

مدل سازی عوامل اقلیمی مؤثر بر افت سطح آب‌های زیرزمینی با رویکرد تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت مشهد)

الهام کدخدا^۱، غلامعباس فلاح قاله‌ری^{۲*}، محمد باعقیده^۳ و سید علیرضا فرید حسینی^۴

چکیده

هدف در این پژوهش، ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت مشهد است. بدین منظور از آمار ماهانه بارندگی ۳۴ ایستگاه همدیدی، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی منطقه، دبی ماهانه ۱۳ ایستگاه هیدرومتری و سطح آب زیرزمینی ۶۰ حلقه چاه پیزومتری، استفاده شده است. برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی آینده از داده‌های مدل HadCM3 استفاده شده است. داده‌های دما و بارش منطقه توسط مدل LARS-WG5.5 برای دو دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سه سناریوی انتشار گاز گلخانه‌ای A1B، A2 و B1 ریزمقیاس شدند. برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) استفاده شده است. ارزیابی تغییرات بارش دشت مشهد در دهه‌های آینده، حاکی از کاهش بارش در فصل سرد و افزایش آن در فصل گرم است. بررسی‌های دمایی نیز حاکی از افزایش حداقل یک‌درجه‌ای دما نسبت به دوره پایه است. مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی دشت مشهد با پارامترهای اقلیمی نشان داد مدل GWR از توانایی خوبی برای برآورد افت سطح آب‌های زیرزمینی برخوردار است. نتایج به‌دست آمده تحت هر سه رویکرد تغییر اقلیم، بیان‌کننده افت سطح آب کلیه چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در دوره‌های آینده است. بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی مربوط به رویکرد A1B در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ بود و رویکردهای A2 و B1 در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هیدرومتری، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل HadCM3، مدل LARS-WG، مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی.

ارجاع: کدخدا، ا.، فلاح قاله‌ری، غ.، باعقیده، م. و فرید حسینی، س.، ع. ۱۳۹۸. مدل‌سازی عوامل اقلیمی مؤثر بر افت سطح آب‌های زیرزمینی با رویکرد تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت مشهد). مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۲۷-۳۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری.
۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری.
۳- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: g.fallah@hsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۸

مقدمه

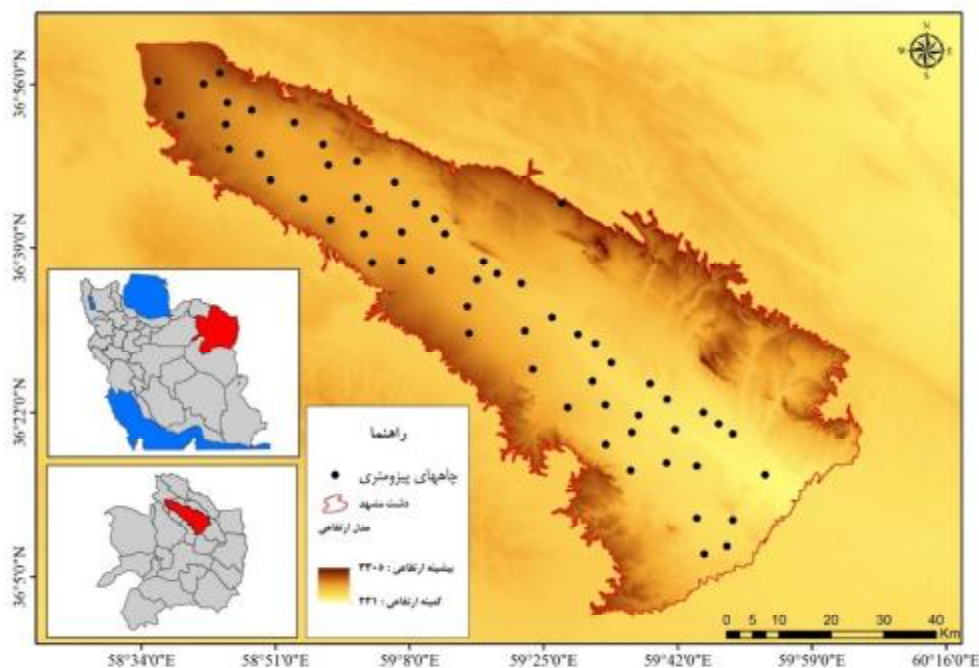
کردند. نتایج آن‌ها حاکی از کاهش تدریجی سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم است. کورتولیوس و همکاران (۲۰۱۳) تغییر منابع آب جزیره کرت یونان را بررسی کردند. آنها در این پژوهش از داده‌های ریزمقیاس شده دما و بارش مدل‌های آماری GCM و دینامیکی RCM برای سه رویکرد انتشاری A1B، A2 و B1 برای دوره آماری ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ استفاده کردند. نتایج آنان حاکی از افزایش سیل‌های منطقه‌ای و کاهش کلی رواناب است. ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۲) آثار تغییر اقلیم را بر رواناب حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی مطالعه کردند. نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در منطقه بوده است. بابائیان و همکاران (۱۳۹۲) به اثرهای تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرو اقلیمی بخشی از حوضه آبریز قره‌قوم در زیر حوضه‌های دو رودخانه مهم درگز به نام‌های درونگر و قوزقانچای پرداختند. نتایج آنان حاکی از کاهش دبی در منطقه بوده است. در مطالعات محیطی اغلب با مشاهداتی سروکار داریم که مستقل از یکدیگر نیستند و وابستگی آن‌ها با یکدیگر ناشی از موقعیت و مکان قرار گرفتن مشاهدات در فضای مورد مطالعه است. این مشاهدات، داده‌های فضایی نامیده می‌شوند. به‌دلیل وجود همبستگی فضایی بین این داده‌ها، روش‌های معمول آماری نمی‌تواند روشی مناسب برای واکاوی چنین داده‌هایی باشد (ریپلی، ۲۰۰۵)؛ از این‌رو لازم است به گونه‌ای، ساختار همبستگی داده‌ها در تحلیل آن‌ها لحاظ شود (کندال، ۱۹۹۸). بدین‌منظور می‌توان از آمار فضایی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب، برای تحلیل این داده‌ها استفاده کرد. هدف از انجام این پژوهش نیز ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر منابع تأمین آب دشت مشهد با استفاده از آمار فضایی است.

مواد و روش‌ها

دشت مشهد تقریباً در مرکز استان خراسان‌رضوی و در محدوده‌ای به طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۶۰ درجه ۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲ دقیقه واقع شده است. این محدوده با کشیدگی شمال غرب- جنوب شرق در حد فاصل ارتفاعات بینالود در جنوب غرب و غرب و ارتفاعات کپه داغ در شرق و شمال شرق قرار گرفته است (شکل ۱).

تغییر آب و هوا منجر به نوسان سطح آب زیرزمینی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بعضی از چاه‌ها خشک شده و بعضی از آن‌ها به‌دلیل از دست دادن ارتفاع آب در دسترس، بهره‌برداری خود را از دست داده‌اند. در حالی‌که پدیده تغییر اقلیم از طریق تغییر متغیرهای اقلیمی شامل دما، بارش و تبخیر- ترقق به طور مستقیم بر منابع آب سطحی اثر می‌گذارد، در بسیاری از مناطق ایران به‌دلیل افت سطح آب مشکلاتی همچون خشک شدن چاه‌های آب، کاهش دبی رودخانه‌ها، کاهش کیفیت آب، نشست زمین و تداخل سفره‌های آب شور و شیرین به وجود آمده است (مردانه و همکاران، ۱۳۹۱). پدیده تغییر اقلیم و معضلات مرتبط با آن در مناطقی مانند خراسان رضوی به صورت یک چالش جدی و مهم بروز کرده است؛ به‌گونه‌ای که ۳۴ دشت از ۳۷ دشت آن ممنوعه اعلام شده است (شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی، ۱۳۹۳). دشت مشهد نیز به‌دلیل شرایط آب و هوایی خشک و سرد و این‌که عمده منبع تأمین‌کننده آب شهر مشهد از طریق سفره‌های آب زیرزمینی و چاه‌ها هستند، منابع آب زیرزمینی آن در کنار منابع آب سطحی حائز اهمیت هستند و تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی و تغییرات دما و بارندگی تأثیرات قابل‌توجهی را در منطقه به‌جای می‌گذارد. وقوع خشک‌سالی‌های متعدد خطری جدی برای منابع آب شهر مشهد محسوب می‌شود. در بسیاری از مطالعات بیلان آب، وجود داده‌های مشاهداتی بارندگی و توزیع مکانی و زمانی آن در مناطق وسیع اهمیت زیادی دارد. ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش که به طور مداوم بارش را پایش کنند، اغلب مواقع در دسترس نیستند. به ویژه در مناطق کوهستانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری پراکنده است و با توجه به پیچیدگی توپوگرافی این‌گونه مناطق، تعامل تگاتنگ این مؤلفه با شرایط جوی بر پیچیدگی برآورد بارش می‌افزاید (باری، ۱۹۹۲؛ هوفیگر و همکاران، ۲۰۰۰؛ استورمن و وانر، ۲۰۰۱ و سوتیلو و همکاران، ۲۰۰۳). با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات زیادی در زمینه پیامدهای تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در نقاط مختلف جهان و ایران انجام شده است که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

کائوچین و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی، بارش را برای بیست سال آینده شبیه‌سازی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان خراسان رضوی

مشهد، از شاخص سطح ایستابی استاندارد ($SWTI$) (نادری و همکاران، ۱۳۹۲) استفاده شده است. این شاخص بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$SWTI = \frac{h_{m,y} - \bar{h}_{m,d}}{S_{m,d}} \quad (1)$$

در این معادله، $SWTI$ شاخص سطح ایستابی استاندارد، $h_{m,y}$ ارتفاع سطح آب در ماه m و سال y ، $\bar{h}_{m,d}$ و $S_{m,d}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار ارتفاع سطح آب در ماه m در طول یک دوره d ساله است. برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی به منظور دورنمای اقلیمی دشت از داده‌های سه ایستگاه همدید مشهد، گلکان و قوچان استفاده شد. برای ریزمقیاس کردن داده‌های مورد نیاز مدل گردش عمومی جو HadCM3 در دو دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سه رویکرد A1B، A2 و B1 از مدل LARS-WG بهره گرفته شد و مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی تولید شدند. مدل گردش عمومی جو HadCM3 مدل جفت شده جوی-اقیانوسی است که توسط مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیمی هادلی در بریتانیا طراحی شده است (مرکز هادلی، ۲۰۰۶). پس از تهیه داده‌های مورد نیاز در دو دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و

آمار چاه‌های پیزومتری پژوهش حاضر شامل شصت چاه اندازه‌گیری شده در محدوده دشت مشهد در دوره آماری مشترک سی ساله (۱۳۶۳ تا ۱۳۹۳ هجری شمسی) بوده است. همچنین برای تغییرات ماهانه بارندگی در ۳۴ ایستگاه همدید، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی منطقه (۱۳۴۲-۱۳۹۲ هجری شمسی)، دبی ماهانه سیزده ایستگاه هیدرومتری (در دوره ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱ هجری شمسی) استفاده شده است. نرمال بودن داده‌های اقلیمی با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنف بررسی و نرمال بودن داده‌ها مورد تأیید قرار گرفت. برای مدل‌سازی دورنمای آب‌های زیر زمینی دشت مشهد از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. مدل رگرسیون چند متغیره نوع بسط یافته‌ای از مدل رگرسیون خطی دو متغیره است که در آن سعی می‌شود بر اساس چندین متغیر مستقل، پیش‌بینی یا برآورد متغیر وابسته انجام شود (عساکره، ۱۳۹۰). در پژوهش حاضر از روش اینتر یا جبری^۱ استفاده شده است. در این روش کلیه معیارها و متغیرهای جمع‌آوری شده وارد مدل می‌شوند و یک مدل بر اساس کلیه متغیرهای مورد توجه محاسبه می‌شود. به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت

2- Standardized Water Table Index

1- Enter

باشند، باید از پهنای باند تطبیقی استفاده کرد. روش تعیین پهنای باند با سه روش کلی ارزیابی شد که عبارت‌اند از: تابع تعیین‌شده توسط کاربر، به حداقل رساندن تابع اعتباری متقاطع و معیار اطلاعات آکائیک (AICc). برازشی که به طور گسترده از سوی پژوهشگران استفاده می‌شود، معیار اطلاعات آکائیک (AICc) است (چارلتون و همکاران، ۲۰۰۹). برای ماتریس وزنی نیز ضمن مقایسه تابع‌های گاوسی^۶، Bisquare ثابت و تابع Bisquare انطباقی از تابع وزن برابر^۷ استفاده شده است (برای جزئیات بیشتر به برنسدون^۸ و همکاران، ۱۹۹۸؛ بیواند و بارنستد، ۲۰۰۵ مراجعه شود).

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^Q \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

نتایج و بحث

در جدول ۱ مقادیر R^2 و R^2 تعدیل‌شده و معیار اطلاعات آکائیک (AICc) نوسان آب زیرزمینی با روش‌های رگرسیون کلاسیک (OLS) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مورد هر دو پارامتر مورد مطالعه، میزان R^2 و R^2 تعدیل‌شده مدل GWR نسبت به مدل OLS بیشتر و معیار اطلاعات آکائیک (AICc) مدل GWR نسبت به مدل OLS کمتر است که این امر نشان‌دهنده برتری مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) نسبت به مدل OLS در برآورد متغیر وابسته (نوسان آب‌های زیرزمینی) با استفاده از متغیرهای مستقل (دما، بارش و تبخیر و تعرق) است. در این پژوهش با استفاده نتایج روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) که در جدول ۲ ارائه شده است، اقدام به برازش ماتریس‌های وزنی روش (GWR) شده است؛ زیرا مدل اولیه رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) بدون وزن است و تنها مقدار خام مدل‌سازی شده را با متغیرهای مستقل ارائه می‌دهد. به منظور واسنجی بهترین ماتریس وزنی از دو آزمون همبستگی R و RHO استفاده شده است. ماتریس‌های وزنی مورد استفاده در پژوهش حاضر عبارت‌اند از: Bisquare Adaptive و Fixed. Gaussian و Equal weights. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است روش گاوسی با مقادیر R و RHO،

۲۰۴۵-۲۰۶۵ با سه رویکرد A1B، A2 و B1 دقت عملیات ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین^۱ (R^2)، میانگین خطای مطلق^۲ (MAE)، میانگین انحراف خطا^۳ (MBE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) بررسی شد (برای جزئیات نحوه محاسبه آماره‌های خطا به فلاح قاهره و شاکری (۱۳۹۴) مراجعه شود). در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی با متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تبخیر-تعرق از روش‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی^۴ (GWR) و حداقل مربعات معمولی^۵ (OLS) یا حداقل مربعات خطی استفاده شده است. دو روش از روش‌های پذیرفته جهانی هستند که برای تخمین ارتباط بین یک متغیر وابسته و مجموعه‌ای از یک یا چند متغیر مستقل استفاده می‌شوند. رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی را می‌توان به صورت معادله (۲) نوشت (یمانی و همکاران، ۱۳۹۶، چارلتون و همکاران، ۲۰۰۹). در معادله (۲)، (u_i, v_i) مختصات i امین نقطه را در فضا نشان می‌دهد که در آن $i=1,2,\dots,L$ که L و Q به ترتیب تعداد نمونه‌ها و ضرایب رگرسیونی را نشان می‌دهند. y_i متغیرهای وابسته در مکان i را نشان می‌دهد. x_{ik} ارزش متغیر توضیحی kام در موقعیت i است. $\beta_k(u_i, v_i)$ ضرایب رگرسیونی محلی برای متغیر توضیحی kام در مکان iام است و $\beta_0(u_i, v_i)$ پارامتر رهگیری در موقعیت i می‌باشد و ε جزء خطاست (یمانی و همکاران، ۱۳۹۶). مدل GWR به جای گسترش پارامترهای معمولی به شناسایی و برآورد یک مدل می‌پردازد (برای جزئیات بیشتر به منیس، ۲۰۰۶؛ فاترگیتم و همکاران، ۲۰۰۱ مراجعه نمایید). به‌طور کلی مشاهدات مجاور یکدیگر اثر بیشتر و از سوی دیگر تخمین به هنجارتری روی یکدیگر خواهند داشت (منیس، ۲۰۰۶). به منظور تعیین وزن جغرافیایی یک عارضه در مدل GWR، نیاز به تعیین محاسبه هسته و پهنای باند مدل خواهد بود. به‌طور کلی اگر مشاهدات اندازه‌گیری شده یک عارضه به‌طور منظم در فضا توزیع شده باشند، پهنای باند ثابت می‌تواند انتخابی بهینه برای کالیبره کرده مدل باشد. حال اگر مشاهدات اندازه‌گیری شده به صورت خوشه‌ای و منظم در فضا توزیع نشده

1- Coefficient of Determination

2- Mean Absolute Error

3- Mean Bias Error

4- Geographically Weighted Regression

5- Ordinary least squares

6- Gaussian

7- Equal weights

8- Brunsdon

فرونشست ۸۵ کیلومتر و عرض آن حدود ۸ کیلومتر است (حسینی، ۱۳۸۸).

شکل ۳ مقدار مدل‌سازی شده نوسان سالانه آب‌های زیرزمینی دشت مشهد را با استفاده از پارامترهای مستقل اقلیمی دما، بارش و تبخیر و تعرق با استفاده از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نشان می‌دهد. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی با پارامترهای اقلیمی به خوبی توانسته است مناطقی با بیشترین نوسان را مشخص کند؛ زیرا محدوده بین مشهد تا چناران و شهرهای صنعتی در محور غرب شهر مشهد در این شکل، محدوده دارای بیشترین نوسان سالانه معرفی شده‌اند. تغییرات آب و هوایی و به تبع آن پدیده گرمایش جهانی عوامل اصلی فشار بر توسعه پایدار هستند و می‌توانند مانع تحقق توسعه شوند یا حتی منافع توسعه را معکوس کنند.

خطوط هم نوسان مشاهده شده سطح آب‌های زیرزمینی دشت مشهد در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل بیشترین نوسان کاهشی سالانه متعلق به بخش جنوبی دشت است. این مقدار حتی در برخی از نقاط شهری دشت مشهد به ۲/۲ متر نیز رسیده است و در محدوده بین مشهد تا چناران سالانه ۱/۲ متر، ۱/۶ متر و ۱ متر نیز نوسان داشته است. تنها مورد نوسان افزایشی مربوط به منتهی‌الیه جنوب غرب دشت می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان داده که این مقدار افزایشی مربوط به سد طرق است.

به ترتیب ۰/۸۲۴ و ۰/۸۳۴ بهترین روش وزنی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی شناخته شده است؛ به همین دلیل از این روش برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد. توزیع ناموزون زمانی و مکانی منابع آب و تغییرات پدید آمده در آن‌ها ناشی از استفاده نادرست، منشأ بحران‌های آبی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد منابع آب دشت مشهد صرفاً ۱۲ درصد از منابع آب تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر استان خراسان رضوی را شامل می‌شود. حال آنکه بیش از ۷۰ درصد از صنایع و بیش از ۶۰ درصد از جمعیت استان در این منطقه ساکن شده است (حسینی، ۱۳۸۸). این عدم توازن در توزیع مکانی منابع آب متناسب با فعالیت‌های انسانی، سبب شده است که برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی بیش از ظرفیت تجدیدپذیری آن باشد. توسعه ناپایدار کشاورزی حدود ۷۸ درصد از منابع برداشت‌شده از دشت مشهد را در شرایط فعلی به خود اختصاص می‌دهد (مطالعات برنامه آمایش سرزمین استان خراسان رضوی، ۱۳۸۸). شکل ۲ نوسان سالانه مشاهده شده آب‌های زیرزمینی دشت مشهد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است بیش‌ترین نوسان سالانه آب‌های زیرزمینی متعلق به بخش جنوبی دشت است. همین نوسان زیاد آب باعث فرونشست زمین و کم شدن ضخامت تعادل آبخوان و افت ممتد سطح آب در بخش جنوبی دشت مشهد شده است. مقدار نشست در حدود ۲۴ تا ۲۶ سانتی‌متر گزارش شده است که این مقدار بیشترین مقدار فرونشست در کشور است. طول این

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های OLS و GWR برای مدل‌سازی نوسان آب‌های زیرزمینی

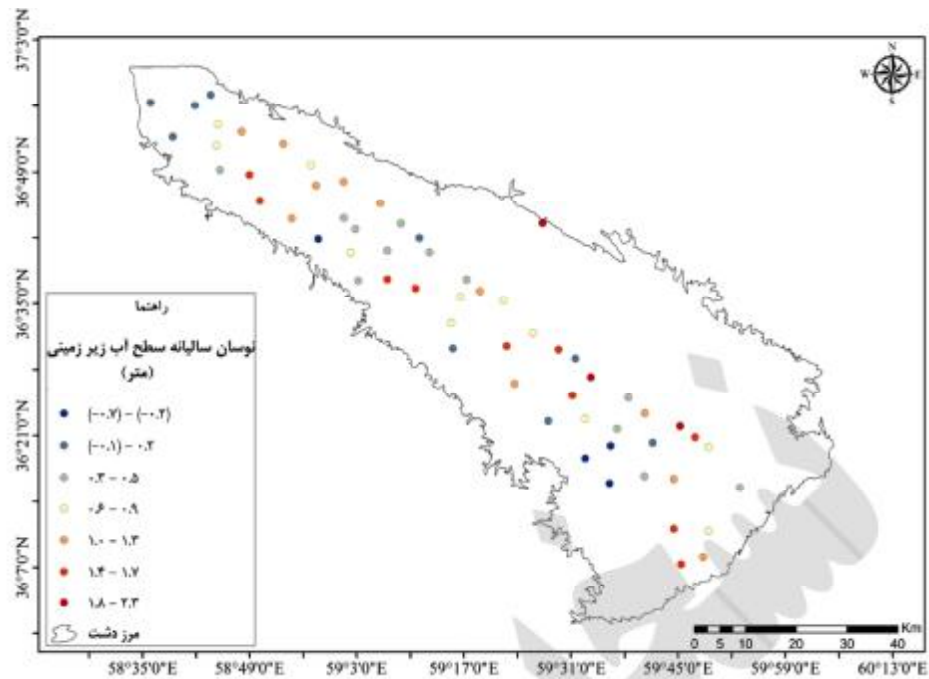
GWR		OLS		AICc GWR	AICc OLS
R ²	R ² تعدیل شده	R ²	R ² تعدیل شده		
۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۲۹۶۴	۰/۲۸۱۵	۱۱۳/۸۵۵۷۴۳	۱۳۰/۸۲۲۷۴

جدول ۲- نتایج روش رگرسیونی مورد استفاده (GWR) در برآورد منطقه‌ای آب‌های زیرزمینی

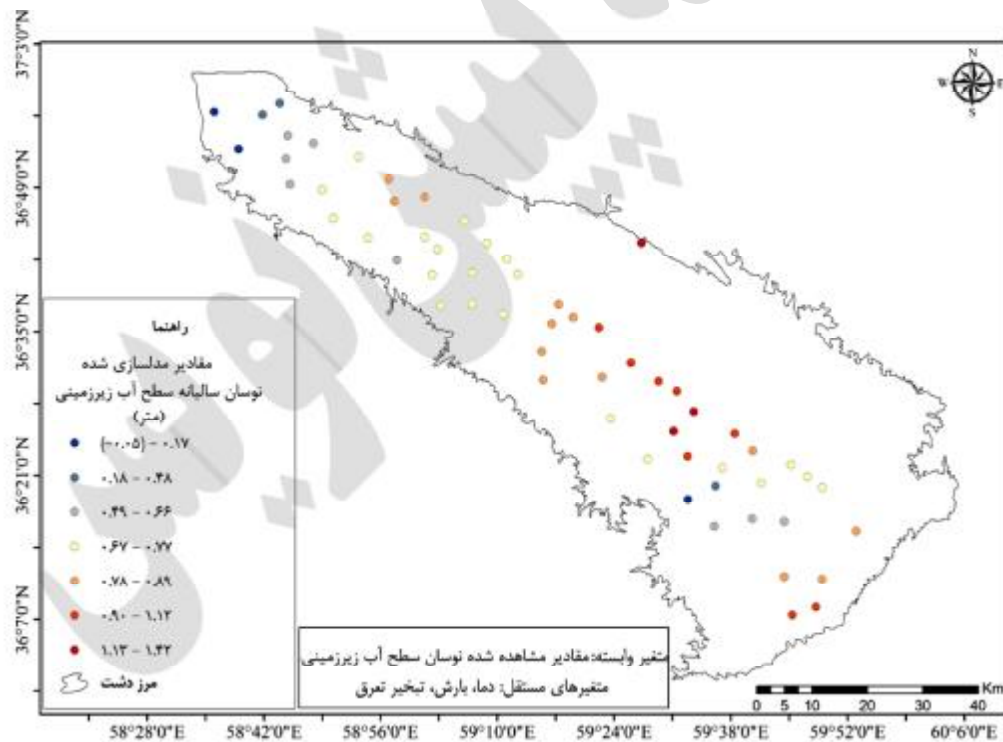
توان مؤثر	سیگما	R ²	R ² تعدیل شده	AICc
۱۰/۰۴	۰/۵۷۵۳۹	۰/۶۳	۰/۴۴	۱۱۳/۸۵۵۷۴۳

جدول ۳- ماتریس‌های وزنی مورد ارزیابی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی دشت مشهد

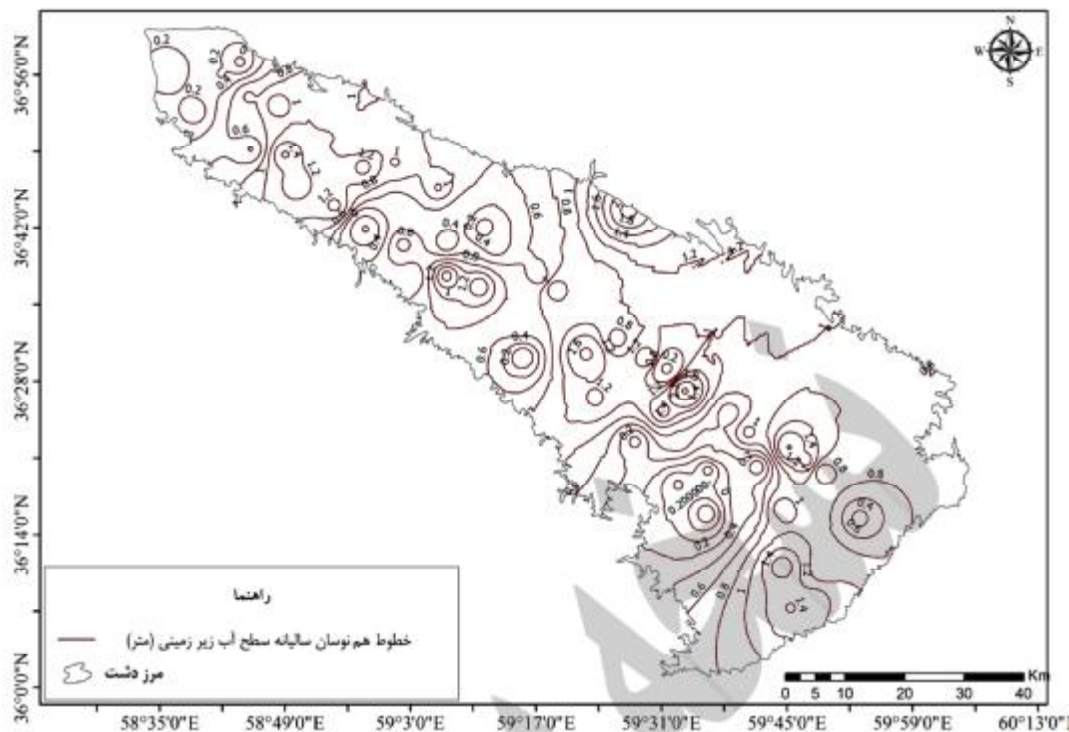
Gaussian		Equal weights		Bisquare Fixed		Bisquare Adaptive	
RHO	R	RHO	R	RHO	R	RHO	R
۰/۸۳۴	۰/۸۲۴	۰/۱۹۸	۰/۲۸۳	-۰/۰۲۷	۰/۰۲۲	۰/۶۰۴	۰/۶۱۹



شکل ۲- نوسان سالانه مشاهده شده آب های زیرزمینی دشت مشهد



شکل ۳- نوسان سالانه مدل سازی شده آب های زیرزمینی دشت مشهد



شکل ۴- خطوط هم‌نوسان سالانه آب‌های زیرزمینی دشت مشهد

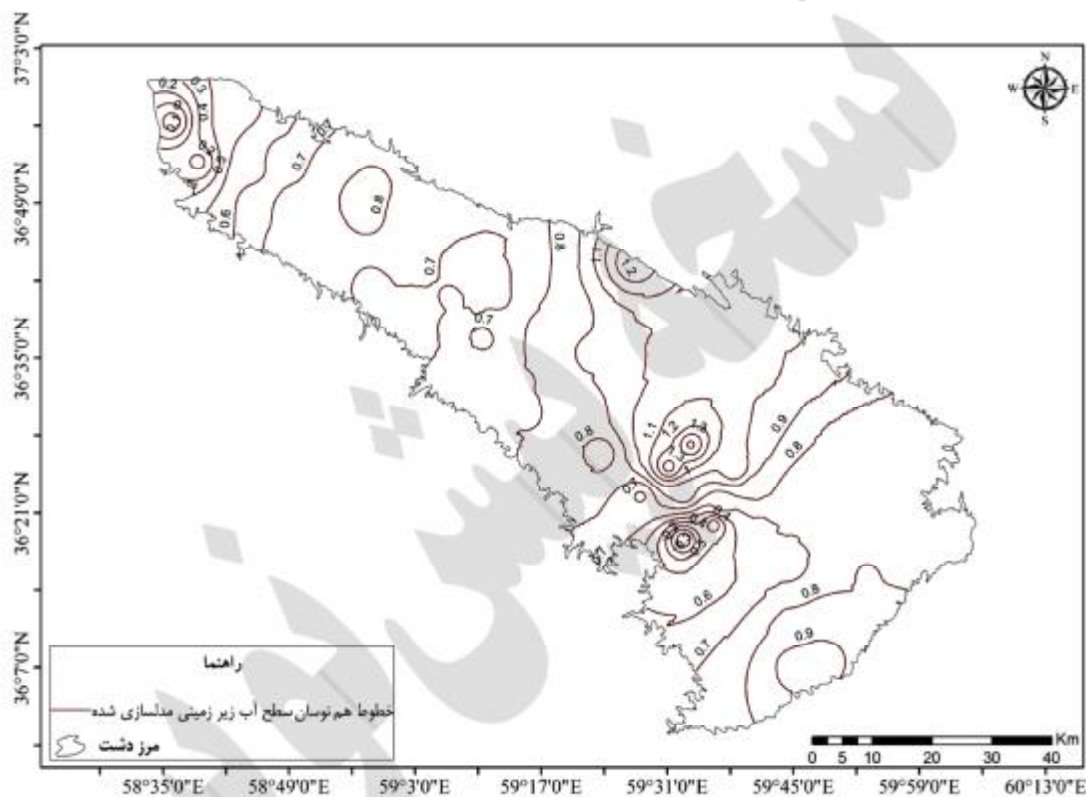
۴ نشان داده شده است. مقدار ضریب تعیین در همه موارد از میزان قابل توجهی برخوردار بوده و همچنین مقدار شاخص‌های خطاسنجی نیز نسبتاً پایین است که حاکی از انطباق قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG با مقادیر مشاهده شده دوره پایه است. به دلیل محدودیت تعداد صفحات مقاله، تنها به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بارش ایستگاه مشهد در دهه‌های آینده بسنده می‌شود. شکل ۶ تابع چگالی بارش شبیه‌سازی شده را برای ایستگاه مشهد نشان می‌دهد. نکته مهمی که در شبیه‌سازی‌های مربوط به ایستگاه مشهد دیده می‌شود، کاهش میانگین بارش سالانه در رویکردهای A1B و B1 در دوره‌های آینده است. بیشترین کاهش مربوط به دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ خواهد بود. بر اساس رویکرد A2 میزان بارش در آینده تفاوت چندانی با دوره پایه نخواهد داشت. نکته قابل توجه دیگر، کاهش واریانس بارش سالانه در رویکرد A2 است؛ به عبارت دیگر ناهنجاری‌های بارش در دوره‌های آینده بر اساس این رویکرد در حول و حوش میانگین خود دارای نوسان کمتری در مقایسه با دوره مشاهداتی خواهد بود. در شکل ۶ خط توپر سیاه‌رنگ تابع چگالی بارش در دوره مشاهداتی

شکل ۵ خطوط هم‌نوسان مدل‌سازی شده سطح آب زیرزمینی دشت مشهد، با استفاده مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نشان داده شده است. این شکل تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را با استفاده از پارامترهای مستقل بارش، دما، تبخیر و تعرق نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۴ و ۵ نشان می‌دهد که خطوط هم‌نوسان آب‌های زیرزمینی مدل‌سازی شده با لحاظ کردن پارامترهای اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهده شده، کاهش حداقل ۰/۲ متری و حداکثر ۰/۷ متری داشته است. در دشت مشهد مجموع مصرف سالانه آب طبق آمارهای رسمی و گزارش شده سال ۱۳۸۸ هجری شمسی رقمی در حدود ۱۳۸۹ میلیون مترمکعب تخمین زده شده است که ۴۵۲ میلیون مترمکعب آن معادل ۳۲/۵ درصد از آب‌های سطحی (محلی و انتقالی) و چشمه‌ها و ۸۲۰/۳ میلیون مترمکعب معادل ۵۹ درصد از چاه‌ها و مابقی از قنوات تأمین می‌شود (مطالعات برنامه آمایش سرزمین استان خراسان رضوی، ۱۳۸۸)؛ از این رو میزان قابل توجهی از مصارف آب از منابع تجدیدناپذیر آب زیرزمینی تأمین می‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی داده‌های بارش و دمای مدل HadCM3 تحت سه رویکرد A1B، A2 و B1 در دوره پایه در جدول

شرایط تغییر اقلیم آینده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ سطح آب نسبت به دوره مشاهداتی افت حداقل یک متری را در پی خواهد داشت. در دوره زمانی ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ به دلیل افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق، افت سطح آب‌های زیرزمینی قابل توجه‌تر است؛ به گونه‌ای که در این دوره سطح آب به طور متوسط بین ۲/۵ تا ۳ متر نسبت سال آخر مطالعه حاضر دچار افت خواهد شد (شکل ۸).

است و سایر خطوط توابع چگالی بارش دوره‌ها و رویکردهای مختلف انتشار را نشان می‌دهند. برای مقایسه بهتر، هر رویکرد در دوره مختلف در مقایسه با دوره مشاهداتی به صورت جداگانه ارائه شده‌اند. از آنجا که تابع چگالی واحد که تابعی از مقدار میانگین و واریانس است (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۳)؛ لذا با کاهش واریانس، ارتفاع منحنی (چگالی) در دوره‌های آینده افزایش یافته است. شکل ۷ وضعیت سطح آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن

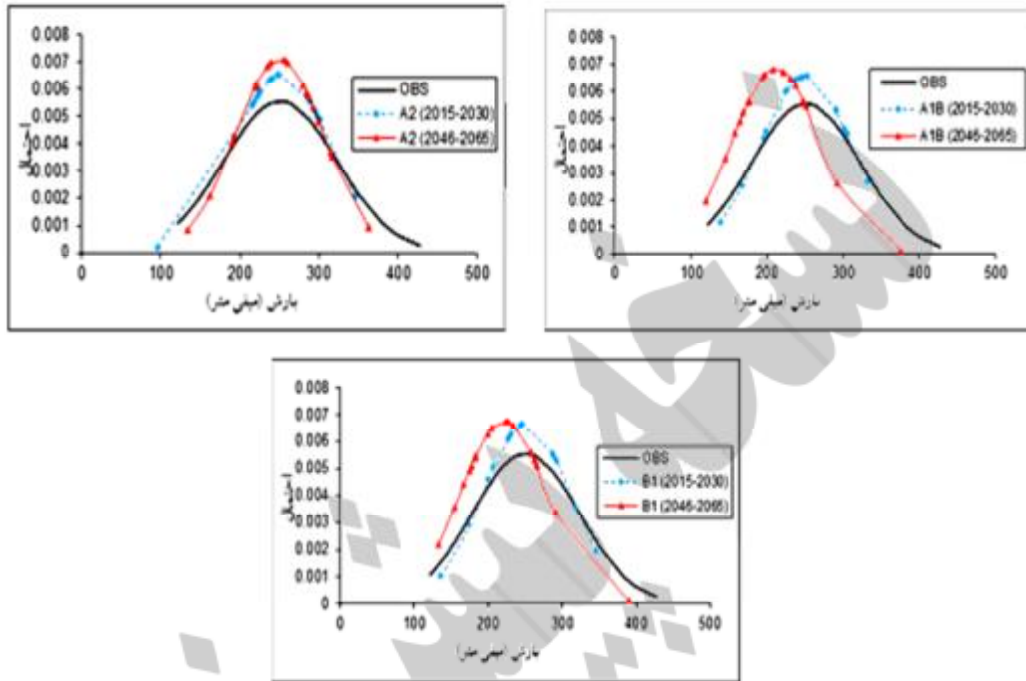


شکل ۵- خطوط هم‌نوسان سالانه آب‌های زیرزمینی مدل‌سازی شده دشت مشهد

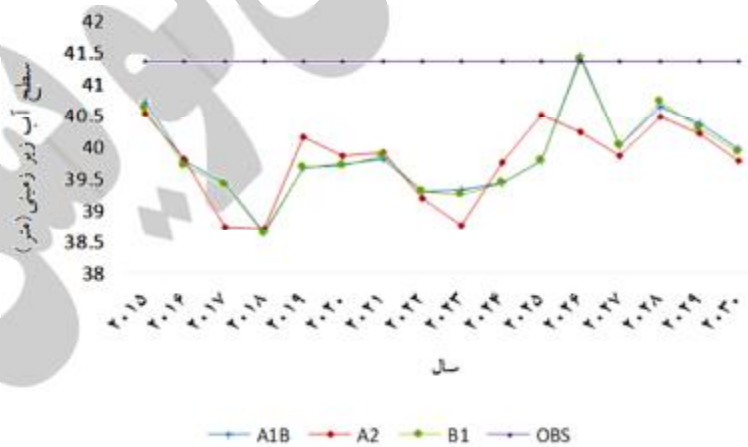
آماره‌های واسنجی				پارامتر	رویکرد
MBE	MAE	RMSE	R ²		

جدول ۴- بررسی آماره‌های واسنجی پارامترهای بارش و دما برای ارزیابی مدل LARS-WG در ایستگاه مشهد

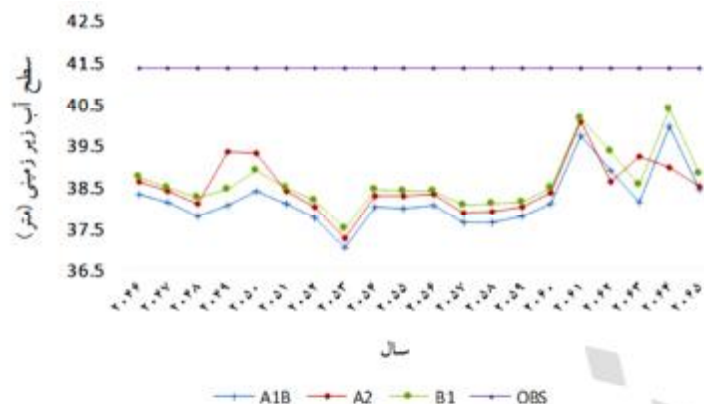
۰/۰۱۰	۲/۹۷۰	۳/۸۶۵	۰/۹۵۱	بارش	A1B
-۰/۸۰۰	۰/۸۰۰	۰/۸۴۱	۰/۹۹۹	دما	
-۰/۳۲۴	۳/۸۲۳	۵/۶۳۵	۰/۹۰۱	بارش	A2
-۰/۹۵۰	۰/۹۵۰	۰/۹۸۳	۰/۹۹۹	دما	
-۰/۰۵۹	۳/۳۸۲	۵/۱۶۸	۰/۹۰۹	بارش	B1
-۰/۷۷۲	۰/۷۷۲	۰/۸۰۱	۰/۹۹۹	دما	



شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی تابع چگالی بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک مشهد توسط مدل HadCM3



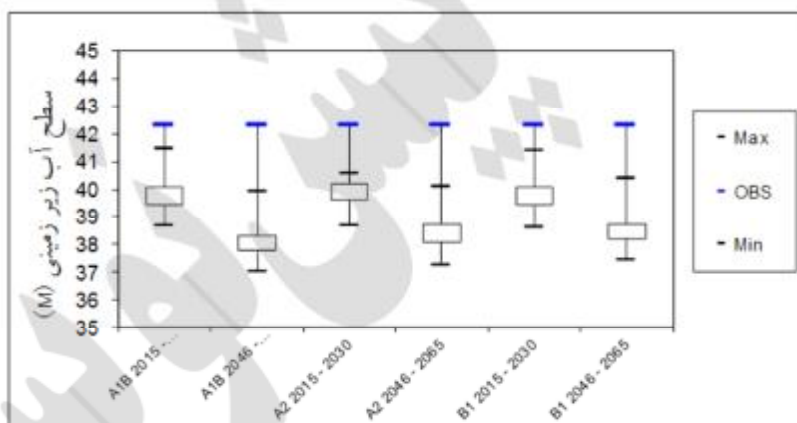
شکل ۷- وضعیت سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم (ایستگاه مشهد ۲۰۱۵-۲۰۳۰)



شکل ۸- وضعیت سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم (ایستگاه مشهد ۲۰۴۶-۲۰۶۵)

می‌شود. بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی مربوط به رویکرد A1B در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ خواهد بود و رویکردهای A2 و B1 در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نتایج همچنین نشان می‌دهد میزان افت سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ در هر سه رویکرد تقریباً مشابه خواهد بود.

در شکل ۹ نمودار جعبه‌ای سطح آب‌های زیرزمینی، در دوره‌های آینده در رویکردهای مختلف نشان داده شده‌است. در این شکل میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی برای رویکردها و دوره مختلف به تصویر کشیده شده‌است. در این شکل، OBS مقدار میانگین سطح آب زیرزمینی در دوره مشاهداتی است. همان‌گونه که مشاهده



شکل ۹- مقدار سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده برای دوره‌های منتخب ایستگاه مشهد (سالانه)

جغرافیایی نسبت به مدل حداقل مربعات معمولی است. برازش ماتریس‌های وزنی به مدل GWR نشان دهنده دقت بسیار بالای روش گاوسی نسبت به سایر روش‌های مورد مطالعه بوده است. دقت این روش با آزمون همبستگی (R) و آزمون همبستگی (RHO) مورد تأیید قرار گرفت. مدل‌سازی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از پارامترهای بارش، دما، تبخیر و تعرق، حاکی از افت سطح آب زیرزمینی در دامنه حداقل ۰/۲ متر و حداکثر ۰/۷ متری است. بر این اساس مهم‌ترین عامل در کاهش این منابع، برداشت و بهره‌برداری بی‌رویه است. تغییرات تابع

نتیجه‌گیری

ارزیابی نوسان آب‌های زیرزمینی نشان داد بیشترین نوسان سالانه آب‌های زیرزمینی متعلق به بخش جنوبی دشت است. ارزیابی نوسان آب‌های سطحی نیز حاکی از نوسان منفی در بالادست و نوسان مثبت در پایین‌دست است که این امر، نشان‌دهنده نقش عوامل انسانی در کاهش دبی در بالادست و افزایش آن در پایین‌دست می‌باشد. مدل‌سازی نوسان سطح آب‌های زیرزمینی با پارامترهای اقلیمی (دما، بارش، تبخیر و تعرق) با استفاده از مدل‌های GWR و OLS نیز حاکی از برتری مدل رگرسیونی وزن‌دار

- منابع آب مطالعه موردی: توسعه منابع دشت مشهد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، ۱۶۸ ص.
۵. عساکره ح. ۱۳۹۰. مبانی اقلیم‌شناسی آماری. انتشارات دانشگاه زنجان. ۵۵۰ ص.
۶. فلاح قالهری غ. و شاکری ف. ۱۳۹۴. کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی بارش زمستانه. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۹۹-۱۱۱: (۳۱)۹.
۷. مردانه م. افلاطونی م. و بوستانی ف. ۱۳۹۱. بررسی همبستگی بین بارندگی و سطح آب زیرزمینی در دشت شیراز. مجله مهندسی منابع آب. ۵: ۷۱-۸۰.
۸. مطالعات برنامه‌ریزی آمایش سرزمین خراسان رضوی. ۱۳۸۸. منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی. جلد سوم. تحلیل و ارزیابی موقعیت طبیعی و محیط زیستی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد. ۳۲۸ ص.
۹. نادری ر. اسدی ن. و شفیعی م. ح. ۱۳۹۲. اثرات کمی تغییرات بارش بر منابع زیرزمینی در مقیاس مختلف مطالعه موردی: دشت گوه سیستان و بلوچستان ایران. نشریه منابع آب و توسعه. ۱(۳): ۱۹۴-۲۰۴.
۱۰. یمانی م. مقامی مقیم م. عرب عامری ع. و شیرانی ک. ۱۳۹۶. ارائه مدل ترکیبی نوین به منظور افزایش دقت تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش با تاکید بر مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مطالعه موردی: حوزه دز علیا، استان اصفهان). فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۵(۴): ۱۹-۴۰.
11. Barry R. G. 1992. Mountain climatology and past and potential future climatic changes in mountain regions: a review. Mountain Research and Development. 12(1): 71-86.
12. Bivand R. and Brunstad R. 2005. Further explorations of interactions between agricultural policy and regional growth in Western Europe: approaches to nonstationarity in spatial econometrics. 45th Congress of the European Regional Science Association, Amsterdam 23-27 August, 2005.
13. Brunson C. Fotheringham A. S. and Charlton M. 1998. Geographically weighted

چگالی احتمال نشان داد با توجه به کاهش واریانس یا تیز شدگی منحنی تابع، ارتفاع منحنی (احتمال وقوع) در دوره‌های آینده افزایش یافته است. نکته مهمی که در شبیه‌سازی‌های مربوط به ایستگاه مشهد دیده می‌شود، کاهش واریانس بارش در تمامی رویکردهای انتشار است که نشان‌دهنده وجود شرایط ثابت در آینده است؛ به گونه‌ای که بی‌هنجاری‌های بارش آینده در حول و حوش میانگین خود دارای نوسان کمتری در مقایسه با دوره مشاهداتی خواهد بود. بررسی‌های مدل هوشمند شبیه‌سازی رگرسیون چندگانه بین داده‌های تاریخی بارش، دما، تبخیر و تعرق با داده‌های تاریخی نوسانات آب زیرزمینی بیانگر افت سطح آب کلیه چاه‌های پیرومتری مورد مطالعه در هر سه رویکرد تغییر اقلیم برای دوره‌های آینده است. بیشترین افت سطح آب زیرزمینی نیز در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ به وقوع خواهد پیوست. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد مهم‌ترین دلیل افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد مصرف بی‌رویه و دخالت عامل انسانی است. همچنین تأثیر اقلیم بر منابع زیرزمینی بعد از عوامل انسانی می‌تواند بررسی شود.

منابع

۱. بابائیان ا. رضایی‌پور آ. و آهنگرزاده ز. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی نمایه آسایش اقلیمی در استان خراسان رضوی تحت رویکردهای تغییر اقلیم. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۵(۱۸): ۹۵-۱۱۲.
۲. بابائیان ا. ضرغامی م. کوهی م. بابائیان ا. کریمیان م. و مدیریان ر. ۱۳۹۲. بررسی رفتار منابع آب حوضه قره‌قوم تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: زیرحوضه درگز)، نشریه آب و خاک. ۲۷(۵): ۹۱۸-۹۰۷.
۳. ثانی‌خانی ه. دین‌پژوه ی. پورسیف ی. زمانزاد قویدل س. و صولتی ب. ۱۳۹۲. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌های آبریز (مطالعه موردی: حوضه آبریز آچی چای در استان آذربایجان شرقی). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۶): ۱۲۲۵-۱۲۳۴.
۴. حسینی س. ا. ۱۳۸۸. استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها در استخراج استراتژی‌های توسعه پایدار

- regression-Modeling spatial non-stationarity. *Statistician*. 47(3): 431-443.
14. Charlton M. Fotheringham S. and Brunsdon C. 2009. Geographically weighted regression. White paper. National Centre for Geocomputation. National University of Ireland Maynooth. 25 p.
 15. Fotheringham A. S. Charlton M. E. and Brunsdon C. 2001. Spatial variations in school performance: a local analysis using geographically weighted regression. *Geographical & Environmental Modelling*. 5(1): 43-66.
 16. Hadley center. 2006. Effect of climate change in the developing countries. UK Meteorological Office.
 17. Hofinger S. Mayr G. J. Dreiseitl E. and Kuhn M. 2000. Fine-scale observations of summertime precipitation in an intra-Alpine region, *Meteorology and Atmospheric Physics*. 72(2-4): 175-184.
 18. IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 1535 p.
 19. Kuo-Chin H. Chug-Ho W. Kuan-Chin C. Chien-Tai C. and Kai-Wei M. 2007. Climate induced hydrological impacts on the groundwater system of the pingtung plain, Taiwan. *Hydrogeol Journal*. 15: 903-913.
 20. Kendall W. S. 1998. Perfect simulation for the area-interaction point process. *Probability Towards 2000, Lecture Notes in Statistics 128*, Springer Verlag, New York, 218-234.
 21. Koutroulis A. G. Tsanis I. K. Daliakopoulos I. N. and Jacob D. 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology*. 479: 146-158.
 22. Mennis J. 2006. Mapping the results of geographically weighted regression. *The Cartogr. Journal*. 43(2): 171-179.
 23. Ripley B. D. 2005. *Spatial statistics*, Wiley-Interscience publication. 252 p.
 24. Sotillo M. G. Ramis C. Romero R. Alonso Oroza S. and Homar V. 2003. Role of orography in the spatial distribution of precipitation over the Spanish Mediterranean zone. *Climate. Research*. 23: 247-261.
 25. Sturman A. and Wanner H. 2001. A comparative review of the weather and climate of the Southern Alps of New Zealand and the European Alps. *Mountain Research and Development*. 21(4): 359-369.