دان رور برنقه بردار

نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال دواز دهم، 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<sup>ا\*</sup>، یحیی جمور<sup>۲</sup>

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

#### چکیدہ

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 فروری 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 مواره گریس به روش ماسکون که بهصورت نقاط شبکهای با قدرت تفکیک مکانی ۲۸/۰ درجه منتشر شدهاند، تغییرات *TWS* استخراج شده و ماهواره گریس به روش ماسکون که بهصورت نقاط شبکهای با قدرت تفکیک مکانی ۲۵/۰ درجه منتشر شدهاند، تغییرات گرانی ژانویه مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آبهای زیرزمینی هستند تخمین زده میشود. درنهایت تغییرات کمانی مشده بازه ماستی مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آبهای زیرزمینی هستند تخمین زده میشود. درنهایت تغییرات SWS استخراج شده و مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آبهای زیرزمینی هستند تخمین زده میشود. درمای و تفکیک مکانی مشابه میباشد، پارامترهایی که مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آبهای زیرزمینی هستند تخمین زده میشود. درمایت تغییرات SWG از کم کردن این دودسته ا مربوط به تغییرات سایر منابع آب به جز آبهای زیرزمینی هستند تخمین زده میشود. درمای قدرت تفکیک مکانی مشاد، پارامترهایی که مراسه می گردد. همچنین از دادههای می می می هدانی که بهصورت ماهیانه ثبت شدهاند نیز برای ارزیابی همیستگی تغییرات به استفاده شده است. جهت انجام آنالیز همبستگی به دست آمد. بیشترین ضریب همبستگی سری زمانی چاهها ۲۰٫۷ و میانگین ضرایب هدستگی ضرایه میاست.

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

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> نویسنده مکاتبه کننده: تهران، حکیمیه، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست. تلفن: ۷۳۹۳۲۴۱۱

سال دوازدهم ● شماره دوم ● تابستان ۱۴۰۳

#### ۱– مقدمه

منابع آب زیرزمینی بزرگترین و مهم ترین منابع آب شيرين هستند و نقش مهمي را در اكوسيستم و فعالیت های بشر ایفا می کنند؛ بنابراین واضح است که پایش تغییرات این منابع یکی از اولویتهای سیاستهای آبی باشد. چاههای مشاهداتی مهمترین و دقیــقتـرین ابـزار مشـاهده تغییـرات سـطح آبهـای 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 ۱ 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 كوتاهمدت اين تغيير ميتواند تغييرات ذخاير آب زميني باشد، تغییرات شتاب ثقل را به تغییرات ذخایر آب زمینی (TWS)<sup>۲</sup> تبدیل می کنند. منظور از ذخایر آب زمینی همه نوع آبی است که میتواند در زمین ذخیره شـود از جملـه آب ذخیـره شـده در سـدها، رودخانـه، 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 بهدست آمده از مأموريت گريس به تغييرات ذخاير آب زيرزميني (GWS) دستیافت. قدرت تفکیک دادههای ماهواره-های گریس حدود ۳ درجه در طول و ۳ درجه در عرض است و این قدرت تفکیک ضعیف مے تواند کاربرد

دادههای سطح ۲ ماهوارههای گریس شامل ضرایب هارمونیکهای کروی هستند که تغییرات شتاب ثقل را به صورت ضخامت آب معادل بیان می کنند. این ضرایب توسط مراكز پردازش GFZ ، <sup>۵</sup>JPL و <sup>۷</sup>CSR به ترتیب تا درجه و مرتبه ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ تولید شدهاند. نـوع دیگـر دادههـای چگـال تـوده^ هسـتند کـه 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 می گردد. این دادهها در سطح ۳، به شکل نقاط منظم شبکهای و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ درجه در اختیار کاربر قرار مـیگیرنـد [۱۳]. اگـر ریـز مقیـاس سـازی بـه روش دینامیکی صورت پذیرد عموماً از مدل های سیستم داده گواری جهانی زمین <sup>۹</sup> GLDAS یا مدل های هیدرولوژی نظیر <sup>۱۰</sup> (WaterGAP(WGHM) L SWAT ۱۱ جهت برآورد پارامترهای مؤثر بر ذخایر آب

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 پیشبینی کنند، قدرت تفکیک بهتری نتیجه شده است 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].

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Downscaling

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> NASA Jet Propulsion Laboratory

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> German Research Centre for Geosciences

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Center for Space Research

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Mascon

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Global land data assimilation system

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> WaterGAP hydrology model

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Soil and water assessment tool

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Terrestrial water storage

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ground water storage

زمینی استفادہ می گردد. اگر تغییرات آب زیرزمینے 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 بهدست آمده از دو منبع مختلف کـم اسـت. نکتـه قابـل توجـه در بررسـی همبستگی ذخایر آب زیرزمینی محاسبه شده با کمک مأموریت گریس و تغییرات سطح آب چادها آن است که عوامل مهمی نظیر بارش یا تخلیه آبخوان که بهسرعت منجر به تغییر TWS مشاهده شده توسط ماهوارهها می شوند، با همان سرعت روی مشاهدات ثبت شده توسط چاهها اثر نمی گذارند. مدتی طول خواهد کشید تا آب ناشی از بارش منجر به تغییر مشاهدات سطح آب چاهها شود یا بالعکس تخلیه آبخوان بتواند روی مشاهدات چاہ اثر بگذارد. این مدت بستہ بہ هندسه أبخوانها، عمق چاه و شرايط محيطي مي تواند برای هر چاه متفاوت باشد که ازاین پس به این اختلاف زمانی پارامتر تأخیر زمانی چاہ 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)، دادهاند. مکاران (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 ۲۰۰۰ چاه در بازه زمانی 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 ۸۸/۰ بین GWS محاسبه شده از گریس و مشاهده شده در چاههای آمریکا از ابتدای

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] . همچنیین، امیری و همکاران (۲۰۲۳)، مطالعهای را در استان یزد برای سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ انجام داده و به ضریب همبستگی ۵۸/۰ 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 ماهواره های گریس و مشاهده شده از چاه ها 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 ۲۸٫۰ درجه در طول و عرض استفاده شده و همچنین جهت استخراج ذخایر آبی غیرمربوط به آبخوان از مدل GLDAS با قدرت تفکیک ۲۵٫۰ بهره بردیم. از سوی دیگر داده های چاه های 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-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Precipitation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Aquifer depletion

سال دوازدهم • شماره دوم • تابستان ۱۴۰۳

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 می پردازیم. سپس مراحل تولید GWS بررسی شده و نهایتاً به آنالیز مکانی-زمانی چگونگی همبستگی GWS با داده های 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. یارامتر TWS از داده های سطح ۳ که به صورت مقادیر ارائه شده روی نقاط شبکه ای 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 می شود. قدرت تفکیک مکانی این شبکه نقاط ۰٬۲۵ درجه در طول و عرض بوده و قدرت تفکیک زمانی ماهیانه دارد. ایک مرجع زمانی این منبع داده روز اول ژانویه سال ۲۰۰۲ می باشد. مقادیر TWS روى نقاط شبكهاى توسط موسسه تحقيقات فضايي دانشگاه تگزاس (CSR) 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 برف رطوبت در خاک SMS<sup>7</sup>، آب ذخیره شده به شکل برف <sup>T</sup>SWE<sup>7</sup> و آب ذخیره شده در قالب پوشش گیاهی *CWS<sup>5</sup>* میباشد، استفاده شده است [۲۱]. ذخایر آبی (رائه شده در این مدل با قدرت تفکیک مکانی ماهانه در ارئه شده در این مدل با قدرت تفکیک مکانی ماهانه در ازئه شده در این مدل با قدرت تفکیک مکانی ماهانه در ازئباط بین تغییرات GWS با پارامترهای هواشناسی نظیر بارش و تبخیر-تعرق<sup>6</sup> که تأثیر بسزایی در تغییرات TWS یک منطقه دارند، از اطلاعات هواشناسی موجود در مدل GLDAS با قدرت تفکیک مشابه نیز استفاده شده است. ایک مرجع زمانی این منبع داده اول ژانویه ۲۰۰۰ است. مقادیر ذخایر آب روی این نقاط شبکهای توسط اداره ملی هوافضای ایالات متحده (NASA)<sup>9</sup> منتشر شدهاند [۲۲].

منبع داده دیگری که در این مطالعه استفاده شده، سطح آب ثبت شده <sup>۷</sup> (WL) 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 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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Center for Space Research

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Soil moisture storage

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Snow water equivalent

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Canopy water storage

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Evapotranspiration

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> National Aeronautics and Space Administration

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Water level

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب.. هانی محبوبی و یحیی جمور

> ایران دریافت شده است. نقاط قرمز شکل(۱)، پراکندگی مکانی دادههای مربـوط بـه ذخـایر آب را کـه از مـاهوارههـای گـریس و مـدل

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 به دست آمده از مدل GLDAS میباشد. این عدم همزمانی اولاً به تفاوت در مرجع زمانی دادهها برمی گردد؛ یعنی مرجع زمانی دادههای TWS مأموریت گریس اول ژانویه ۲۰۰۲ بوده، در حالیکه مرجع زمانی دادههای SMS، SMS و SWS 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 ایکهای GLDAS به صورت 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 میانگین گیری 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 کم کردن مجموع آن از آنومالی ذخایر آب زیرزمینی (GWSA) دست مییابیم: آنومالی ذخایر آب زیرزمینی (GWSA) دست مییابیم: رابطه(۱)

GWSA = TWSA - (SMSA + SWEA + CWSA)

#### سال دواردهم 🛛 شماره دوم 🗨 تابستان ۱۴۰۳

دادههای مشاهداتی سطح آب هر چاه نیز بایست در همان خط زمانی گریس میانگین گیری شده و با کم کردن 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<sup>۱</sup>، پارامترهای تبدیل GWSA و WLA محاسبه می گردند و به همبستگی بین آنها دست می یابیم. در اینجا بایست توجه داشت که اولاً، جنس دادههای چاه با دادههای ماهواره گریس یکسان نیست یعنی GWSA و MLA 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 معنی که غالباً پاسخ چاه به تغییرات آبهای زیرزمینی معنی که غالباً پاسخ چاه به تغییرات آبهای زیرزمینی ممانگونه محاسبه گردد. ثالثاً، مکان GWSA محاسبه همانگونه که در شکل(۱) معلوم است، مکان چاهها همانگونه که در شکل(۱) معلوم است. برای بررسی همانتگی 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<sup>۲</sup> میباشد. در مرحله بعد با تأخیرهای متفاوتی که به مشاهدات MLA اعمال می گردد، همبستگی دو سری زمانی GWSA و MLA بررسی میزان همبستگی می گردد را به عنوان پارامتر تأخیر چاه میزان همبستگی می گردد را به عنوان پارامتر تأخیر چاه در نظر می گیریم. علاوهبراین، مقادیر درونیابی شده GWSA از لحاظ جنس با کمیت MLA 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 می گردد. در این درونیابی وزن مقادیر نقاط شبکهای با فاصله آنها از مکان چاه ارتباط معکوس دارد. اگر مطابق شکل(۲)، از مکان چاه ارتباط معکوس دارد. اگر مطابق شکل(۲)، چاه  $(A, \phi)$  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.



Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cross-correlation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bilinear interpolation

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب.. هانی محبوبی و یحیی جمور

$$\mathbf{f}(\lambda,\phi) = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\phi_2 - \phi_1)} \begin{bmatrix} \lambda_2 - \lambda & \lambda - \lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}(Q_{11}) & \mathbf{f}(Q_{12}) \\ \mathbf{f}(Q_{21}) & \mathbf{f}(Q_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_2 - \phi \\ \phi - \phi_1 \end{bmatrix}$$
(Y)

۳- بهازای تأخیرات مختلف  $\{0,1,2,3,4\}$ سری  $t_0 = \{0,1,2,3,4\}$  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 می گردد:

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

در محاسبه میان-همبستگی، میزان مشابهت دو سری زمانی حقیقی به صورت تابعی از جابهجایی یکی نسبت به دیگری محاسبه می گردد. 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 می گیریم. (b) می عنوان پارامتر مقیاس (a)، شیفت (b) و تأخیر زمانی  $(\hat{t}_0)$ ، می توان GWA مشاهده شده در چاه تازی را به GWSA درونیابی شده در مکان چاه که در مرحله قبل محاسبه کردهایم و با  $(\hat{\lambda}, \phi)$  نمایش دادهایم، بر اساس رابطه ( $\hat{t}$ )، تبدیل نمود:

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

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:

$$a = \frac{\left\| GWSA(\lambda, \phi, t) \right\|_{2}}{\left\| WLA(\lambda, \phi, t + \hat{t}_{0}) \right\|_{2}}, \qquad (\Delta)$$

علاوه براین، پارامتر شیف نیز بر اساس رابط ۵(۶)، از تفاضل میانگین سری زمانی GWSA درونیابی شده در مکان چاه و WLA مقیاس شده بدست میآید: رابطه(۶)

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

در رابطه(۶)، *T* معرف تعداد ایک های ثبت داده در ۱۳ سال است که با توجه به ماهیانه بودن داده ها *T* برابر ۱۵۶ ایک است. لازم به ذکر است پس از برآورد پارامتر تأخیر زمانی می توان آنالیز همبستگی را انجام داد. *GWSA* درحقیقت، همبستگی بین دو سری زمانی *GWSA* داد. درونیابی شده در مکان چاه و *MLA* 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 به دستآمده 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، پیش پردازش دادهها قبل از محاسبه همبستگی و فرایند تخمین تأخیر زمانی چاهها به وسیله میان-همبستگی نمایش داده شده است.

#### سال دوازدهم ● شماره دوم ● تابستان ۲۴۰۳



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 بنقش را شامل

شده و نهایتاً ۲۳ درصد چاهها که ۶۸ چاه را شامل می گردد، 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 می وند و چاههای شرق تهران دارای تأخیر زمانی کمتری هستند.









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

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 (اختلاف بارش از متوسط محاسبه شده در جازه زمانی 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. 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

سال دوازدهم • شماره دوم • تابستان ۱۴۰۳



شكل9: مدل ارتفاعي رقومي منطقه

شکل(۲)، GWSA محاسبه شده از رابطه(۱) برای دی ماه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴ را نمایش میدهد. از این شکل استنباط می شود که اولا، بیشتر اوقات مقدار GWSA در شرق و شمال نسبت به سایر نواحی بیشتر بوده و ثانیا، GWSA مربوط به دی ماه در فواصل زمانی یکساله، هم افزایش داشته و هم کاهش داشته است. نکته مهم دیگر آن است که در دی ماه 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.



شکل ۷: نمایش GWSA بر حسب سانتیمتر از دیماه ۱۳۸۳ تا دیماه ۱۳۹۴ در فواصل زمانی یکسال

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب.. هانی محبوبی و یحیی جمور

سالیانه را نشان میدهد. همچنین شایان ذکر است در شکل)، که مربوط به دی ماه است و معمولاً بارش دی ماه در تهران مناسب می باشد، 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 می باشد. 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



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 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 دی ماه 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 *T*-*T* در دی ماه غالباً خیلی بیشتر از تیرماه است و صرفاً در سالهای ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ که بارش خیلی کم بوده، مقادیر کمیت فوق در دی ماه و تیرماه به هم نزدیک است، اگرچه همچنان این کمیت در دی ماه بیشتر می باشد. بنابراین، باتوجه به اینکه *T*-*T* مهمترین کمیت جوی تأثیر گذار بر ذخایر آب زمینی است، می توان نتیجه گرفت که پرشدن آبخوانها پس از

#### سال دوازدهم • شماره دوم • تابستان ۱۴۰۳

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 cm ۶ بوده، مشاهده میگردد. همچنین بیشترین کاهش سالیانه را برای دیماه ۱۳۸۴ تا دیماه ۱۳۸۵ با اندازه تقریباً cm ۵ مشاهده میکنیم. فرآیندهای جوی موثر، با یک تأخیر زمانی صورت پذیرفته و در فصلهای خشک ذخایر آبخوانها بیشتر از فصلهای پربارش می گردند. 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



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 تـا آذرمـاه ۱۳۹۵ برای ۱۵۶ ماه محاسبه شده و در شکل(۱۰) (ستون راست)، نمایش داده شده است. محور افقے، شماره ماه را نسبت به زمان مرجع يعنى اول ژانويه ۲۰۰۴ (دیماه ۱۳۸۲) نمایش می دهد. در ردیف بالا GWSA، ردیف میانی آنومالی بارش و در ردیف پایین شـکل، آنومـالی P-ET بـه تصویر کشـیده شـدهانـد. همانگونه از شکل پیداست، میانگین کمیتهای فوق تقريباً هر ۶ ماه افزايش داشته و به اوج خود رسيده و بعد در یک بازه حدوداً ۶ ماهه افت خواهد کرد و تغییرات پریودیک می باشد. با محاسبه تبدیل فوریه سری های 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<sup>۱</sup> آن صعودی با شیب ۱۸ ۲۰۰ 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 ۱۰٬۰۰۲ 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 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 GWSA پدیده نیز همان یکبار در سال است. میانگین

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Trend line

در استان تهران برای بازه مطالعه m۵ ۶۵٬۰۰ میانگین آنومالی بارش بسیار ناچیز و نزدیک به صفر و میانگین اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق حدود از طریق آنالیز میان-همبستگی قابل ارزیابی است. باتوجه به اینکه تغییرات ذخایر آب زیرزمینی نسبت به تعییرات 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

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب. هانی محبوبی و یحیی جمور

اصلی یک بار در سال هستند، اما یک تأخیر بین سریهای زمانی آنها موجود است که مربوط به مدت زمانی است که طول می کشد تا آب بارش به آبخوان نفوذ کند. این تأخیر درمورد استان تهران با میان-همبستگی محاسبه شده و ۴ ماه میباشد. ضریب ممبستگی بین *GWSA* و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق با اعمال این تأخیر ۴ ماهه برابر محاسبه تبخیر-تعرق در نظر گرفته شود تأخیر زمانی دقیقاً ۶ ماه شده و ضریب همبستگی با اعمال این تأخیر ۵/۱۰ می گردد.



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)

سال دوازدهم ● شماره دوم ● تابستان ۱۴۰۳

همانگونه قبلاً اشاره شده بخـشهـای شـرقی و شـمالی استان تهران غالباً حاوى مقادير بيشتر GWSA و بخش جنوبی حاوی مقادیر کمتر بودهاند. لذا، در شکل(۱۱) تا شـکل(۱۳)، سـریهـای زمـانی ۱۵۶ ماهـه متوسـط كميتهاى GWSA ، أنومالي بارش، اختلاف أنومالي بارش و أنومالي تبخير-تعرق به همراه خط نمايش تغییرات کلی آنها برای نواحی شمیرانات، دماوند و ورامین و ری ، نمایش داده شده است. محدوده جغرافیایی شمیرانات در شمال استان بین طول های ۵۱٫۳ تا ۵۱٫۹ و عـرضهای ۳۵٫۷ تـا ۳۶٫۱ واقـع شـده است. محدوده جغرافیایی دماوند در شرق استان بین طول های ۵۱٬۸ تا ۵۲٬۶ و عرض های 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 مــیباشــد. همانگونــه قــبلاً بیـان شــد، غالبــاً اکسترمههای 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 میانگین گیری 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 می باشد. میانگین GWSA در منطقه شمیرانات در طول مدت مطالعه ۱٫۱۲ *cm* ، میانگین آنومالی بارش ۱۲ ۲۰ و میانگین آنومالی *P-ET ، در ۱۱ cm* است.

> شکل(۱۲)، مقادیر متوسط کمیتهای فوق را در منطقه دماوند نشان می دهد. منطقه دماوند در شرق استان تهران دارای بیشترین میانگین GWSA یعنی ۲ در m بازه زمانی مطالعه است. میانگین آنومالی بارش cm ۰٫۰۳ و میانگین آنومالی ۲-۲ cm ۰٫۱۷ است. در این منطقه نیز خط تغییرات کلی، روند افزایشی GWSA را

با شیب بیشتری یعنی ۰٬۰۴۵ نمایش میده. همچنین در شکل(۱۳)، متوسط کمیتهای فوقال ذکر در مناطق جنوبی یعنی ورامین و ری نمایش داده شده که میانگین GWSA برای این منطقه r o f cm بدست آمده که در مقایسه با دو ناحیه دیگر کمینه می باشد. اگرچه تغییرات کلی GWSA در این مناطق نیز صعودی است ولی شیب آن (۱ ۰٬۰)، در مقایسه با سایر مناطق خیلے کمتے مےباشد. برای منطقہ ری و ورامین میانگین آنومالی بارش تقریباً صفر و میانگین آنومالی P-ET تقريباً ۲ cm تقريباً P-ET است. از مقایسه مقادیر میانگین کمیتهای فوق می توان 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 کـه کمتـرین GWSA را داریـم اختلاف أنومالي بارش و أنومالي تبخير-تعرق كمينه است. این نتایج نیز همبستگی بالای بین GWSA و آنومالی P-ET را تصدیق می کنند. ضریب همبستگی بین GWSA و اختلاف آنومالی بارش و آنومالی تبخیر-تعرق برای منطقه شمیرانات، ۰٬۵۳ است که به ازای تأخير زماني ۴ ماهه بواسطه آناليز ميان-همبستگي محاسبه شده است. همچنین ضریب همبستگی فوق برای مناطق دماوند و ری و ورامین به ترتیب 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 2025-07-07



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

سال دوازدهم ● شماره دوم ● تابستان ۱۴۰۳

همبستگی بیش از میانگین ۲۱ بوده و چاههای غرب تهران ضریب همبستگیشان از مقدار میانگین کمتر است. در نواحی جنوبی و مرکزی هـر دو کـلاس وجـود دارد. همچنین در شکل(۱۶)، توزیع مکانی ۱۳۲ چاه با ضریب همبستگی بیشتر از میانگین را میبینیم و در این شکل، چاہھایی کے ھیسےتگی بیشےتری بے *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 جنوبی ترین چاه های 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 شـرق بیشـتر از سـایر نـواحی اسـت. ثانیـاً، پارامتر تأخیر زمانی چاهها کمتـر بـوده و ثالثـاً، 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.

یس 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 می بینیم. 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 ۷۲٬۷۲ست. تعـداد ۱۳۲ چـاه از کـل ۲۹۵ چـاه دارای ضـریب همبستگی بیش از مقدار میانگین ذکر شده هستند، که نقشه توزیع مکانی ایـن چـاههـا در سـطح اسـتان را در شـکل(۱۵) مـیبنـیم. در شـکل(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



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



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



شکل ۱۶: میزان همبستگی ۱۳۲ چاه با ضرایب همبستگی بالاتر از میانگین

همبستگی از شروع سال ۱۳۹۰ الی انتهای سال ۱۳۹۵ نمایش داده شده است. میانگین ضرایب همبستگی چاهها قبل از سال ۱۳۸۶ برابر ۱۸٫۸ بوده و از میانگین بلند مدت ۱۵۶ ماهه که ۱۲٫۱ میباشد، کمتر شد. میانگین همبستگی بین سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ برابر ۱۳۹۲ و برای سالهای ۱۳۹۰ تا انتهای ۱۳۹۵ برابر ۱۸٫۲ بوده است که از میانگین بلند مدت ۱۵۶ ماهه 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

#### سال دوازدهم • شماره دوم • تابستان ۲٬۴۰۳

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، لـذا ضریب همبستگی قابل برآورد نبوده و تعداد چاههایی که در بازههای کوتاهتر برای آنها ضریب همبستگی محاسبه شده، کمتر شده است.







شکل ۱۷: 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)

با قرار دادن پارامترهای مقیاس و شیفت تخمین زده شده برای هر چاه در رابطه (۴) می توان AWL 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، MLA نگاشت شده به همراه GWSA، ترسیم شده است. همچنین در بالای شکلها مقادیر ریشه میانگین نگاشت شده و GWSA، بیان شده است. باتوجه به مربعات (RMS) اختلاف بین دو سری زمانی MLA نگل و مقادیر RMS اختلافات، می توان گفت تاحد زیادی این مقادیر به هم نزدیک بوده گرچه در مواردی دامنه نوسانات این دو سری زمانی کمی فرق دارد.

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب.. هانی محبوبی و یحیی جمور

می توان عوامل این تفاوت را به دو بخش تقسیم نمود اولاً پارامترهای مقیاس و شیفت که منجر به نگاشت WLA به فضای GWSA می شوند، بر آورد بوده و خود می توانند دارای خطا باشند و ثانیاً خطای درونیابی مقادیر GWSA در مکان چاه نیز تأثیر گذار بوده است. GWSA درونیابی شده در این تحقیق از روی شبکه نقاط منظم با قدرت تفکیک مکانی دادههای ماسکون و مدل GLDAS یعنی ۲۵/۰ درجه، حاصل شده است. بنابراین، در مدل هایی از ذخایر آب زیرزمینی که ریزمقیاس سازی با قدرت تفکیک بالاتری انجام می شود، خطای درونیابی کمتر شده و مقادیر این دو مری زمانی به هم نزدیکتر خواهند بود.



شکل ۱۸: مقایسه مقادیر WLA چاهها و GWSA نگاشت شده به فضای مشاهدات چاهها

سال دوازدهم • شماره دوم • تابستان ۱۴۰۳

### ۴– نتیجهگیری

در این پژوهش، با استفاده از داده های نوع ماسکون ماهواره گریس، ذخایر کلی آبهای زمینی استان تهران بر روی نقاط شبکهای با قدرت تفکیک 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 واین افزایش بوده است 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

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 بیشـترین **مراجع** 

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

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 می باشند همچنین وزن داده های سطح آب چاههای شرق تهران در مطالعات هیدرولوژی استان بایست بیشتر باشد. همچنین آنالیز همبسـتگی در بـازه زمـانی کوتاهتر نشان داد که دادههای ثبت شده ماهواره گریس پس از سال ۱۳۹۰ منجر به همبستگی بیشتری با چاهها خواهد شد و این موضوع می تواند 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 می توان WLA چاه را به GWSA در مکان چاہ نگاشت نمود. طے این نگاشت، روند تغییرات بهخوبی بازسازی می شود و سری های زمانی در مورد چاههایی که WLA آنها همبستگی بالایی با GWSA درونیابی شده در مکان چاه دارند، به هم نزدیک هستند. لذا، می توان 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 یارامترهای تأخیر، مقیاس و شیفت را به عنوان داده کمکی جهت ریزمقیاس سازی به کار برد.

- [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

تحلیـل بلنـد مـدت همبسـتگی بـین تغییـرات سـطح آب..

هانی محبوبی و یحیی جمور

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

سال دوازدهم ● شماره دوم ● تابمستان ۱۴۰۳

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.



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