکان *GWSA* محاسبه شده از رابطه(۱) روی نقاط شبکه‌ای منظم بوده و همانگونه که در شکل(۱) معلوم است، مکان چاه‌ها نامنظم بوده و این دو بر هم منطبق نیست. برای بررسی همبستگی این دو نوع داده بایست بر این چالش‌ها در فرآیند میان-همبستگی فائق آمد.

۲-۳- فرایند محاسبه میان-همبستگی

فرایند محاسبه میان-همبستگی خود شامل ۳ مرحله است. ابتدا بایست مقادیر *GWSA* بر روی نقاط شبکه‌ای در محل چاه درونیابی شود. این درونیابی از جنس درونیابی دوخطی[2] می‌باشد. در مرحله بعد با تأخیرهای متفاوتی که به مشاهدات *WLA* اعمال می‌گردد، همبستگی دو سری زمانی *GWSA* و *WLA* بررسی می‌شود. تأخیر اعمال شده‌ای که منجر به بیشترین میزان همبستگی می‌گردد را به‌عنوان پارامتر تأخیر چاه در نظر می‌گیریم. علاوه‌براین، مقادیر درونیابی شده *GWSA* از لحاظ جنس با کمیت *WLA* چاه فرق دارند و بایست با یک نگاشت خطی که شامل مقیاس و شیفت مقادیر می‌باشد، *WLA* چاه را به *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه تبدیل کرد؛ لذا به‌ازای هر چاه سه پارامتر وجود دارد که در فرایند میان-همبستگی تخمین زده می‌شوند که عبارتند از مقیاس، شیفت و تأخیر زمانی. فرایند محاسبه میان-همبستگی به ترتیب شامل مراحل ذیل است:

۱- سری زمانی *WLA* هر چاه تشکیل می‌شود.

۲- در هر لحظه t_i که چاه داده ثبت کرده است، شبکه منظم *GWSA* انتخاب شده و به واسطه یک درونیابی دوخطی به کمک نزدیکترین نقاط به مکان چاه، *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه محاسبه می‌گردد. در این درونیابی وزن مقادیر نقاط شبکه‌ای با فاصله آنها از مکان چاه ارتباط معکوس دارد. اگر مطابق شکل(۲)، Q_{ij} معرف مکان نزدیکترین نقاط شبکه ای به مکان چاه (λ,ϕ) بوده و f نماینده مقدار *GWSA* در هر نقطه باشد، مقدار *GWSA* در مکان چاه به مطابق رابطه(۲) درونیابی دوخطی شده و آن را با $f(\lambda,\phi)$ نمایش می‌دهیم.



شکل۲: درونیابی دوخطی مقادیر ذخایر آب زیرزمینی (نقاط شبکه ای) در مکان چاه مشاهداتی (λ,ϕ)

[1] *Cross-correlation*

[2] *Bilinear interpolation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

$$f(\lambda,\phi)=\frac{1}{(\lambda_2-\lambda_1)(\phi_2-\phi_1)}[\lambda_2-\lambda \quad \lambda-\lambda_1]\begin{bmatrix} f(Q_{11}) & f(Q_{12}) \\ f(Q_{21}) & f(Q_{22}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \phi_2-\phi \\ \phi-\phi_1 \end{bmatrix}$$ رابطه(۲)

۳- به‌ازای تأخیرات مختلف $t_0=\{0,1,2,3,4\}$ سری زمانی انتقال یافته چاه $WLA(t_i+t_0)$ تشکیل شده و میان-همبستگی آن با سری زمانی ذخایر زیرزمینی درونیابی شده در مکان چاه $f(\lambda,\phi,t_i)$ مطابق رابطه(۳) بررسی می‌گردد:

رابطه(۳)

$$(f*WLA)[t_0]=\sum_{t_i} f(\lambda,\phi,t_i)WLA(\lambda,\phi,t_i+t_0)$$

در محاسبه میان-همبستگی، میزان مشابهت دو سری زمانی حقیقی به صورت تابعی از جابه‌جایی یکی نسبت به دیگری محاسبه می‌گردد. نهایتاً، آن مقدار t_0 که به ازای آن بیشترین میان-همبستگی بدست آمده باشد را به عنوان پارامتر تأخیر زمانی $(\hat{t_0})$، درنظر می‌گیریم.

۴- با کمک سه پارامتر مقیاس (a)، شیفت (b) و تأخیر زمانی $(\hat{t_0})$، می توان GWA مشاهده شده در چاه را به $GWSA$ درونیابی شده در مکان چاه که در مرحله قبل محاسبه کرده‌ایم و با $f(\lambda,\phi)$ نمایش داده‌ایم، بر اساس رابطه(۴)، تبدیل نمود:

$$a\left[WLA(\lambda,\phi,t_i+\hat{t_0})\right]+b=f(\lambda,\phi,t_i).$$ رابطه(۴)

در واقع، پارامتر مقیاس نسبت بزرگی سری زمانی $GWSA$ درونیابی شده در مکان چاه به بزرگی سری زمانی WLA چاه را نشان می‌دهد. لذا، می‌توان آن را مطابق رابطه(۵)، از طریق حاصل تقسیم نرم دو سری زمانی برهم محاسبه نمود:

$$a=\frac{\left\|GWSA(\lambda,\phi,t)\right\|_2}{\left\|WLA(\lambda,\phi,t+\hat{t_0})\right\|_2},$$ رابطه(۵)

علاوه براین، پارامتر شیف نیز بر اساس رابطه(۶)، از تفاضل میانگین سری زمانی $GWSA$ درونیابی شده در مکان چاه و WLA مقیاس شده بدست می‌آید:

رابطه(۶)

$$b=\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}\left(GWSA(\lambda,\phi,t_i)-aWLA(\lambda,\phi,t_i+\hat{t_0})\right),$$

در رابطه(۶)، T معرف تعداد اپک های ثبت داده در ۱۳ سال است که با توجه به ماهیانه بودن داده ها T برابر ۱۵۶ اپک است. لازم به ذکر است پس از برآورد پارامتر تأخیر زمانی می‌توان آنالیز همبستگی را انجام داد. درحقیقت، همبستگی بین دو سری زمانی $GWSA$ درونیابی شده در مکان چاه و WLA که به ازای پارامتر تأخیر زمانی، انتقال داده شده است، به دست می‌آید.

مراحل فوق که برای دستیابی به همبستگی صحیح بین داده‌های چاه و ذخایر آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از مشاهدات گریس و مدل $GLDAS$ بیان شد، با رعایت اولویت در قالب نمودار روندنمای ترسیم شده در شکل)، نشان داده شده‌اند. در این روندنما، منابع مختلف داده، پیش‌پردازش داده‌ها قبل از محاسبه همبستگی و فرایند تخمین تأخیر زمانی چاه‌ها به وسیله میان-همبستگی نمایش داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

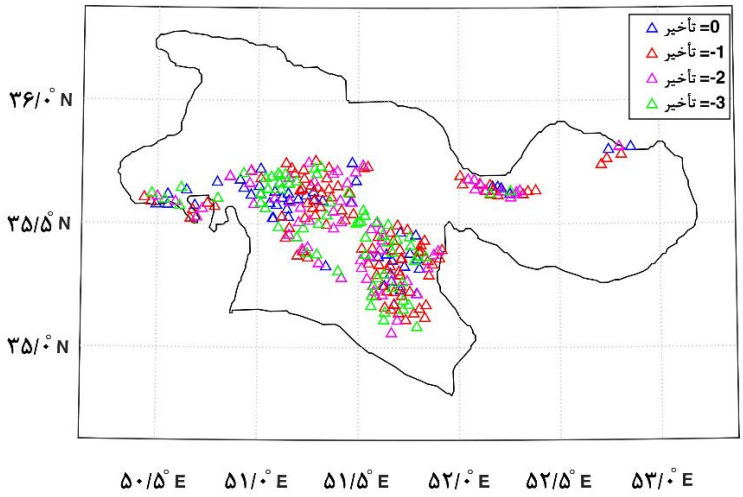
شکل۳: نمودار روندنمای مراحل طی شده جهت دستیابی به همبستگی بین داده‌های چاه و ذخایر آب زیرزمینی حاصل از مأموریت گریس و مدل *GLDAS*

۳- نتایج عددی

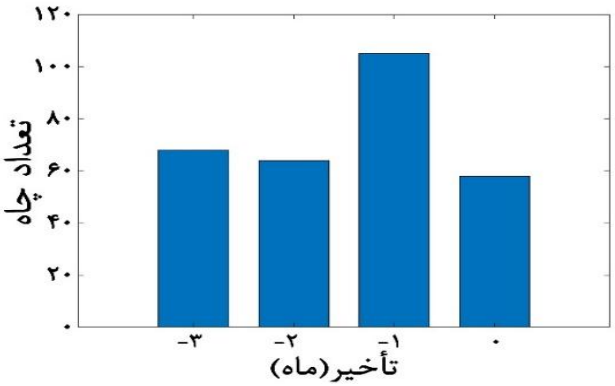
با استفاده از آنالیز میان-همبستگی تأخیر زمانی هر کدام از چاه‌ها تخمین زده شده است. ۲۰ درصد چاهها دارای تأخیر زمانی صفرهستند یعنی به سرعت به تغییرات ذخایر آب پاسخ خواهند داد. تعداد آنها ۵۸ چاه می باشد که در شکل) با نماد آبی رنگ نشان داده شده‌اند. ۳۵ درصد چاه‌ها دارای تأخیر زمانی یک ماه هستند که شامل ۱۰۵ چاه نمایش داده شده با رنگ قرمز در شکل) است. همچنین ۲۲ درصد دارای تأخیر زمانی دو ماه هستند که ۶۴ چاه به رنگ بنفش را شامل شده و نهایتاً ۲۳ درصد چاهها که ۶۸ چاه را شامل می‌گردد، دارای تأخیر زمانی سه ماه هستند که با رنگ سبز در نقشه جانمایی شده‌اند. تعداد هر دسته از این چاهها در استان، در شکل) نمایش داده شده است.

بیشتر چاه‌ها دارای تأخیر یک ماه بوده که تقریباً در همه‌جای استان پراکنده هستند. چاه‌های با تأخیر زمانی بیشتر، عمدتاً در مناطق مرکزی و جنوبی استان دیده می‌شوند و چاه‌های شرق تهران دارای تأخیر زمانی کمتری هستند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]



شکل۴: نقشه پراکندگی چاهها با تأخیر زمانی مختلف در سطح استان

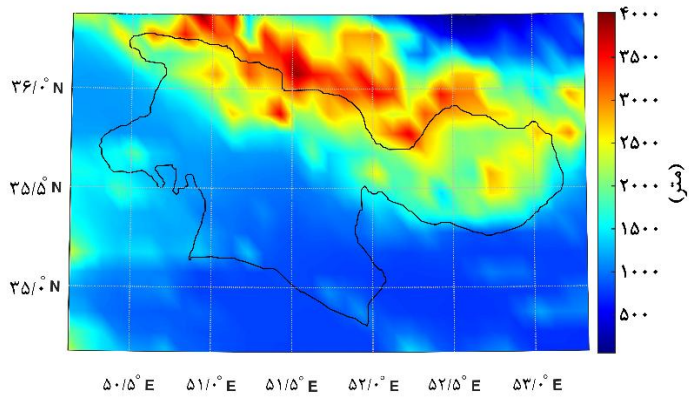


شکل۵: تعداد چاههای استان تهران با تأخیرهای زمانی مختلف بر حسب ماه

شکل(۶) مدل ارتفاعی رقومی منطقه را نشان می‌دهد که جهت بررسی ارتباط توپوگرافی با ویژگی‌های چاه‌ها نظیر تأخیر زمانی و میزان همبستگی با *GWSA* ارائه شده است. همانگونه که از این شکل پیداست، ارتفاع از جنوب به شمال افزایش می‌یابد و مناطق شمالی و شرقی استان دارای تغییرات ارتفاعی شدید هستند. این مناطق دارای ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر و اقلیم نیمه‌مرطوب و کوهپایه‌ای با بارش بیشتر نسبت به نواحی مرکزی و جنوبی هستند. بخشی از چاه‌ها که در شکل(۴) در شرق استان نمایش داده شده‌اند، غالباً دارای تأخیر زمانی کمتری نسبت به چاه‌های مرکزی و جنوبی هستند. در مناطق شرقی غالب چاه‌ها دارای تأخیر زمانی کمتر از سه ماه هستند، درحالیکه در مناطق مرکزی و جنوبی که ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر بوده و دارای اقلیم نیمه خشک با بارش کمتر است، به وفور چاه‌های دارای پارامتر تأخیر زمانی ۲ و ۳ ماه دیده می‌شود. لازم به ذکر است که میانگین آنومالی بارش (اختلاف بارش از متوسط محاسبه شده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹)، برای دماوند در شرق استان برابر *cm* ۳ و برای شهر ری و ورامین واقع در جنوب استان تقریباً صفر است. لذا، در مناطق پربارش پارامتر تأخیر زمانی چاهها کمتر برآورد شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

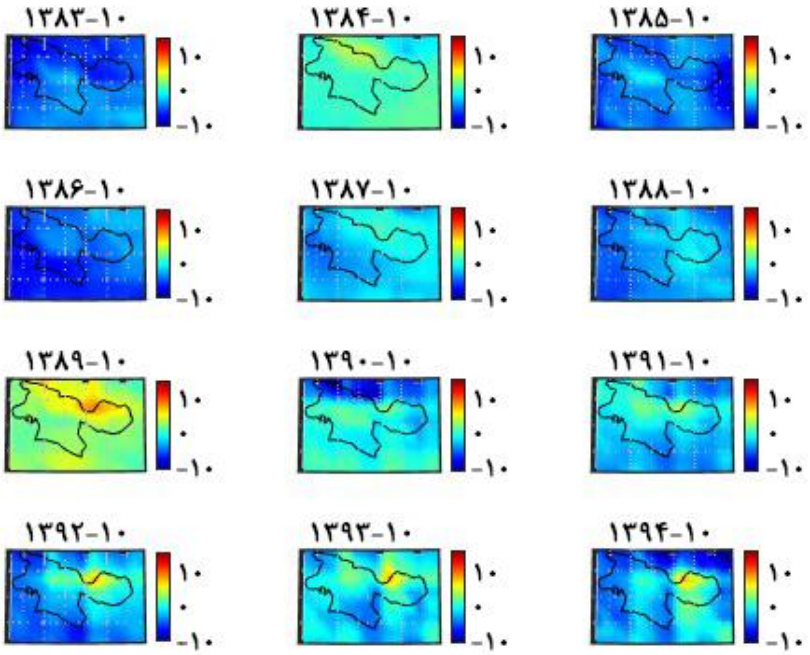
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]



شکل۶: مدل ارتفاعی رقومی منطقه

شکل(۷)، *GWSA* محاسبه شده از رابطه(۱) برای دی ماه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴ را نمایش می‌دهد. از این شکل استنباط می‌شود که اولاً، بیشتر اوقات مقدار *GWSA* در شرق و شمال نسبت به سایر نواحی بیشتر بوده و ثانیاً، *GWSA* مربوط به دی‌ماه در فواصل زمانی یکساله، هم افزایش داشته و هم کاهش داشته است. نکته مهم دیگر آن است که در دی‌ماه نسبت به سایر ماه‌های سال مقدار *GWSA* نسبتاً کم می‌باشد.

در ادامه، شکل(۸)، برای توصیف و مقایسه مقادیر *GWSA* از تیرماه ۱۳۸۴ تا تیرماه ۱۳۹۵با فواصل زمانی یکسال ترسیم شده است. تیرماه یکی از ماه‌های دارای بیشترین *GWSA* است و این موضوع در اختلاف مقادیر شکل(۷) و شکل(۸) نیز مشهود است.

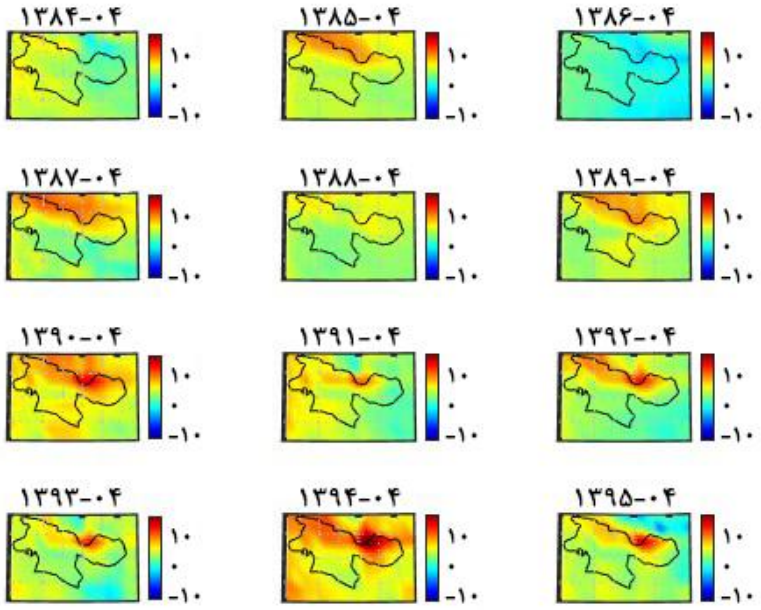


شکل۷: نمایش *GWSA* بر حسب سانتیمتر از دی‌ماه ۱۳۸۳ تا دی‌ماه ۱۳۹۴ در فواصل زمانی یکسال

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

هم در شکل(۷)، مربوط به دی‌ماه که *GWSA* کم است و هم در شکل(۸)، مربوط به تیرماه که *GWSA* زیاد بوده است، اغلب بیشینه *GWSA* مربوط به بخش شمیرانات و کوهپایه‌های البرز در شمال و همچنین بخش دماوند در شرق استان است. همچنین در بیشتر موارد کمینه *GWSA* مربوط به بخش ورامین و ری در جنوب است. تغییرات *GWSA* در تیرماه نیز از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۵ هم افزایش سالیانه و هم کاهش سالیانه را نشان می‌دهد. همچنین شایان ذکر است در شکل)، که مربوط به دی‌ماه است و معمولاً بارش دی‌ماه در تهران مناسب می‌باشد، *GWSA* کم و در شکل)، که مربوط به تیرماه است، مقادیر *GWSA* بیشتر بوده، گرچه بارش در این ماه از تابستان کم است. این عدم تطابق بارش و ذخایر آب زیرزمینی به علت اختلاف زمانی بین وضعیت سطح آب در آبخوان‌ها و بارش می‌باشد.

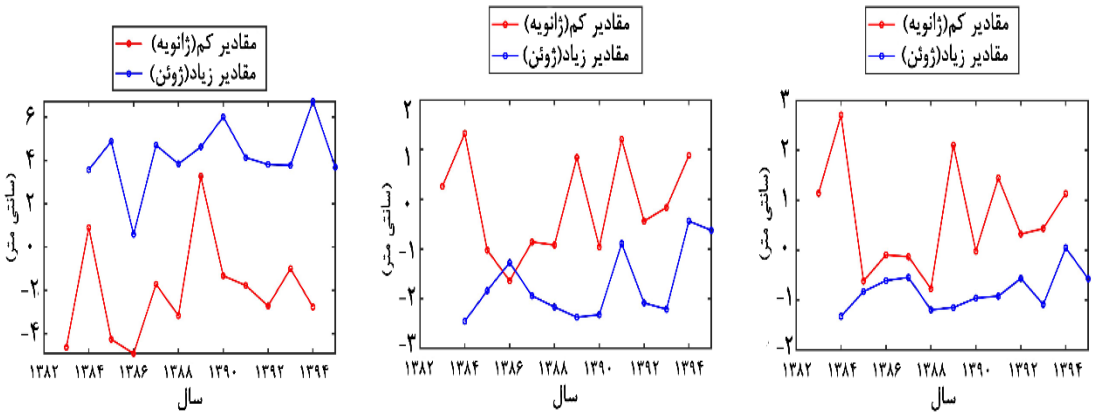


شکل۸: نمایش *GWSA* بر حسب سانتیمتر از تیرماه ۱۳۸۴ تا تیرماه ۱۳۹۵ در فواصل زمانی یکسال

شکل(۹)، متوسط آنومالی ذخایر آب زیرزمینی *GWSA*، متوسط آنومالی بارش *(P)* و متوسط اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق *(P-ET)*، در سطح استان را به صورت سالیانه برای تیرماه و دی‌ماه نمایش می‌دهد. مقادیر پارامترهای مذکور در تیرماه با رنگ آبی و در دی‌ماه با رنگ قرمز ترسیم شده‌اند. در شکل چپ مشهود است که *GWSA* در تیرماه که فصل خشک و کم‌بارش است از دی‌ماه بیشتر می‌باشد. همچنین در شکل وسط این موضوع تصدیق شده است که میانگین آنومالی بارش تهران در دی‌ماه در بازه زمانی مطالعه بیش از تیرماه است و غالباً اختلاف چند سانتی‌متری وجود دارد. اما، علیرغم اینکه در دی‌ماه بارش بیشتر بوده، مقادیر *GWSA* کمتر از تیرماه هستند. در مورد اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق در شکل سمت راست نیز چنین است، یعنی آنومالی *P-ET* در دی‌ماه غالباً خیلی بیشتر از تیرماه است و صرفاً در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ که بارش خیلی کم بوده، مقادیر کمیت فوق در دی‌ماه و تیرماه به هم نزدیک است، اگرچه همچنان این کمیت در دی‌ماه بیشتر می‌باشد. بنابراین، باتوجه به اینکه *P-ET* مهمترین کمیت جوی تأثیرگذار بر ذخایر آب زمینی است، می‌توان نتیجه گرفت که پرشدن آبخوان‌ها پس از

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

فرآیندهای جوی موثر، با یک تأخیر زمانی صورت پذیرفته و در فصل‌های خشک ذخایر آبخوان‌ها بیشتر از فصل‌های پربارش می‌گردند. لذا، سری‌های زمانی *GWSA* ترسیم شده در سمت چپ، یک تأخیر چند ماهه نسبت به هم دارند. تغییرات *GWSA* در برخی سال‌ها افزایشی و در برخی دیگر کاهشی بوده است. نکته دیگر آن است که دامنه تغییرات سالیانه سری زمانی ترسیم شده برای دی‌ماه که مقادیر *GWSA* کمتر بوده، می‌تواند بیشتر باشد، از جمله اینکه، در بازه زمانی دی‌ماه ۱۳۸۸ تا دی‌ماه ۱۳۸۹ بیشترین افزایش سالیانه *GWSA* که تقریباً ۶ *cm* بوده، مشاهده می‌گردد. همچنین بیشترین کاهش سالیانه را برای دی‌ماه ۱۳۸۴ تا دی‌ماه ۱۳۸۵ با اندازه تقریباً ۵ *cm* مشاهده می‌کنیم.



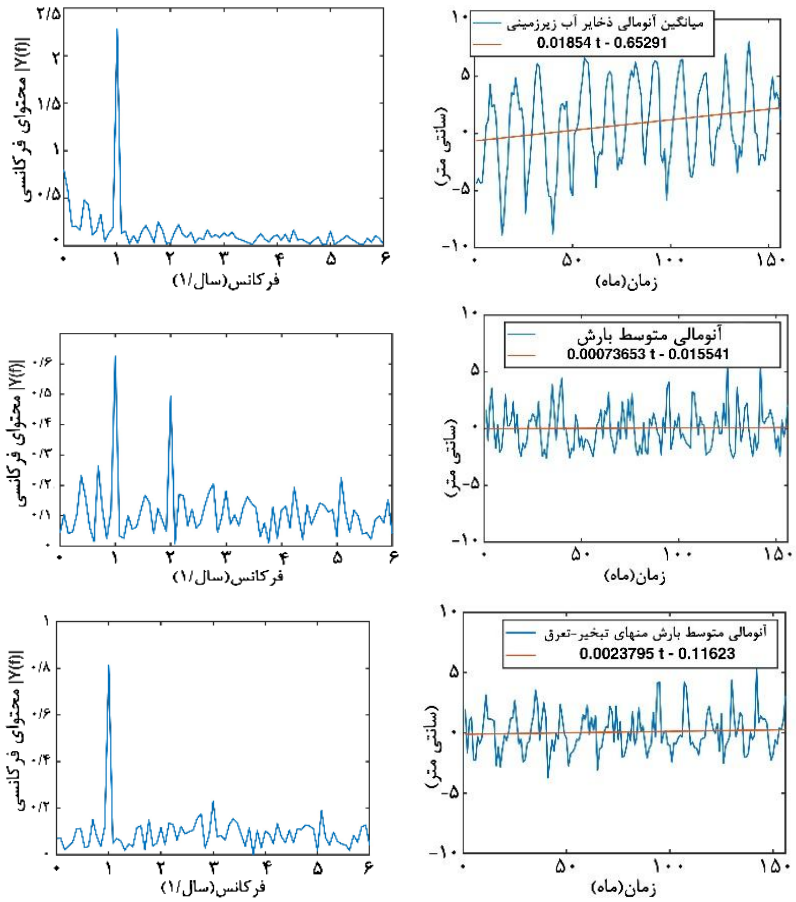
شکل۹: متوسط *GWSA* (سمت چپ) ، متوسط بارش (وسط) و متوسط اختلاف بارش و تبخیر و تعرق (سمت راست)، در استان تهران از دی‌ماه ۱۳۸۳ تا دی‌ماه ۱۳۹۴(رنگ قرمز) و تیرماه ۱۳۸۴ تا تیر ماه ۱۳۹۵ (رنگ آبی)

میانگین مکانی مقادیر ماهیانه پارامترهای *GWSA*، آنومالی بارش و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق در سطح استان تهران از دی‌ماه ۱۳۸۲ تا آذرماه ۱۳۹۵ برای ۱۵۶ ماه محاسبه شده و در شکل(۱۰) (ستون راست)، نمایش داده شده است. محور افقی شماره ماه را نسبت به زمان مرجع یعنی اول ژانویه ۲۰۰۴ (دی‌ماه ۱۳۸۲) نمایش می‌دهد. در ردیف بالا *GWSA*، ردیف میانی آنومالی بارش و در ردیف پایین شکل، آنومالی *P-ET* به تصویر کشیده شده‌اند. همانگونه از شکل پیداست، میانگین کمیت‌های فوق تقریباً هر ۶ ماه افزایش داشته و به اوج خود رسیده و بعد در یک بازه حدوداً ۶ ماهه افت خواهد کرد و تغییرات پریودیک می‌باشد. با محاسبه تبدیل فوریه سری‌های زمانی ستون راست، محتوای فرکانسی کمیت‌های فوق مشخص شده و در ستون چپ شکل(۱۰) ترسیم شده است. در بازه زمانی مطالعه، میانگین *GWSA* در استان تهران یک روند افزایشی را طی کرده و خط نمایش تغییرات کلی[1] آن صعودی با شیب ۰/۰۱۸ می باشد و در شکل(۱۰) (راست)، با رنگ قرمز نشان داده شده است. میانگین آنومالی بارش تقریباً ثابت بوده و شیب نزدیک به صفر دارد. میانگین اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق نیز ۰/۰۰۲ بوده که حاکی از روند تقریباً ثابت با اندکی افزایش است. در ستون سمت چپ شکل‌ها، واضح است که فرکانس اصلی و مهم تغییرات همه کمیت‌های فوق یکبار در سال بوده، یعنی هر ساله یکبار کاهش و یکبار افزایش یکنواخت را به صورت فصلی تجربه می‌کنند؛ اگرچه کمیت آنومالی بارش فرکانس مهم دوبار در سال را نیز تجربه می‌کند؛ اما، همچنان فرکانس غالب این پدیده نیز همان یکبار در سال است. میانگین *GWSA*

[1] *Trend line*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

در استان تهران برای بازه مطالعه ۰/۶۵ *cm*، میانگین آنومالی بارش بسیار ناچیز و نزدیک به صفر و میانگین اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق حدود ۰/۲ *mm* است. علاوه براین، همبستگی کمیت‌های فوق از طریق آنالیز میان-همبستگی قابل ارزیابی است. باتوجه به اینکه تغییرات ذخایر آب زیرزمینی نسبت به تغییرات پدیده‌های هواشناسی نظیر بارش و تبخیر-تعرق دارای اختلاف فاز بوده و با یک تأخیر زمانی رخ می‌دهد، می‌توان از طریق محاسبه میان-همبستگی تأخیرفوق را نیز برآورد نمود. به‌طور کلی، کمیت اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق همبستگی بالایی با *GWSA* داشته و هر دو کمیت دارای فرکانس اصلی یک بار در سال هستند، اما یک تأخیر بین سری‌های زمانی آنها موجود است که مربوط به مدت زمانی است که طول می‌کشد تا آب بارش به آبخوان نفوذ کند. این تأخیر درمورد استان تهران با میان-همبستگی محاسبه شده و ۴ ماه می‌باشد. ضریب همبستگی بین *GWSA* و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق با اعمال این تأخیر ۴ ماهه برابر ۰/۵۵ می‌باشد. اگر آنومالی بارش به صورت مجزا و بدن محاسبه تبخیر-تعرق در نظر گرفته شود تأخیر زمانی دقیقاً ۶ ماه شده و ضریب همبستگی با اعمال این تأخیر ۰/۵۱ می‌گردد.



شکل۱۰: متوسط ماهیانه مقادیر *GWSA*، آنومالی بارش و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق در سطح استان تهران از دیماه ۱۳۸۲ تا آذرماه ۱۳۹۵ (ستون راست)، و محتوای فرکانسی سری زمانی (ستون چپ)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

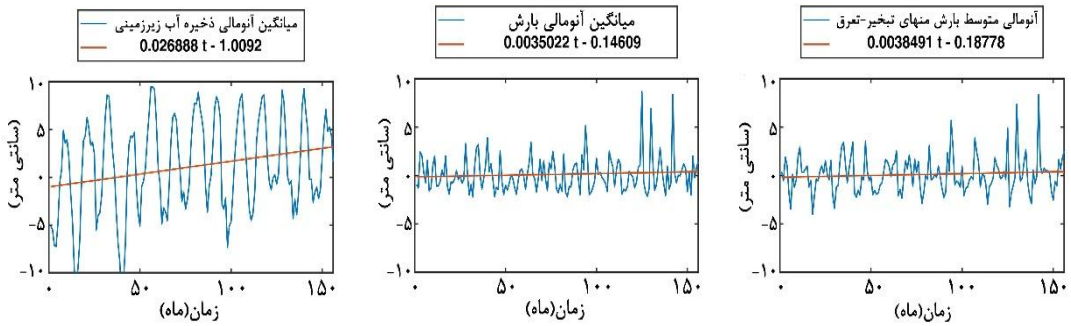
همانگونه قبلاً اشاره شده بخش‌های شرقی و شمالی استان تهران غالباً حاوی مقادیر بیشتر *GWSA* و بخش جنوبی حاوی مقادیر کمتر بوده‌اند. لذا، در شکل(۱۱) تا شکل(۱۳)، سری‌های زمانی ۱۵۶ ماهه متوسط کمیت‌های *GWSA* ، آنومالی بارش، اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق به همراه خط نمایش تغییرات کلی آنها برای نواحی شمیرانات، دماوند و ورامین و ری ، نمایش داده شده است. محدوده جغرافیایی شمیرانات در شمال استان بین طول‌های ۵۱٫۳ تا ۵۱٫۹ و عرض‌های ۳۵٫۷ تا ۳۶٫۱ واقع شده است. محدوده جغرافیایی دماوند در شرق استان بین طول‌های ۵۱٫۸ تا ۵۲٫۶ و عرض‌های ۳۵٫۴ تا ۳۵٫۹ واقع شده و محدوده جغرافیایی ری و ورامین در جنوب استان بین طول‌های ۵۰٫۸ تا ۵۲ و عرض‌های ۳۴٫۹ تا ۳۵٫۶ می‌باشد. همانگونه قبلاً بیان شد، غالباً اکسترمم‌های ذخایر آب زیرزمینی در این مناطق تهران رخ می‌دهند. لذا، سری زمانی متوسط مقادیر *GWSA*، آنومالی بارش و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق مربوط به این نواحی با میانگین‌گیری در طول و عرض‌های بیان شده برای هر ماه حساب شده و به همراه خط نمایش تغییرات کلی که از رگرسیون خطی محاسبه شده است، در شکل‌های ذیل نمایش داده شده است. شکل(۱۱)، مقادیر متوسط *GWSA* در منطقه شمیرانات را نشان داده که در بازه مطالعه دارای روند افزایشی بوده وشیب خط تغییرات کلی آن ۰٫۰۲۶ می‌باشد. میانگین *GWSA* در منطقه شمیرانات در طول مدت مطالعه ۱٫۱ *cm* ، میانگین آنومالی بارش ۰٫۱۲ *cm* و میانگین آنومالی *P-ET*، ۰٫۱۱ *cm* است.

شکل(۱۲)، مقادیر متوسط کمیت‌های فوق را در منطقه دماوند نشان می‌دهد. منطقه دماوند در شرق استان تهران دارای بیشترین میانگین *GWSA* یعنی ۲ *cm* در بازه زمانی مطالعه است. میانگین آنومالی بارش ۰٫۰۳ *cm* و میانگین آنومالی *P-ET*، ۰٫۱۷ *cm* است. در این منطقه نیز خط تغییرات کلی، روند افزایشی *GWSA* را با شیب بیشتری یعنی ۰٫۰۴۵ نمایش می‌دهد. همچنین در شکل(۱۳)، متوسط کمیت‌های فوق‌الذکر در مناطق جنوبی یعنی ورامین و ری نمایش داده شده که میانگین *GWSA* برای این منطقه ۰٫۶ *cm* بدست آمده که در مقایسه با دو ناحیه دیگر کمینه می‌باشد. اگرچه تغییرات کلی *GWSA* در این مناطق نیز صعودی است ولی شیب آن (۰٫۰۱)، در مقایسه با سایر مناطق خیلی کمتر می‌باشد. برای منطقه ری و ورامین میانگین آنومالی بارش تقریباً صفر و میانگین آنومالی *P-ET* تقریباً ۰٫۰۲ *cm* است. از مقایسه مقادیر میانگین کمیتهای فوق می‌توان دریافت که در منطقه دماوند که بیشترین میانگین *GWSA* را داریم، میانگین اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق نیز بیشینه بوده و در منطقه ری و ورامین که کمترین *GWSA* را داریم اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق کمینه است. این نتایج نیز همبستگی بالای بین *GWSA* و آنومالی *P-ET* را تصدیق می‌کنند. ضریب همبستگی بین *GWSA* و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق برای منطقه شمیرانات، ۰٫۵۳ است که به ازای تأخیر زمانی ۴ ماهه بواسطه آنالیز میان-همبستگی محاسبه شده است. همچنین ضریب همبستگی فوق برای مناطق دماوند و ری و ورامین به ترتیب ۰٫۵۶ و ۰٫۵۳ بوده و پارامتر تأخیر زمانی به ترتیب ۳ و ۴ ماه است.

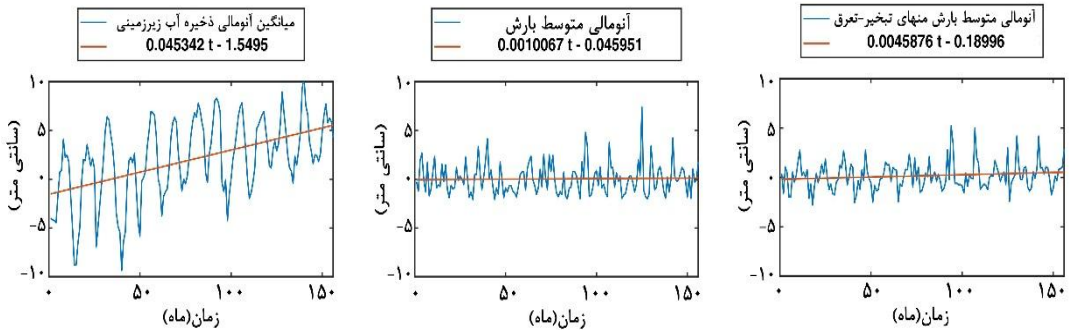
اقلیم مناطق شمالی تهران نیمه‌مرطوب و کوهپایه‌ای با بارش بیشتر نسبت به نواحی جنوبی با اقلیم نیمه‌خشک است که عمدتاً ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر دارند. با توجه به نمودارهای ارائه شده برای مقادیر متوسط *GWSA*، می توان استنباط کرد در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ عمدتاً ذخایر آب زیرزمینی در استان افزایش یافته گرچه در نواحی جنوبی با اقلیم نیمه خشک میزان افزایش ناچیز بوده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

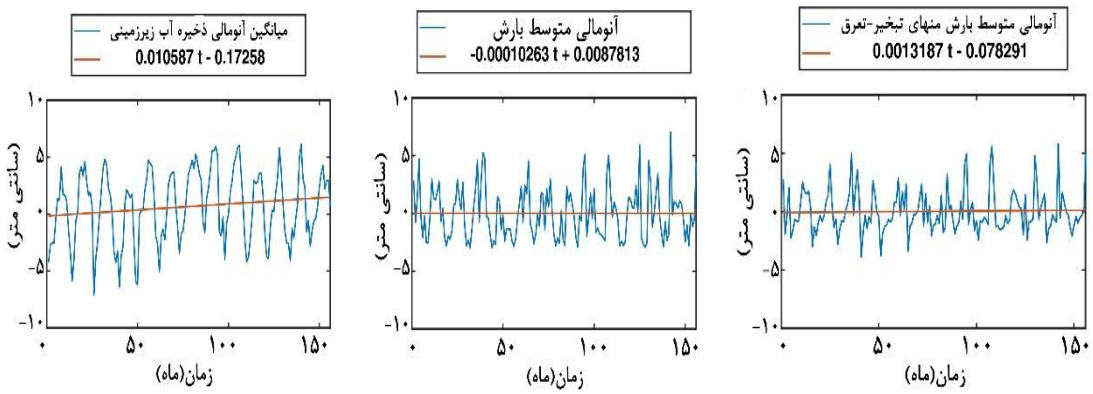
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]



شکل۱۱: سری زمانی ماهیانه میانگین *GWSA* (چپ)، آنومالی بارش (وسط)، اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق (راست) در منطقه شمیرانات برای بازه زمانی ۱۵۶ ماه



شکل۱۲: سری زمانی ماهیانه میانگین *GWSA* (چپ)، آنومالی بارش (وسط)، اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق (راست) در منطقه دماوند برای بازه زمانی ۱۵۶ ماه

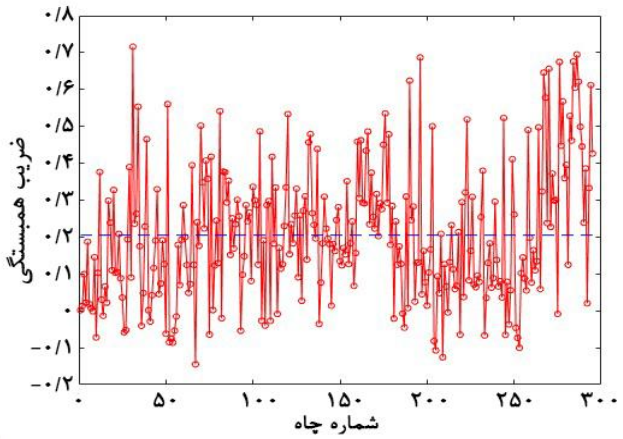


شکل۱۳: سری زمانی ماهیانه میانگین *GWSA* (چپ)، آنومالی بارش (وسط)، اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق (راست) در منطقه ری و ورامین برای بازه زمانی ۱۵۶ ماه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

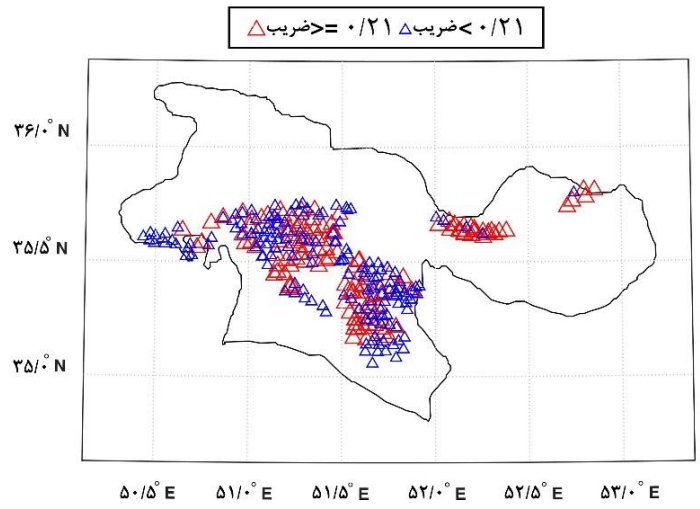
پس از محاسبه پارامتر تأخیر هرچاه با تشکیل سری زمانی *WLA* چاه و سری زمانی *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه، همبستگی این دو پارامتر بدست آمده و در شکل(۱۴)، ضرایب همبستگی را برای چاه‌های استان تهران می‌بینیم. محور افقی شماره چاه را نشان داده و محور عمودی معرف ضریب همبستگی بین دو پارامتر فوق است. میانگین ضرایب همبستگی چاه‌ها ۰٫۲۱ بوده که با خط افقی آبی رنگ در شکل نشان داده شده و بیشترین ضریب همبستگی ۰٫۷۲است. تعداد ۱۳۲ چاه از کل ۲۹۵ چاه دارای ضریب همبستگی بیش از مقدار میانگین ذکر شده هستند، که نقشه توزیع مکانی این چاه‌ها در سطح استان را در شکل(۱۵) می‌بینیم. در شکل(۱۵)، توزیع مکانی چاه‌های با ضریب همبستگی بیشتر از مقدار میانگین ۰٫۲۱، با رنگ قرمز نمایش داده شده و چاههای با ضریب همبستگی کمتر از میانگین فوق با رنگ آبی به تصویر کشیده شده‌اند. میزان همبستگی بین داده‌های سطح آب چاه و ذخایر آب زیرزمینی استخراج شده از مأموریت گریس تا حدی به موقعیت جغرافیایی چاه وابسته است. غالباً، چاه‌های شرق تهران دارای ضریب همبستگی بیش از میانگین ۰٫۲۱ بوده و چاه‌های غرب تهران ضریب همبستگیشان از مقدار میانگین کمتر است. در نواحی جنوبی و مرکزی هر دو کلاس وجود دارد. همچنین در شکل(۱۶)، توزیع مکانی ۱۳۲ چاه با ضریب همبستگی بیشتر از میانگین را می‌بینیم و در این شکل، چاه‌هایی که همبستگی بیشتری با *GWSA* داشته‌اند با دایره‌های با ابعاد بزرگتر و رنگ روشن‌تر نمایش داده شده‌اند. همانگونه که از شکل پیداست، چاه‌های شرق تهران همبستگی بالایی با *GWSA* دارند و جنوبی‌ترین چاه‌های حفر شده دارای همبستگی کمتری هستند. در اینجا دوباره لازم به ذکر است که ویژگی بارز مناطق شرق تهران آن است که اولاً مقادیر *GWSA* در شرق بیشتر از سایر نواحی است. ثانیاً، پارامتر تأخیر زمانی چاه‌ها کمتر بوده و ثالثاً، دارای ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر بوده و توپوگرافی در این مناطق شدید است. نهایتاً، در کنار مجموعه ویژگی‌های فوق بایست اضافه نمود که چاه‌های منطقه شرق تهران بیشترین میزان همبستگی را با *GWSA* داشته است. لذا، در مطالعات هیدرولوژی منطقه تهران بایست وزن مشاهدات چاه‌های شرق تهران را بیشتر لحاظ کرد.



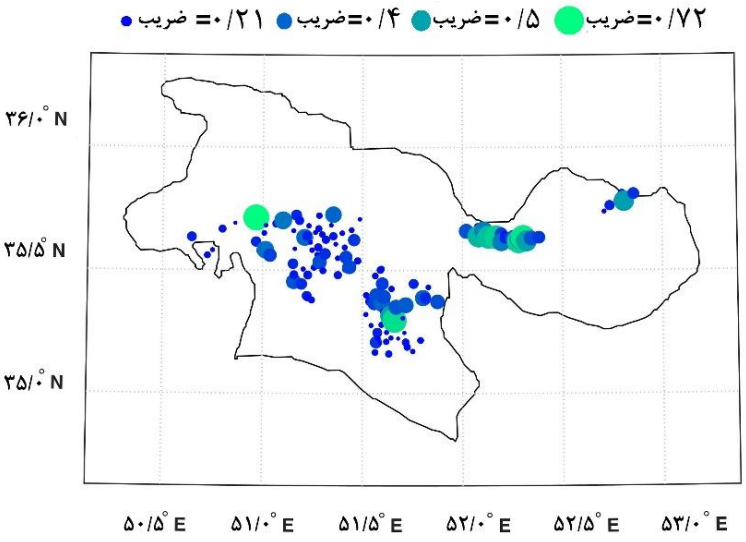
شکل۱۴: ضرایب همبستگی بین *WLA* چاه‌های استان تهران با *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]



شکل۱۵: پراکندگی چاه‌ها با ضریب همبستگی بیش از میانگین و کمتر از میانگین

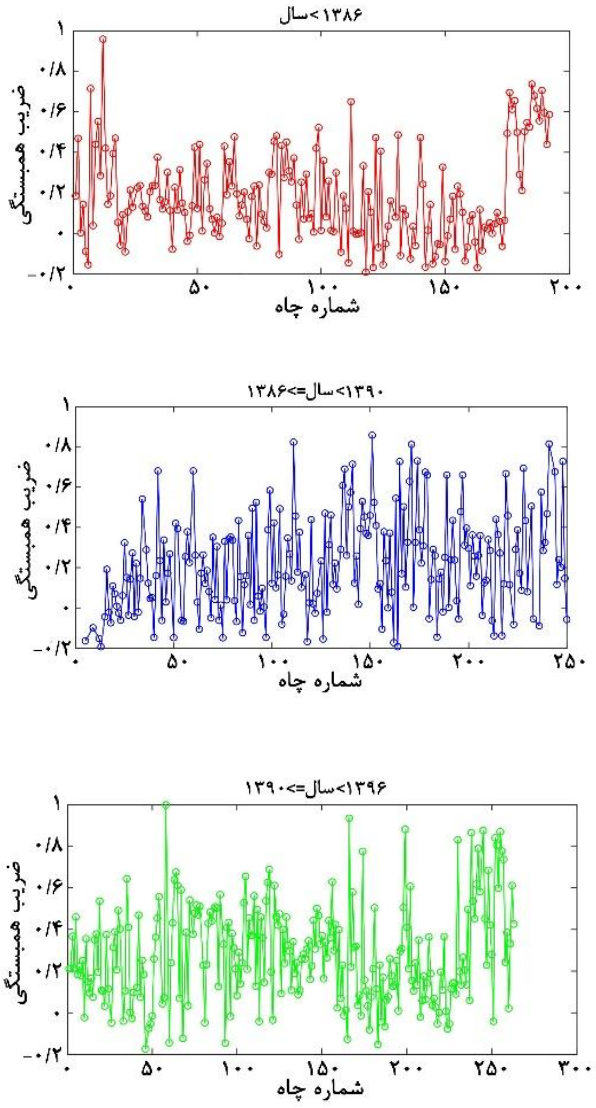


شکل۱۶: میزان همبستگی ۱۳۲ چاه با ضرایب همبستگی بالاتر از میانگین

مشابه شکل(۱۴)، که میزان همبستگی *WLA* چاه‌ها را با *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه در بازه زمانی بلند مدت یعنی ۱۵۶ ماه نشان داده است، در شکل(۱۷)، میزان همبستگی چاه‌ها در بازه‌های زمانی کوتاهتر بررسی شده است. در سطر بالا همبستگی تا قبل از سال ۱۳۸۶، در سطر میانی همبستگی بین سال‌های ۱۳۸۶ تا قبل از سال ۱۳۹۰ و در سطر پایین همبستگی از شروع سال ۱۳۹۰ الی انتهای سال ۱۳۹۵ نمایش داده شده است. میانگین ضرایب همبستگی چاه‌ها قبل از سال ۱۳۸۶ برابر ۰/۱۸ بوده و از میانگین بلند مدت ۱۵۶ ماهه که ۰/۲۱ می‌باشد، کمتر شد. میانگین همبستگی بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ برابر ۰/۲۲ و برای سال‌های ۱۳۹۰ تا انتهای ۱۳۹۵ برابر ۰/۲۸ بوده است که از میانگین بلند مدت ۱۵۶ ماهه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

بیشتر بوده‌اند. نکته قابل توجه آن است که میانگین همبستگی چاه‌ها با *GWSA* پس از سال ۱۳۹۰، به طور قابل توجهی بیشتر شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت مدل‌های ذخایر آب زیرزمینی که در تهران با استفاده از داده‌های ماهواره گریس پس از سال ۱۳۹۰ محاسبه شده‌اند، دارای قابلیت اعتماد بیشتری هستند. لازم به ذکر است در شکل(۱۷)، محور افقی معرف شماره چاه بوده و محور عمودی ضریب همبستگی است. از آنجایی که تعدادی از چاه‌ها داده کافی در برخی بازه‌های زمانی کوتاهتر، ثبت نکرده‌اند، لذا ضریب همبستگی قابل برآورد نبوده و تعداد چاه‌هایی که در بازه‌های کوتاهتر برای آنها ضریب همبستگی محاسبه شده، کمتر شده است.

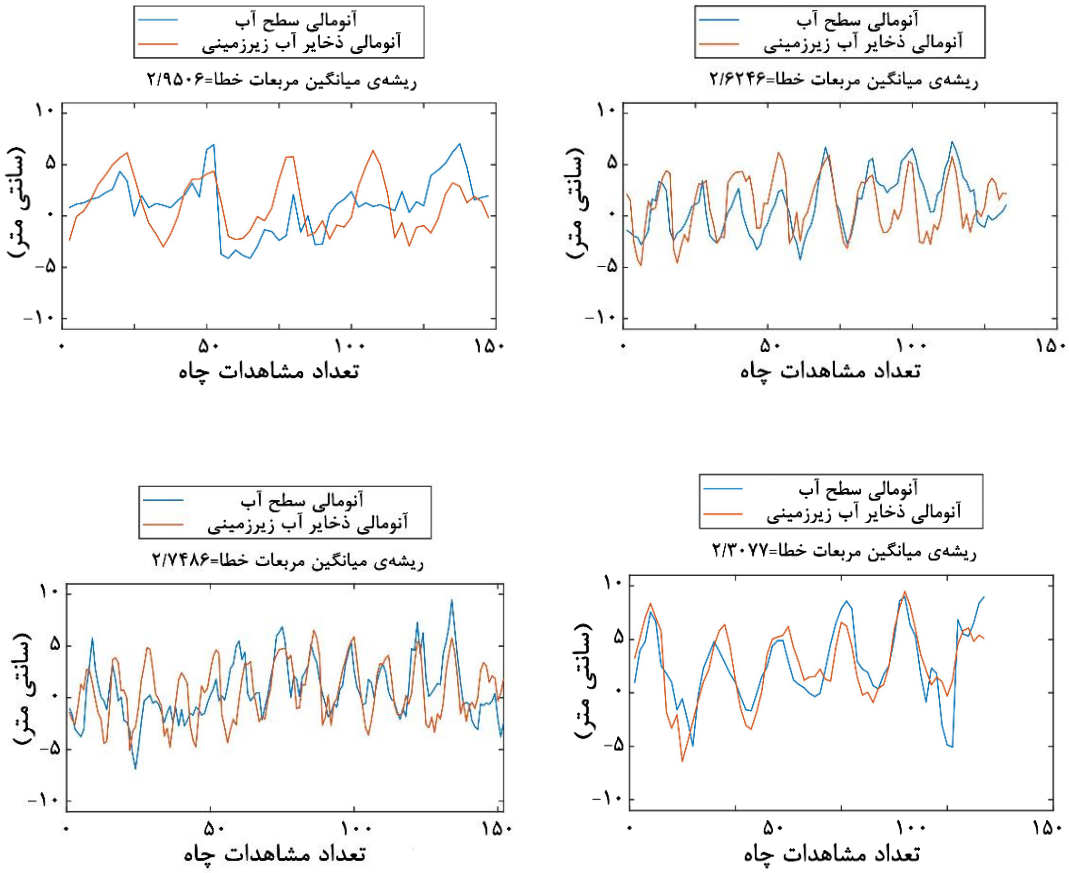


شکل۱۷: ضرایب همبستگی بین *WLA* چاه‌های استان تهران با *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه برای بازه زمانی دی‌ماه ۱۳۸۳ تا اسفند ۱۳۸۵ (سطر بالا)، بازه زمانی فروردین ۱۳۸۶ تا اسفند ۱۳۸۹ (سطر میانی) و بازه زمانی فروردین ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹۵ (سطر پایین)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

با قرار دادن پارامترهای مقیاس و شیفت تخمین زده شده برای هر چاه در رابطه (۴) می توان *WLA* چاه را به *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه مبدل نمود. در شکل)، به عنوان نمونه، برای تعدادی از چاه‌ها (شماره‌های ۲۹، ۱۰۴، ۱۳۳ و ۲۹۴) که در کلاسی با همبستگی بیش از مقدار میانگین قرار داشته‌اند، *WLA* نگاشت شده به همراه *GWSA*، ترسیم شده است. همچنین در بالای شکل‌ها مقادیر ریشه میانگین مربعات *(RMS)* اختلاف بین دو سری زمانی *WLA* نگاشت شده و *GWSA* ، بیان شده است. باتوجه به شکل و مقادیر *RMS* اختلافات، می‌توان گفت تاحد زیادی این مقادیر به هم نزدیک بوده گرچه در مواردی دامنه نوسانات این دو سری زمانی کمی فرق دارد.

می‌توان عوامل این تفاوت را به دو بخش تقسیم نمود اولاً پارامترهای مقیاس و شیفت که منجر به نگاشت *WLA* به فضای *GWSA* می‌شوند، برآورد بوده و خود می‌توانند دارای خطا باشند و ثانیاً خطای درونیابی مقادیر *GWSA* در مکان چاه نیز تأثیرگذار بوده است. *GWSA* درونیابی شده در این تحقیق از روی شبکه نقاط منظم با قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماسکون و مدل *GLDAS* یعنی ۰٫۲۵ درجه، حاصل شده است. بنابراین، در مدل‌هایی از ذخایر آب زیرزمینی که ریزمقیاس سازی با قدرت تفکیک بالاتری انجام می‌شود، خطای درونیابی کمتر شده و مقادیر این دو سری زمانی به هم نزدیکتر خواهند بود.



شکل۱۸: مقایسه مقادیر *WLA* چاهها و *GWSA* نگاشت شده به فضای مشاهدات چاهها

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از داده‌های نوع ماسکون ماهواره گریس، ذخایر کلی آب‌های زمینی استان تهران بر روی نقاط شبکه‌ای با قدرت تفکیک ۰٫۲۵ درجه استخراج شده و با کم‌کردن ذخایر آب‌های غیر زیرزمینی محاسبه شده از مدل *GLDAS* به ذخایر آب‌های زیرزمینی دست یافتیم. نتایج نشان دادند که روند تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ با شیب خیلی کمی افزایشی بوده است و این افزایش در شرق استان بیشتر و در جنوب استان ناچیز بوده است. علاوه براین، تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی در تهران پدیده‌ای پریودیک با فرکانس غالب یکبار در سال است؛ یعنی تغییرات ذخایر آب زیرزمینی به صورت فصلی بوده و در هر سال یکبار ذخایر به اوج خود رسیده و دوباره حالت کاهشی را تجربه خواهند کرد.

بیشترین مقدار ذخایر آب‌های زیرزمینی در نواحی شمیرانات و دماوند قرار دارد. غالباً در فصول گرم مقدار ذخایر آب‌های زیرزمینی بیشتر است. برای بررسی همبستگی میان *WLA* چاه‌ها و *GWSA* بایست کمیت *GWSA* در مکان چاه درونیابی شده و به پارامتر تأخیر زمانی چاه نیز نیازمندیم. غالب چاه‌های استان تهران دارای تأخیر زمانی یک ماه هستند و چاه‌های با تأخیر زمانی بیشتر معمولاً در نواحی مرکزی و جنوب استان قرار دارند.

در منطقه شرق تهران توپوگرافی شدید بوده و پارامتر اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق بیشترین مقدار را داراست. این پارامتر در ارتباط مستقیم با *GWSA* بوده و منجر به افزایش آن در منطقه شرق تهران شده است. همچنین، مقادیر *WLA* چاه‌های شرق تهران دارای ضریب همبستگی بیشتری با *GWSA* نسبت به سایر مناطق استان هستند؛ بنابراین، در مطالعات پایش منابع آب با داده‌های ماهواره گریس مدل‌های منطقه شرق تهران دارای صحت بیشتری می‌باشند همچنین وزن داده‌های سطح آب چاه‌های شرق تهران در مطالعات هیدرولوژی استان بایست بیشتر باشد. همچنین آنالیز همبستگی در بازه زمانی کوتاهتر نشان داد که داده‌های ثبت شده ماهواره گریس پس از سال ۱۳۹۰ منجر به همبستگی بیشتری با چاه‌ها خواهد شد و این موضوع می‌تواند منجر به اعتماد بیشتر به مدل‌هایی شود که با استفاده از مشاهدات ماهواره گریس پس از سال ۱۳۹۰ در استان ارائه شده‌اند. با استفاده از پارامترهای شیفت، مقیاس و تأخیر زمانی می‌توان *WLA* چاه را به *GWSA* در مکان چاه نگاشت نمود. طی این نگاشت، روند تغییرات به‌خوبی بازسازی می‌شود و سری‌های زمانی در مورد چاه‌هایی که *WLA* آنها همبستگی بالایی با *GWSA* درونیابی شده در مکان چاه دارند، به هم نزدیک هستند. لذا، می‌توان از چاه‌هایی که همبستگی بالایی با ذخایر آب زیرزمینی بدست آمده به کمک گریس و مدل‌های هیدرولوژی دارند، برای ریزمقیاس سازی استفاده نمود و *WLA* نگاشت شده آنها به کمک پارامترهای تأخیر، مقیاس و شیفت را به عنوان داده کمکی جهت ریزمقیاس سازی به کار برد.

مراجع

[1] R. Schmidt, F. Flechtner, U. Meyer, K.-H. Neumayer, C. Dahle, R. König and J. Kusche,"Hydrological signals observed by the GRACE satellites", Surveys in Geophysics, Vol. 29, pp. 319-334, 2008.

[2] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins and C. Reigber,"The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results", Geophysical Research Letters, Vol. 31, pp. 9607, 2004.

[3] F. Frappart, F. Papa, A. Güntner, J. Tomasella, J. Pfeffer, G. Ramillien, T. Emilio, J. Schietti, L. Seoane and J. da Silva Carvalho,"The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin", Advances in Water Resources, Vol. 124, pp. 41-52, 2019.

[4] Y. Cao and S. S. Roy,"Spatial patterns of

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

seasonal level trends of groundwater in India during 2002 to 2016", Weather, Vol. 75, pp. 123-128, 2020.

[5] Z. Rzepecka and M. Birylo,"Groundwater storage changes derived from GRACE and GLDAS on smaller river basins—A case study in Poland", Geosciences, Vol. 10, pp. 124, 2020.

[6] J. Zhang, K. Liu and M. Wang,"Seasonal and interannual variations in China's groundwater based on GRACE data and multisource hydrological models", Remote Sensing, Vol. 12, pp. 845, 2020.

[7] J. Sun, L. Hu, X. Cao, D. Liu, X. Liu and K. Sun,"A dynamical downscaling method of groundwater storage changes using GRACE data", Journal of Hydrology: Regional Studies, Vol. 50, pp. 101558, 2023.

[8] F. Fatolazadeh, M. Eshagh and K. Goïta,"New spectro-spatial downscaling approach for terrestrial and groundwater storage variations estimated by GRACE models", Journal of Hydrology, Vol. 615, pp. 128635, 2022.

[9] D. Zhong, S. Wang and J. Li,"Spatiotemporal Downscaling of GRACE Total Water Storage Using Land Surface Model Outputs", Remote Sensing, Vol. 13, pp. 900, 2021.

[10] S. Ali, D. Liu, Q. Fu, M. J. M. Cheema, Q. B. Pham, M. M. Rahaman, T. D. Dang and D. T. Anh,"Improving the resolution of GRACE data for spatio-temporal groundwater storage assessment", Remote Sensing, Vol. 13, pp. 3513, 2021.

[11] H. Sahour, M. Sultan, M. Vazifedan, K. Abdelmohsen, S. Karki, J. A. Yellich, E. Gebremichael, F. Alshehri and T. M. Elbayoumi,"Statistical applications to downscale GRACE-derived terrestrial water storage data and to fill temporal gaps", Remote Sensing, Vol. 12, pp. 533, 2020.

[12] B. D. Vishwakarma, J. Zhang and N. Sneeuw,"Downscaling GRACE total water storage change using partial least squares regression", Scientific Data, Vol. 8, pp. 95, 2021.

[13] H. Save, S. Bettadpur and B. D. Tapley,"High - resolution CSR GRACE RL05 mascons", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 121, pp. 7547-7569, 2016.

[14] S. N. Bhanja, A. Mukherjee, D. Saha, I. Velicogna and J. S. Famiglietti,"Validation of GRACE based groundwater storage anomaly using in-situ groundwater level measurements in India", Journal of Hydrology, Vol. 543, pp. 729-738, 2016.

[15] T. Liesch and M. Ohmer,"Comparison of GRACE data and groundwater levels for the assessment of groundwater depletion in Jordan", Hydrogeology Journal, Vol. 24, pp. 1547, 2016.

[16] G. Strassberg, B. R. Scanlon and M. Rodell,"Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA)", Geophysical Research Letters, Vol. 34, pp. 14402, 2007.

[17] S. N. Nabavi, A. Alizadeh and A. Faridhosseini,"Evaluation of Groundwater Resources using GRACE Satellite Gravimetric Data (Case Study: Khorasan Razavi)", Iranian Journal of Irrigation and Drainage, Vol. 14, pp. 855-866, 2020.

[18] M. Hafezparast,"Monitoring of Groundwater Level Changes Using GRACE and GLDAS Satellites in Kermanshah Province", Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, Vol. 48, pp. 234-257, 2022.

[19] M. Golmohamadi and G. Joodaki,"Statistical downscaling of GRACE gravity satellite-derived groundwater level data", Journal of Geospatial Information Technology, Vol. 8, pp. 83-101, 2021.

[20] V. Amiri, S. Ali and N. Sohrabi,"Estimating the spatio-temporal assessment of GRACE/GRACE-FO derived groundwater storage depletion and

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

validation with in-situ water quality data (Yazd province, central Iran)", Journal of Hydrology, Vol. 620, pp. 129416, 2023.

[21] M. Rodell, P. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich and M. Bosilovich,"The global land data assimilation system", Bulletin of the American Meteorological society, Vol. 85, pp. 381-394, 2004.

[22] H. Beaudoing and M. Rodell, GLDAS Noah land surface model L4 monthly 0.25 x 0.25 degree V2. 1, in Greenbelt, Maryland. 2020.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.12, No.2, Summer 2024

Research Paper

Long-term analysis of the correlation between the changes in the water level of the wells and the changes in the estimated groundwater storage using Grace satellite observations in Tehran

Hani Mahbuby [1*], Yahya Jamour [2]

1- Assistant professor in Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Associate professor in Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Groundwater storage (GWS) of the aquifers is one of the most important sources of the drinking water supply and the required water for agriculture in Iran. The population of Tehran province is more than 9 million and the southern half of Tehran has a semi-arid climate with little rainfall. Besides, in the semi-humid northern part of Tehran and the foothills, the average rainfall is not very significant, so it is very difficult to compensate for the discharged groundwater. Therefore, it is important to closely monitor the changes in GWS of the province. Today, GRACE twin satellites are suitable tools that can help us to estimate and evaluate the monthly changes of GWS with the help of hydrological models. In addition, observations of piezometric wells are also very necessary for such studies. GRACE satellites immediately sense the changes in the gravity of a region due to the changes in the terrestrial water storage (TWS), but in the observations of the wells such changes are received with a delay. In this research, in order to investigate the long_term changes of GWS in Tehran, three types of data with a monthly rate have been used from January 2004 to December 2016. First, TWS changes were obtained using Grace-Mascon data, which were published in the form of grid points with a spatial resolution of 0.25 degrees, and then global land data assimilation system (GLDAS), with similar spatial resolution, was used to estimate the other parameters which were not relevant to groundwater. Finally, GWS changes were calculated by subtracting these two sets of data. Furthermore, monthly well water level observations were used to evaluate the correlation. In order to evaluate the correlation, the time delay between the time series of well water changes and those of GWS ones was obtained by cross-correlation. The highest correlation coefficient of the time series of wells is 0.72 and the average correlation coefficient is 0.21.

Key words : *Groundwater storage, terrestrial water storage, GRACE, GLDAS, cross-correlation.*

Correspondence Address*: Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.*
Tel*: : +98 21 73932411.*
Email : *h_mahbuby@sbu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-08]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.103]