

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوزه آبخیز کرج

بهارک معتمدوزیری^{۱*}، هادی کیادلیری^۲، امیر اسحاقی^۳ و علی اسکندری^۴

- (۱) استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. *
رایانامه نویسنده مسئول: bmvaziri@gmail.com
- (۲) دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- (۳) دانش‌آموخته دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- (۴) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع طبیعی - آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲

چکیده

تغییر اقلیم، یکی از مهمترین چالش‌هایی است که اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار داده و دارای اثرات متفاوتی بر روی میزان دما، بارش، شدت و فراوانی خشکسالی و سیلاب، و پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روند تغییرات دما، بارش و تشعشعات خورشیدی و همچنین تعیین اثر تغییرات این متغیرها در میزان تغذیه حوزه آبخیز رودخانه کرج است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از داده‌های دو مدل جهانی HadCM3 و CGCM1 و با کاربرد مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای سه دوره (۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۱۰-۲۰۶۹، ۲۰۴۰-۲۰۹۸) صورت گرفت. سپس با استفاده از مدل HELP، میزان تغذیه حوزه آبخیز کرج برآورد گردیده و اثر تغییرات متغیرهای هواشناسی بر روی میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی تحت سناریو منتخب A2 تغییر اقلیم، نشان داد که در سه دوره آتی نسبت به دوره پایه، مقدار دما، بارش و تشعشعات خورشیدی به ترتیب افزایش (۱/۵، ۲/۸ و ۴/۵۵ درصد)، کاهش (۸/۱، ۱۵/۱ و ۱۸ درصد) و افزایش (۰/۵، ۱/۴ و ۲/۴ درصد) خواهند یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل HELP تحت سناریو منتخب A2 تغییر اقلیم، حاکی از این بود که میزان تغذیه در سه دوره آتی نسبت به دوره پایه، به ترتیب ۹/۶، ۱۵/۱ و ۱۵/۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که مدل HELP به عمق تبخیر و تعرق، حساسیت بالایی دارد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، حوزه آبخیز کرج، HELP، SDSM.

مقدمه

سانتی‌گراد می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود در آستانه سال ۲۱۰۰ میلادی، دمای کره زمین بین ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۵۰ افزایش یابد (IPCC, 1997). یکی از مهمترین عواقب تغییر اقلیم، اثراتی است که در اکوسیستم‌های طبیعی می‌گذارد و سبب تغییر در کیفیت و کمیت منابع آب، وضعیت جنگل‌ها و مراتع، فضای سبز، حیات وحش، آبزیان و... می‌شود (جانا و ماجومدیر^۱، ۲۰۱۸). مهمترین متغیرهای اقلیمی که بطور مستقیم تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار

در چند دهه اخیر، رشد جمعیت، افزایش فعالیت‌های اقتصادی، توسعه صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و تغییر کاربری اراضی به ویژه تخریب جنگل‌ها و مراتع از طرف دیگر، باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است. افزایش گازهای گلخانه‌ای به دنبال خود، تغییرات اقلیمی به ویژه گرم شدن کره زمین را در پی خواهد داشت (صمدی و همکاران، ۲۰۱۹). افزایش دما از سال ۱۸۶۰ تا کنون، حدود ۰/۶ درجه

می‌گیرند، دما، بارش، و تشعشعات خورشیدی می‌باشند (صمدی و همکاران، ۲۰۱۹). از آنجایی که این متغیرها مهمترین ورودی‌های اکوسیستم‌های طبیعی، خصوصاً حوزه‌های آبخیز می‌باشند، هر نوع تغییری در این متغیرها، می‌تواند میزان عملکرد و ساختار اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تاثیر قرار دهد. بدون شک میزان آب قابل دسترس در یک حوزه آبخیز، از نظر اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و غیره، حساس‌ترین و با اهمیت‌ترین متغیری است که تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد. بنابراین بررسی اثر تغییر اقلیم روی این ماده حیاتی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آب‌های زیرزمینی، یکی از عمده‌ترین منابع آب شیرین جهان هستند. این منابع بعد از یخچال‌ها، دومین منبع آب شیرین در جهان محسوب می‌شوند. نیاز آبی حدود یک سوم جمعیت جهان، وابسته به این منبع آبی است و بیش از ۷۰ درصد آن نیز به مصرف کشاورزی می‌رسد (هیلی^۱، ۲۰۱۸).

سیبک^۲ و آلن (۲۰۰۶) اثر تغییر اقلیم روی میزان تغذیه و سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در آبخوان گراند فورک در جنوب ایالت بریتیش کلمبیای کانادا را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در این تحقیق از دو مدل جهانی CGCM_۱ و HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برای شبیه‌سازی داده‌های بارش، دما و تشعشعات خورشیدی، و از مدل HELP برای شبیه‌سازی میزان تغذیه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در آینده نسبت به شرایط فعلی، بدلیل تغییر در الگوی پراکنش بارش و دما در منطقه مورد مطالعه، افزایش می‌یابد؛ اما سهم تغذیه در تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی به دلیل غالب بودن جریان‌های سطحی، کم می‌باشد. کروسبی^۳ و همکاران (۲۰۱۳) اثر تغییر اقلیم در میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت بزرگ آمریکا تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تحت سناریوهای تغییر اقلیم، شمال دشت با افزایش ۸ درصدی، مرکز دشت با کاهش ۳ درصدی و جنوب دشت با کاهش ۸ درصدی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در دهه ۲۰۵۰ نسبت به دهه ۱۹۹۰، روبرو می‌باشد. توز^۴ و همکاران (۲۰۱۷) اثر تغییر اقلیم روی میزان تغذیه و سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه خشک تا نیمه خشک اوکاناگان

کانادا را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق از مدل‌های گردش عمومی جو و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برای شبیه‌سازی بارش، دما و تشعشعات خورشیدی و از مدل HELP برای شبیه‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد میزان تغذیه به طور متوسط ۴۵ میلیمتر در سال می‌باشد و تغییر اقلیم باعث افزایش میزان تغذیه می‌گردد. نینجی^۵ و باتیلان^۶ (۲۰۱۹) اثر تغییر اقلیم را روی آب‌های زیرزمینی و جریان پایه در یک حوزه آبخیز در اوگاندا مورد مطالعه قرار دادند، آنها در این تحقیق از مدل SDSM به عنوان مدل ریزمقیاس‌نمایی و از مدل هیدرولوژیکی WETSPA به منظور شبیه‌سازی تغذیه و جریان پایه استفاده نمودند و نتیجه‌گیری کردند که میزان بارش بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد، دما بین ۱ تا ۴ درجه سانتی‌گراد و میزان تغذیه و جریان پایه بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد برای دهه ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰، به ترتیب افزایش خواهد داشت. صمدی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل جهانی HadCM3 و دو روش ریزمقیاس‌نمایی خطی (SDSM) و غیرخطی (شبکه عصبی)، تأثیر عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی را تحت سناریوهای تغییر اقلیم در یکی از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز کرخه مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که در دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰)، متوسط بارش روزانه ۰/۱ میلی‌متر کاهش و متوسط دمای روزانه ۰/۵۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و به تبع آن، متوسط دبی رودخانه ۱۶/۶ درصد کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش مربوط به ماه‌های آوریل و مارس خواهد بود. نادریان‌فر و همکاران (۱۳۹۰) اثر شرایط اقلیمی مختلف را روی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور مورد بررسی قرار دادند و اذعان داشتند که خشکسالی و کاهش بارش، نقش مهمی در نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت مذکور دارد؛ اما تنها عامل بحرانی نیست. آنها بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی را به عنوان مهمترین عامل افت سطح آب‌های زیرزمینی، معرفی کردند. بیگی و همکاران (۱۳۹۷) اثر تغییر اقلیم و گرم شدن کره زمین را بر میزان تغذیه آب زیرزمینی دو دشت از حوزه آبخیز کرخه مورد بررسی قرار دادند و نتیجه رفتند که تحت سناریو B₂، میزان تغذیه در دشت کوه‌دشت در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۸ از ۳۵ میلی‌متر به ۷۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد و تحت سایر سناریوها،

حاضر، بررسی روند تغییرات دما، بارش و تشعشعات خورشیدی تحت تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم و همچنین بررسی اثر تغییرات این متغیرها در میزان تغذیه حوزه آبخیز رودخانه کرج می‌باشد که نتایج آن می‌تواند چراغ راهی برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران بخش آب، کشاورزی و منابع طبیعی به منظور سازگاری و مقابله با پدیده تغییر اقلیم در آینده باشد.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه کرج، با مساحتی حدود ۸۴۰ کیلومتر مربع، در دامنه جنوبی رشته کوه البرز مرکزی، در فاصله ۳۰ تا ۶۰ کیلومتری شمال و شمال غربی تهران، و در محدوده جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است. این حوضه، به‌عنوان یکی از حوضه‌های برف‌گیر در رشته کوه البرز مطرح است و به دلیل قرار داشتن سد امیرکبیر در خروجی آن، یکی از حوزه‌های آبخیز مهم در تأمین آب تهران به شمار می‌آید.

۲- روش تحقیق

مراحل انجام تحقیق حاضر در منطقه مورد مطالعه، به شرح زیر می‌باشد:

۱- جمع‌آوری داده‌های هواشناسی حوضه شامل:

- داده‌های مشاهده‌ای (دما، بارش، تشعشعات خورشیدی

رطوبت نسبی و سرعت باد) ایستگاه هواشناسی کرج

- داده‌های متغیرهای اتمسفری مرکز ملی پیش‌بینی

متغیرهای محیطی کانادا مربوط به دو مدل CGCM و

HadCM3 شامل ۲۶ متغیر اتمسفری

۲- جمع‌آوری داده‌های هیدرولوژی حوضه شامل داده‌های

مربوط به سطح آب زیرزمینی

۳- جمع‌آوری داده‌های خاکشناسی حوضه شامل:

- داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت

(درصد شن، سیلت، رس) و تخلخل کل

- داده‌های مربوط به ویژگی‌های رطوبتی خاک نظیر

ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی

- داده‌های هیدرولیکی خاک مانند ضریب هیدرولیکی خاک

در ناحیه غیر اشباع، عمق ناحیه

تغییری در میزان تغذیه صورت نمی‌گیرد. رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از خروجی مدل HadCM3، اثر تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز تسوج را بررسی نمودند. در این راستا، با استفاده از داده‌های کوچک مقیاس شده سناریوهای A₁، A₂ و B₁ مدل HadCM3 و با به کارگیری مدل هیدرولوژیکی HELP، مقادیر تغذیه برای دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۳۰ شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که پایین‌ترین درصد تغذیه آب زیرزمینی در سناریوی A₂ اتفاق خواهد افتاد؛ زیرا کاهش بارش و افزایش دما در این سناریو، بیش از دو سناریوی دیگر است. دو سناریوی A₁ و B₁، نتایج مشابه و نزدیکی را در زمینه افزایش دما، کاهش بارش و نهایتاً مقدار تغذیه آب زیرزمینی نشان دادند. بیشترین مقدار رواناب به دلیل تغییر شکل بارش، نداشتن برف یخ زده روی زمین و ذوب بهاری، در هر سه سناریو در فصل زمستان و در ماه فوریه اتفاق خواهد افتاد. ساری صراف و جلالی عنصردی (۱۳۹۸) با استفاده از مدل جهانی گردش عمومی جو HadCM3 (سناریوی A₂) و مدل ریزمقیاس نمایی SDSM، تغییرات تبخیر، رواناب و تغذیه ناشی از بارش در آبخیز تسوج را برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ریزمقیاس نمایی نشان داد که تحت سناریوی A₂، میانگین دمای سالانه نسبت به دوره پایه، ۱/۰۱ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش سالانه ۷/۱ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. به منظور شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق، تغذیه و رواناب در دوره آینده، از مدل HELP استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که به دلیل افزایش دما، مقادیر قابل توجهی از بارش صرف تبخیر و تعرق خواهد شد. در کنار کاهش بارش و افزایش دما، ویژگی‌های هیدرولیکی و رطوبتی خاک در میزان تغذیه نقش مهمی ایفا می‌کند. به طوری که با افزایش رطوبت خاک، از میزان تغذیه کاسته شده و بر میزان رواناب افزوده خواهد شد.

در مناطق مختلف کشور، دسترسی به منابع آب عمدتاً از طریق حوزه آبخیز رودخانه امکان پذیر است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران، ۱۳۹۰). بنابراین بررسی و پیش‌بینی وضعیت میزان تغذیه حوزه آبخیز رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم با توجه به شکننده بودن این اکوسیستم‌ها، از اهمیت دوچندانی برخوردار است. در همین راستا، هدف از تحقیق

۴- تشکیل سری زمانی، آزمون همگنی داده‌ها و تشخیص داده‌های پرت

۵- تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار ArcGIS

۶- ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های CGCM و HadCM3 توسط مدل SDSM و شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی اعم از شاخص‌های دمایی، بارش و تشعشعات خورشیدی برای دوره‌های ۳۰ ساله (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۸-۲۰۷۰)

۷- بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی حوضه

۸- تخمین میزان تغذیه در شرایط فعلی و تحت سناریوهای

تغییر اقلیم در دوره‌های آتی با استفاده از مدل HELP

۱-۲- مدل‌های گردش عمومی جو - اقیانوس CGCM و

HadCM3

۱-۱-۲- مدل CGCM

این مدل، برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ توسط کشور کانادا به منظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای IS92 (گازهای گلخانه‌ای) به علاوه ذرات معلق موجود در فضا تا سال ۲۰۹۹، ارائه شده است. این مدل، ۲۶ متغیر اتمسفری را از سال ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۹۹ تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای به علاوه ریزگردها، شبیه‌سازی نموده است. قدرت تفکیک مکانی افقی این مدل در خشکی‌ها، ۳/۷ در ۳/۷ درجه در هر سلول و در اقیانوس‌ها، ۱/۸ در ۱/۸ درجه می‌باشد. در این مدل، نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ میلادی، ثابت و برابر با نرخ افزایش این گازها در دوره (۱۹۹۰-۱۸۵۰) در نظر گرفته شده است (افزایش غلظت گاز CO₂ با رشد یک درصد در سال تا سال ۲۱۰۰ منظور شده است). متغیرهای پیش‌بینی‌کننده این مدل برای کشور کانادا از دقت مناسبی برخوردار هستند و تقریباً میانگین متغیرهای سایر مدل‌ها را در بر می‌گیرند (سیبک و آلن، ۲۰۰۶). ارائه نتایج مناسب، ارائه وضعیتی از متوسط سایر مدل‌های گردش عمومی، دخالت دادن گازهای گلخانه‌ای همراه با ریزگردها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و لینک ساده آن با مدل ریزمقیاس نمایی SDSM، از دلایل استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی شاخص‌های دما و بارش در این تحقیق بوده است.

۲-۱-۲- مدل HadCM3

این مدل، توسط مرکز هدلی، مرکز پیش‌بینی و تحقیقات اقلیمی انگلستان برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای مختلف ارائه شده است. شبیه نسخه قبلی یعنی HadCM2 می‌باشد و قدرت تفکیک مکانی آن در خشکی‌ها، ۲/۵ در ۳/۷ درجه و در اقیانوس‌ها، ۱/۲۵ در ۱/۲۵ درجه می‌باشد. این مدل، تا کنون در نقاط مختلف جهان به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در مرحله ارزیابی، رضایت بخش اعلام شده است (توز، ۲۰۱۷؛ صمدی و همکاران، ۱۳۹۷).. این مدل، ۲۶ متغیر اتمسفری را از سال ۱۹۶۱-۲۰۹۹ شبیه‌سازی نموده است. ارائه نتایج رضایت بخش در ایران، دسترسی آسان به اطلاعات آن، مناسب بودن تفکیک مکانی این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها خصوصاً روی اقیانوس‌ها و همچنین لینک اطلاعات آن با مدل ریزمقیاس نمایی SDSM، از مهمترین عواملی است که از داده‌های این مدل در این تحقیق استفاده شده است.

۳-۱-۲- سناریوهای اقلیمی

به دلیل اهمیت موضوع تغییر اقلیم، در سال ۱۹۸۸ هیأت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) توسط سازمان هواشناسی جهان و برنامه محیط زیست سازمان ملل تأسیس شد. وظیفه این هیأت، بررسی تغییرات اقلیمی در سطح جهانی، تهیه و تدوین سناریوهای تغییر اقلیم، و به‌طور کلی شناخت تمام پدیده‌ها و اثرات تغییر اقلیم در سطح جهانی است. این هیأت برای اولین بار نسبت به انتشار سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در سال ۱۹۹۲ تحت عنوان IS92 اقدام نمود. در این سناریوها، نرخ رشد افزایش گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰، ثابت فرض شده بود. این هیأت، به منظور به‌روز رسانی سناریوها، در سال ۱۹۹۶، سری جدید سناریوهای تغییر اقلیم را تحت عنوان SRES ارائه کرد (IPCC, 1997). این سناریوها، حاوی اطلاعاتی از قبیل پیش‌بینی وضعیت رشد جمعیت، وضعیت اقتصادی و اجتماعی، میزان و نحوه استفاده از سوخت‌های فسیلی و وضعیت ذرات معلق در اتمسفر و تأثیر آنها در افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشند. این سناریوها به چهار گروه اصلی A₁، B₁، A₂ و B₂ تقسیم می‌شوند که هر یک شامل چندین زیرگروه فرعی دارند. در خانواده سناریوهای گروه A₁، جهان با رشد سریع اقتصادی و افزایش جمعیت که در دهه ۲۰۵۰ به

داده‌های بارش، دما، و تشعشعات خورشیدی در این تحقیق می‌باشند.

در تحقیق حاضر، به منظور کالیبره نمودن و واسنجی مدل SDSM، داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه هواشناسی کرج و داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی کانادا (NCEP) مربوط به هریک از دو مدل جهانی CGCM و HadCM3 به دو دوره ۱۵ ساله (۱۹۷۵-۱۹۶۱) و (۱۹۹۰-۱۹۷۶) تقسیم شدند. که از ۱۵ سال اول برای کالیبره کردن مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات استفاده شد (داده‌های مربوط به تشعشعات خورشیدی فقط در بازه زمانی ۱۹۷۱-۲۰۰۱ در دسترس بودند که در همین دوره، مراحل کالیبراسیون صورت گرفت). بعد از کالیبره نمودن مدل، به منظور حصول اطمینان از این که، مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌ها را خارج از محدوده زمانی کالیبراسیون دارد، نیاز است مدل ارزیابی شود. بدین منظور با استفاده از مدل SDSM کالیبره شده، شاخص‌های دمایی (متوسط حداکثر، دما، متوسط حداقل دما، میانگین دمای روزانه) و بارش برای دوره ۱۵ ساله (۱۹۹۰-۱۹۷۶) شبیه‌سازی شدند. سپس با مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده، کارایی مدل برای ایستگاه کرج، مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین در آخرین مرحله، ارزیابی به منظور بررسی میزان حساسیت مدل SDSM به خروجی مدل‌های جهانی، شاخص‌های مذکور با استفاده از داده‌های دو مدل جهانی CGCM و HadCM3 در دو دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دوره ارزیابی (۱۹۹۰-۱۹۷۶) شبیه‌سازی و سپس با داده‌های مشاهده‌ای، مقایسه شدند. در نهایت مدلی که شرایط فعلی را بهتر شبیه‌سازی نماید، به عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی انتخاب می‌گردد.

مدل SDSM قادر است در هر مرحله اجرا، بین ۱ تا ۱۰۰ بار، داده‌ها را شبیه‌سازی نماید. در این تحقیق، جهت بهینه‌سازی تعداد دفعات شبیه‌سازی، از معیار میانگین خطای مطلق (MAE⁹) استفاده شد. بدین ترتیب که مدل در مرحله واسنجی به تعداد ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ بار شبیه‌سازی، مورد ارزیابی قرار گرفت و تعداد دفعاتی که کمترین میانگین خطای مطلق را داشت، به عنوان مبنای شبیه‌سازی قرار گرفت.

اوج خود می‌رسد، روبرو است و از آن به بعد، به دلیل کاربرد تکنولوژی‌های جدید و کارآمدتر، افزایش گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد. در این نوع سناریوها، مسائل اقتصادی به مسائل محیط زیستی ارجحیت دارند و دیدگاه‌ها عموماً جهانی است. در خانواده سناریوهای گروه A₂، دیدگاه‌ها به جای جهانی بودن، به مسائل منطقه‌ای تأکید دارند و بر پایه رشد سریع جمعیت و عدم پیشرفت اقتصادی و تکنولوژی استوار هستند. سناریوهای گروه B₁، تا حدود زیادی شبیه گروه A₁ می‌باشند؛ با این تفاوت که به استفاده از انرژی‌های پاک (خورشیدی و باد) تأکید بیشتری شده است. در این سناریوها، تأکید بر پایداری اقتصاد و محیط زیست در سطح جهانی، مد نظر قرار گرفته است. در سناریوهای B₂، حل مسائل اقتصادی و اجتماعی و تأکید به محیط زیست پایدار در مقیاس منطقه‌ای و محلی، مد نظر می‌باشد. لازم به ذکر است که سناریوهای زیرگروه‌های A₁ و B₁، به حل مسائل در مقیاس جهانی، و سناریوهای A₂ و B₂، به حل مسائل در مقیاس منطقه‌ای تأکید دارند.

۲-۲-۲ مدل SDSM

داده‌های حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو مانند مدل‌های HadCM3 و GGCM، به دلیل محدودیت در تفکیک مکانی (بزرگ بودن سلول‌ها)، قابل استفاده در مقیاس محلی، منطقه‌ای و نقطه‌ای نیستند. بنابراین استفاده از آنها در مقیاس حوزه‌های آبخیز یا مطالعات منابع آب، با خطای زیاد همراه می‌باشد. به همین دلیل باید اطلاعات آنها از سطوح بزرگ به مقیاس منطقه‌ای یا محلی، تعمیم داده شود. تعمیم اطلاعات از یک سطح بزرگ به یک سطح کوچکتر، تحت عنوان ریزمقیاس‌نمائی معروف است. روش‌های مختلفی بدین منظور ارائه شده است که یکی از پرکاربردترین روش‌ها، مدل ریزمقیاس‌نمائی SDSM می‌باشد (ویلیبی و داوسون، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۵؛ کوکدیس و برگ، ۲۰۱۹). این مدل، نخستین بار در سال ۲۰۱۴ توسط ویلیبی^۸ با همکاری مؤسسه بررسی اثر سناریوهای تغییر اقلیم انگلستان، به منظور ریزمقیاس‌نمائی ارائه شد. کاربرد وسیع آن در دنیا، توانایی مناسب در ارزیابی نتایج در مرحله کالیبره نمودن و ارزیابی، استفاده مستقیم از اطلاعات مدل‌های جهانی و تعیین وقایع حدی است که این موارد، از مهمترین دلایل انتخاب این مدل جهت ریزمقیاس‌نمائی

این مدل، نخستین بار در سال ۲۰۱۷ توسط سازمان مهندسی ارتش آمریکا و به سفارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا به منظور بهینه‌سازی انتخاب محل و نحوه اجرای پروژه‌های دفن زباله‌ها جهت کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی، ارائه شد. مدل HELP، یک مدل دو بعدی است که به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف هیدرولوژی و محاسبه بیلان آبی در محیط‌های غیراشباع، ارائه شده است؛ اما در سال‌های اخیر، به‌طور وسیعی برای تخمین میزان تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، با استفاده از معادله بیلان، میزان ذخیره سطحی، ذوب برف، رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق، میزان آب مورد نیاز رشد گیاه، ذخیره آب در خاک و جریان‌های زیرقشری و میزان زهکشی را محاسبه می‌کند. این مدل، در واقع جزء مدل‌های بیلان آب در ناحیه ریشه محسوب می‌شود (هیلی، ۲۰۱۸). بررسی کارایی مدل HELP در مناطق مختلف، حاکی از آن است که این مدل از توانایی مناسبی برای تخمین تغذیه برخوردار است (اسکانلن و همکاران، ۲۰۰۶؛ سبیک و آلن، ۲۰۰۶؛ جیرکاما و همکاران، ۲۰۱۴)؛ بنابراین در تحقیق حاضر، به منظور تخمین میزان تغذیه، از مدل HELP استفاده گردید. این مدل، به سه نوع داده نیاز دارد:

۱- داده‌های هواشناسی شامل بارش، دما و تشعشعات خورشیدی در مقیاس روزانه

۲- داده‌های خاکشناسی شامل تخلخل کل، ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی ضریب هیدرولیکی خاک در ناحیه غیراشباع و شماره منحنی برای شرایط رطوبت پیشین II

۲- پارامترهای طراحی شامل عمق هر یک از لایه‌ها، وضعیت جریان‌های زیرقشری وارد شده به ناحیه ریشه، وضعیت آب برگشتی از آب‌های زیرزمینی به ناحیه ریشه و وضعیت پوشش سطح زمین

لازم به ذکر است با توجه به وضعیت توپوگرافی دشت مورد مطالعه (شیب صفر تا ۲ درصد)، هیچ روانابی برای آبخوان مورد نظر منظور نشده است. همچنین با توجه به عمق سنگ بستر آبخوان (بیشتر از ۳۰ متر)، هیچ لایه غیرقابل نفوذ در ناحیه ریشه در نظر گرفته نشده است. با توجه به ویژگی‌های آبخوان،

هیچ جریان زیرقشری ورودی و خروجی به لایه خاک در عمق ۱/۵ متری منظور نشده است.

نتایج

۱- شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های آتی

بعد از ریزمقیاس‌نمایی مدل برای هریک از متغیرهای اقلیمی شامل سه شاخص دمایی (متوسط دمای روزانه، حداکثر دمای روزانه و حداقل دمای روزانه)، بارش و تشعشعات خورشیدی، و انتخاب مدل جهانی و سناریوی مناسب با توجه به معیار میانگین خطای مطلق و شاخص‌های گرافیکی، نسبت به شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های ۳۰ ساله ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۶۹-۲۰۴۰ (۲۰۱۰-۲۰۳۹) و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ اقدام شد.

۱-۱- شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی

ارزیابی‌های انجام شده در دوره‌های کالیبراسیون، ارزیابی و پایه، حکایت از آن دارد که مدل HadCM3 در مقایسه با مدل CGCM، شاخص‌های دمایی به‌ویژه متوسط دمای روزانه (به عنوان یکی از ورودی‌های مدل هیدرولوژی HELP) را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. هر دو سناریو A2 و B2، متوسط دما را در دوره پایه تقریباً مشابه هم شبیه‌سازی می‌کنند. از آنجایی که سناریوی A2 وقایع حدی را بهتر از سناریو B2 شبیه‌سازی می‌کند و نتایج آن در دوره پایه برای داده‌های بازسازی شده، بهتر از سناریوی B2 می‌باشد. در نهایت سناریو A2 از مدل HadCM3 برای شبیه‌سازی متوسط دمای روزانه در دوره‌های آتی انتخاب گردید.

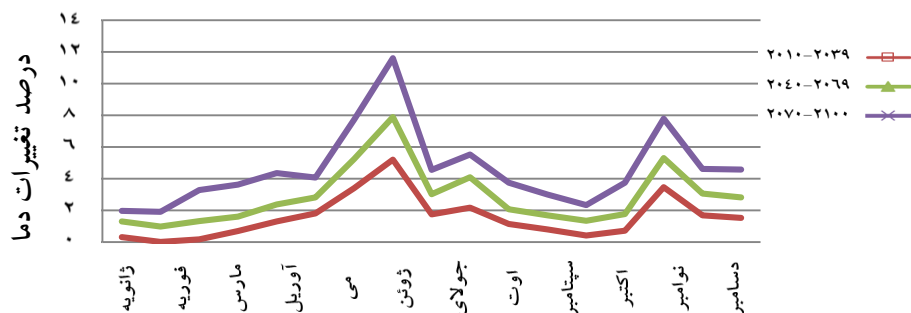
در این تحقیق، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی (کالیبره شده) SDSM و خروجی سناریوهای A2 و B2 مدل جهانی HadCM3 و مدل CGCM (تحت سناریوهای گلخانه‌ای به‌علاوه ذرات معلق)، نسبت به شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی اقدام شد (جدول ۱). شکل ۱، درصد تغییرات دمای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تحت سناریوی A2 را در دوره‌های آتی نشان می‌دهد. در تمام ماه‌ها، افزایش دما را داریم اما بیشترین آن مربوط به ماه اوت می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی دما نشان داد که در دوره‌های آتی، دما به‌طور قابل ملاحظه افزایشی یابد. افزایش متوسط دما برای دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۸-۲۰۷۰) نسبت به دوره پایه بر اساس مدل HadCM3 تحت سناریوی

A₂، به ترتیب برابر با ۱/۵، ۲/۸ و ۴/۵۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱- مقدار شاخص‌های دمایی سالانه دوره پایه و آتی به تفکیک سناریو (درجه سانتی‌گراد)

	دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰)			۲۰۱۰-۲۰۳۹			۲۰۴۰-۲۰۶۹			۲۰۷۰-۲۱۰۰		
	مناطق مطلق	متوسط	حد اکثر مطلق	مناطق مطلق	متوسط	حد اکثر مطلق	مناطق مطلق	متوسط	حد اکثر مطلق	مناطق مطلق	متوسط	حد اکثر مطلق
دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰)	۱۶/۱	۴۸	-۳۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CGCM												
مقدار شاخص	۱۵/۹	۵۱/۸۰	-۲۳/۶	۱۸/۵	۵۳/۵	-۲۲/۴۰	۲۰/۱۷	۵۵/۵	-۲۱/۹	۲۴	۵۷/۸	-۲۳/۴
درصد تغییرات نسبت به زمان پایه				۲/۴	۵/۵	۷/۶	۴/۱	۷/۵	-۸/۱	۷/۹	۹/۸	-۶/۶
A ₂												
مقدار شاخص	۱۶/۵	۴۹/۳	-۲۰/۴	۱۷/۶	۵۲/۳	-۲۱/۲	۱۸/۹	۵۴/۲	-۲۰/۲	۲۰/۶۵	۵۶/۶	-۱۹/۲
درصد تغییرات نسبت به زمان پایه				۱/۵	۴/۳	-۸/۸	۲/۸	۶/۲	-۹/۸	۴/۵۵	۸/۶	۱۰/۸
B ₂												
مقدار شاخص	۱۶/۵	۵۱	۲۰/۴	۱۷/۵۴	۵۲/۱	-۲۰/۷	۱۸/۵۳	۵۳-۶	-۲۰/۴	۱۹/۶	۴۵/۵	-۱۹/۷
درصد تغییرات نسبت به زمان پایه				۱/۴	۴/۱	-۹/۳	۲/۴۳	۵-۶	-۹/۶	۳/۵	۶/۵	-۱۰/۳



شکل ۱- درصد تغییرات دما در دوره‌های آتی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه تحت سناریوی A₂ مدل HadCM3

۲-۱- شبیه‌سازی بارش (جدول ۲). در شکل ۲، درصد تغییرات بارش در سه دوره ۳۰ ساله آتی، نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه (تحت سناریوی A₂ مدل HadCM3)، نشان داده شده است.

بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که در دوره‌های آتی، روند تغییرات بارش کاهشی است؛ به طوری که افزایش متوسط بارش برای دوره‌های (۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۸) نسبت به دوره پایه، به ترتیب برابر با ۸/۱-، ۱۵/۱- و ۱۸- درصد می‌باشد.

۳-۱- شبیه‌سازی تشعشعات خورشیدی

داده‌های تشعشعات خورشیدی، بر خلاف دو متغیر دما و بارش که از سال ۱۹۶۱ در دسترس بودند. تنها برای یک دوره ۴ ساله (۱۹۹۷-۲۰۰۱) قابل دسترس می‌باشند. خارج از این محدوده زمانی، یا داده‌ها از درجه اطمینان کافی برخوردار نبودند و یا این که اصلاً وجود نداشتند. البته داده‌های سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۱۹ در ایستگاه کرج با درجه اطمینان بالا در

۲-۱- شبیه‌سازی بارش

شبیه‌سازی بارش، مانند شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی صورت گرفت. با این تفاوت که هیچ‌کدام از متغیرهای مستقل مدل CGCM، با متغیر وابسته بارش ارتباط معنی داری نداشتند؛ لذا شبیه‌سازی فقط با استفاده از مدل HadCM3 صورت گرفت. ارزیابی مدل SDSM حاکی از این بود که مدل به خوبی تعداد روزهای با بارش کم که از ویژگی‌های اصلی ایستگاه مورد مطالعه می‌باشد را نشان می‌دهد؛ اما توانایی شبیه‌سازی وقایع حدی را ندارد. مدل، در شبیه‌سازی میانگین روزانه بارش دارای توانایی مناسب بوده ولی در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین، از دقت لازم برخوردار نیست.

با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در دوره کالیبراسیون، ارزیابی و پایه، مدل HadCM3 تحت سناریوی A₂ به عنوان مدل مناسب جهت شبیه‌سازی بارش روزانه (به عنوان داده‌های ورودی به مدل تغذیه) انتخاب شد. سپس با استفاده از این مدل، بارش روزانه برای سه دوره (۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و

این مدل، تشعشعات خورشیدی برای سه دوره (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۷۰-۲۰۹۸) شبیه‌سازی شد (جدول ۳). در شکل ۳، درصد تغییرات تشعشعات خورشیدی در سه دوره‌های آتی، نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه (تحت سناریوی A2 مدل HadCM3)، نشان داده شده است.

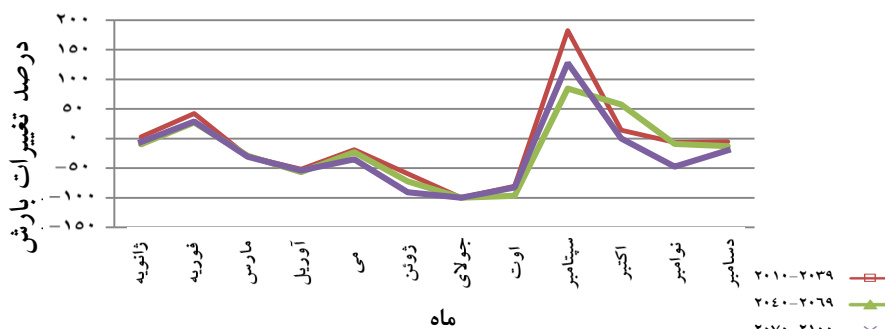
نتایج حاصل از شبیه‌سازی تشعشعات خورشیدی در دوره‌های آتی، حکایت از افزایش روند تغییرات این متغیر در مقیاس سالانه دارد. درصد تغییرات تشعشعات خورشیدی در دوره‌های (۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۸) نسبت به دوره پایه، نسبت به دوره پایه به ترتیب برابر با ۰/۵، ۱/۴ و ۲/۴ درصد می‌باشد.

دسترس بودند؛ اما به دلیل عدم وجود داده‌های بازسازی شده (NCEP) برای کالیبره نمودن مدل، استفاده از داده‌های تشعشعات خورشیدی بعد از سال ۲۰۰۱، عملاً غیرقابل استفاده می‌باشد. بنابراین کالیبراسیون مدل با همین داده‌ها صورت گرفت. سایر موارد شبیه‌سازی در این بخش، مانند متغیرهای دما و بارش صورت گرفت.

با توجه به انتخاب سناریو A2 برای شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش (به منظور هماهنگی در انتخاب یک سناریوی مشترک برای هر سه متغیر دما، بارش و تشعشعات)، سناریوی A2 به عنوان سناریوی منتخب جهت شبیه‌سازی تشعشعات خورشیدی در دوره‌های آتی انتخاب گردید. سپس با استفاده از

جدول ۲- میزان بارش مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره پایه و دوره‌های آتی (میلی‌متر)

ماه	دوره پایه			A2		B
	۱۹۶۱-۱۹۹۰	۲۰۱۰-۲۰۳۹	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۲۰۷۰-۲۰۹۸	۲۰۱۰-۲۰۳۹	
ژانویه	۳۰/۵	۳۱/۳	۲۷/۶	۲۸/۷	۳۵	۲۸/۴
فوریه	۲۵	۳۵/۵	۳۱/۷	۳۲/۱	۴۰/۱	۳۱/۳
مارس	۳۱/۳	۲۱/۸	۲۲/۱	۲۱/۶	۲۷/۹	۲۱/۵
آوریل	۱۸/۳	۸/۹	۷/۹	۸/۴	۱۰/۹	۸/۳
می	۸/۸	۷/۱	۶/۸	۵/۷	۸/۹	۸/۲
ژوئن	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۱
جولای	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰
اوت	۰/۵	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱
سپتامبر	۰/۱	۰/۴	۰/۳	۰/۳	۰/۸	۰/۹
اکتبر	۱/۷	۲	۲/۷	۱/۷	۳/۱	۳
نوامبر	۶/۱	۵/۷	۵/۵	۳/۲	۷/۱	۵/۹
دسامبر	۱۸	۱۷/۱	۱۵/۷	۱۴/۴	۱۷/۹	۱۶/۸
زمستان	۷۱/۱	۸۱/۲	۷۲/۵	۷۲/۷	۹۰	۷۳/۷
بهار	۵۸/۴	۳۷/۸	۳۶/۸	۳۵/۷	۴۷/۷	۳۸
تابستان	۱/۷	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲
پاییز	۸	۸/۱	۸/۵	۵/۳	۱۱/۱	۹/۸
سالانه	۱۴۱/۵	۱۳۰/۱	۱۲۰/۴	۱۱۶/۳	۱۵۱/۹	۱۲۴/۲

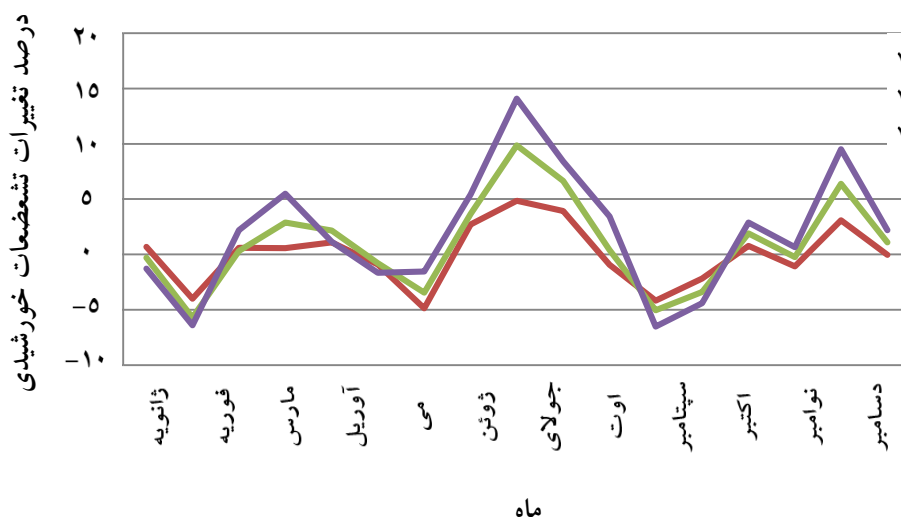


شکل ۲- درصد تغییرات بارش در دوره‌های آتی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه تحت سناریوی A2 مدل HadCM3

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوزه آبخیز کرج/۶۳

جدول ۳- متوسط تشعشعات خورشیدی در دوره پایه و دوره‌های آتی (مگاژول بر مترمربع در روز)

ماه	۱۹۶۱-۱۹۹۰		۲۰۱۰-۲۰۳۹		۲۰۴۰-۲۰۶۹		۲۰۷۰-۲۰۹۸	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
ژانویه	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۳/۷	۱۳/۷	۱۳/۶	۱۳/۸
فوریه	۱۵/۵	۱۴/۹	۱۴/۸	۱۴/۸	۱۴/۶	۱۴/۶	۱۴/۵	۱۴/۵
مارس	۱۹/۱	۱۹	۱۹/۲	۱۹/۲	۱۹/۲	۱۹/۳	۱۹/۵	۱۹/۳
آوریل	۲۳/۳	۲۲/۸	۲۳/۳	۲۳/۳	۲۴	۲۳/۸	۲۴/۶	۲۴/۱
می	۲۷/۷	۲۸	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۸/۳	۲۷/۹	۲۸	۲۷/۹
ژوئن	۲۸/۱	۲۷/۹	۲۷/۸	۲۷/۹	۲۷/۸	۲۷/۷	۲۷/۶	۲۷/۷
جولای	۲۸/۵	۲۶/۸	۲۷/۱	۲۷/۱	۲۷/۵	۲۷/۳	۲۸	۲۷/۸
اوت	۲۶/۸	۲۷/۴	۲۷/۵	۲۷/۶	۲۷/۸	۲۷/۷	۲۸/۳	۲۸
سپتامبر	۲۲/۸	۲۳/۴	۲۳/۹	۲۳/۴	۲۵/۱	۲۴/۳	۲۶/۱	۲۵/۳
اکتبر	۱۷/۷	۱۸/۲	۱۸/۳	۱۸/۴	۱۸/۹	۱۸/۷	۱۹/۲	۱۹
نوامبر	۱۴/۳	۱۳/۹	۱۴/۱	۱۴/۲	۱۴/۳	۱۴/۴	۱۴/۸	۱۴/۵
دسامبر	۱۲/۵	۱۲/۲	۱۲	۱۲	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۱/۷	۱۱/۷
زمستان	۱۳/۹	۱۳/۶	۱۳/۵	۱۳/۶	۱۳/۴	۱۳/۴	۱۳/۳	۱۳/۳
بهار	۲۳/۴	۲۳/۳	۲۳/۵	۲۳/۶	۲۳/۸	۲۳/۷	۲۴/۱	۲۳/۸
تابستان	۲۷/۸	۳۲/۷	۲۷/۵	۲۷/۵	۲۷/۷	۲۷/۶	۲۸	۸۲/۷
پاییز	۱۸/۳	۱۸/۵	۱۸/۸	۱۸/۹	۱۹/۵	۱۹/۱	۲۰	۱۹/۶
متوسط سالانه	۲۰/۸	۲۰/۷	۲۰/۷	۲۰/۹	۲۱/۱	۲۱	۲۱/۳	۲۱/۱



شکل ۳- درصد تغییرات تشعشعات خورشیدی در دوره‌های آتی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه تحت سناریوی A2 مدل HadCM3

کریجینگ، به روش معکوس وزنی فاصله ارجحیت دارد؛ بنابراین پهنه‌بندی عمق سطح ایستابی با استفاده از روش کریجینگ انجام شد. بدین منظور، عمق سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای حوزه آبخیز کرج از مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۷ در مقیاس ماهانه، بر اساس روش کریجینگ به منظور بررسی روند تغییرات و پهنه‌بندی عمق سطح ایستابی، مورد ارزیابی قرار گرفت.

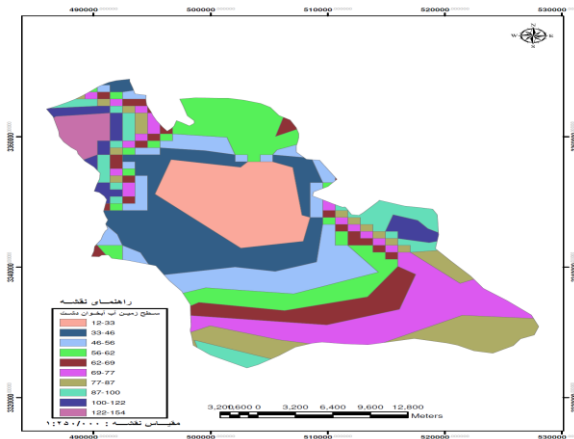
۲-۳- بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج
به منظور بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج و همچنین تعیین میانگین عمق سطح ایستابی، از دو روش زمین‌آماري کریجینگ و معکوس وزنی فاصله (IDW) استفاده شد. این دو روش، با استفاده از معیار میانگین خطای مطلق با هم مقایسه شدند (جدول ۴). نتایج نشان داد که روش

جدول ۴. میانگین خطای مطلق سالانه مربوط به سطح ایستابی حوزه آبخیز کرج (متر)

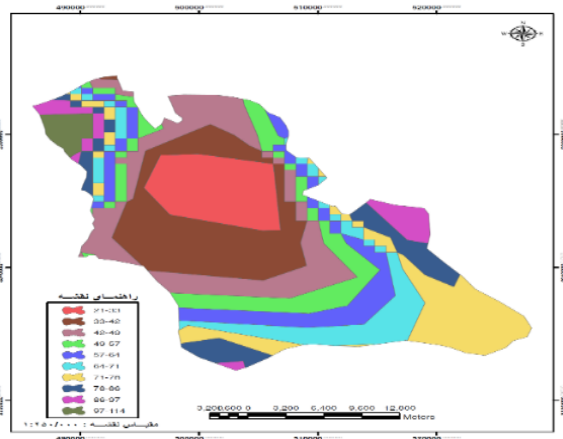
سال	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷
کریجینگ	۱۶۳	۱۷	۱۷/۸	۱۶	۱۵/۴	۱۹	۲۱/۳	۲۶/۳	۲۲
معکوس وزنی فاصله	۱۷/۵	۱۸/۱	۱۸/۸	۱۶/۵	۱۶	۲۰/۵	۲۱/۸	۲۶/۷	۲۳

شکل ۴، عمق سطح ایستابی در حوزه آبخیز کرج را در مهرماه سال ۱۳۸۹ (به عنوان ابتدای دوره) و شهریور ماه ۱۳۹۷ (به عنوان انتهای دوره) نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه‌ها، عمق سطح ایستابی در سال ۱۳۸۹ از حداقل ۲۱ متر تا حداکثر ۱۱۴ متر و در سال ۱۳۹۷ از حداقل ۱۲/۵ متر تا حداکثر ۱۶۴ متر در نقاط مختلف آبخوان، متغیر می‌باشد.

شکل ۴، عمق سطح ایستابی در حوزه آبخیز کرج را در مهرماه سال ۱۳۸۹ (به عنوان ابتدای دوره) و شهریور ماه ۱۳۹۷ (به عنوان انتهای دوره) نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه‌ها، عمق سطح ایستابی در سال ۱۳۸۹ از حداقل ۲۱ متر تا حداکثر ۱۱۴ متر و در سال ۱۳۹۷ از حداقل ۱۲/۵ متر تا حداکثر ۱۶۴ متر در نقاط مختلف آبخوان، متغیر می‌باشد.



الف



ب

شکل ۴- عمق سطح ایستابی حوزه آبخیز کرج در مهرماه ۱۳۸۹ (الف) و شهریورماه ۱۳۹۷ (ب)

نتایج حاصل از بررسی عمق سطح ایستابی در حوضه، نشان می‌دهد که افت سطح ایستابی آبخوان، از یک روند افزایشی برخوردار است (جدول ۵)

نتایج حاصل از بررسی عمق سطح ایستابی در حوضه، نشان می‌دهد که افت سطح ایستابی آبخوان، از یک روند افزایشی

می‌دهد که افت سطح ایستابی آبخوان، از یک روند افزایشی

جدول ۵- متوسط بارش و عمق سطح ایستابی سالانه حوزه های آبخیز کرج

سال	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷
مقدار بارش (میلی‌متر)	۸۴	۱۲۸	۱۵۵	۵۵	۱۳۳	۸۱	۹۹	۹۴	۱۱۹
عمق سطح ایستابی (متر)	۵۶	۵۶/۷۳	۵۷/۴۹	۵۴/۵۸	۵۳/۸۲	۵۹/۱۲	۵۹/۱	۶۰/۳۴	۶۰/۸۱

در خصوص روند تغییرات سطح آب زیر زمینی، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که به طور کلی، عمق سطح آب زیرزمینی حوزه آبخیز کرج در حال افزایش است. میزان افزایش عمق آب سطح زیرزمینی در این آبخوان، به طور متوسط سالانه حدود ۶۰ سانتی‌متر است. این میزان، در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه دارای تغییراتی می‌باشد که این تغییرات، تابع میزان بارش‌های فصل زمستان و میزان برداشت از حوزه آبخیز است. از طرفی در محدوده شهر کرج، به دلیل نفوذ فاضلاب‌های شهری، حداقل افت مشاهده می‌شود که در بعضی نقاط نه تنها با افت حوزه آبخیز روبرو نیستیم، بلکه با افزایش سطح آب زیرزمینی مواجه هستیم که این مسأله خود

می‌تواند منشأ مشکلات جدیدی نظیر آلودگی حوزه آبخیز را در بر داشته باشد. بنابراین نباید به این افزایش سطح آب زیرزمینی امیدوار بود.

۳-۳- شبیه‌سازی میزان تغذیه حوزه آبخیز کرج برای دوره-های آبی

به منظور تخمین میزان تغذیه در شرایط فعلی و تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های آبی، از مدل HELP استفاده گردید. این مدل، یکی از مدل‌های شبیه‌سازی میزان تغذیه در ناحیه غیراشباع خاک می‌باشد. و اساس کار آن بر پایه معادله بیلان است. جدول ۷، پارامترهای ورودی به این مدل را در منظره مورد مطالعه نشان می‌دهد. اکثر این پارامترها، بر اساس

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوزه آبخیز کرج/۶۵

با توجه به اهمیت دو پارامتر عمق تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ، به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف این دو پارامتر در محاسبه میزان تغذیه در مدل HELP، در یک مرحله با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترها (به غیر از عمق تبخیر و تعرق)، اجرای مدل تحت سناریوهای ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر عمق تبخیر و تعرق برای کل محدوده آبخوان، صورت گرفت. جدول ۷، نتایج حاصل از این مرحله را نشان می‌دهد که به توجه به این نتایج، اولاً مدل به تغییرات عمق تبخیر و تعرق بسیار حساس است و ثانیاً وقتی عمق تبخیر و تعرق به ۵۰ سانتی‌متر می‌رسد، میزان تغذیه صفر خواهد شد. وقتی عمق تبخیر و تعرق از ۲۰ سانتی‌متر به ۴۵ سانتی‌متر می‌رسد، میزان تغذیه از ۱۵ میلی‌متر در سال به ۰/۴۹ میلی‌متر در سال کاهش می‌یابد که نشان دهنده حساسیت بسیار بالای مدل به عمق تبخیر و تعرق است.

جدول ۸، میزان حساسیت مدل برای شاخص سطح برگ بین ۱ تا ۲ را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، میزان حساسیت مدل نسبت به افزایش شاخص سطح برگ در مقایسه با حساسیت آن نسبت به عمق تبخیر و تعرق، چندان بالا نمی‌باشد. به طوری که با دو برابر شدن شاخص سطح برگ، میزان تغذیه فقط ۰/۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد؛ در صورتی که با دو برابر شدن عمق تبخیر و تعرق، میزان تغذیه حدود ۹ میلی‌متر تغییر می‌نماید.

آمار درازمدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج به دست آمده است. میانگین سرعت باد منطقه، ۱۱/۳ کیلومتر بر ساعت و رطوبت نسبی در فصول مختلف، بین ۲۰ تا ۴۷ درصد متغیر می‌باشد. عرض جغرافیایی ایستگاه مورد نظر ۳۰/۲۵ درجه شمالی است که از این پارامتر جهت محاسبه تبخیر و تعرق استفاده می‌شود.

از میان پارامترهای جدول ۶، شاخص سطح برگ و عمق تبخیر و تعرق، جزء پارامترهایی هستند که با عدم قطعیت همراه می‌باشند. مقدار شاخص سطح برگ، بین صفر برای زمین عاری از پوشش گیاهی تا حداکثر پنج برای زمین با پوشش گیاهی کامل در نظر گرفته می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، با توجه به وضعیت پوشش گیاهی و نظرات کارشناسان، مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شد. در خصوص عمق تبخیر و تعرق، عوامل متعددی در مقدار این پارامتر مؤثر می‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد مقدار این پارامتر برای خاک‌های لومی بدون پوشش گیاهی، بین ۲۰ تا ۴۵ سانتی‌متر و برای خاک‌های لومی با پوشش گیاهی کامل، بین ۹۱ تا ۱۵۲ سانتی‌متر متغیر می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه، با توجه به این که میانگین بافت خاک برای کل پروفیل‌ها، لومی است و از طرفی هم وضعیت پوشش گیاهی ضعیف است، عمق تبخیر و تعرق، ۴۵ سانتی‌متر منظور شده است. اما با توجه به حساسیت زیاد مدل به این پارامتر، میزان تغذیه تحت سناریوهای مختلف این پارامتر برای کل آبخوان محاسبه شد.

جدول ۶- مقدار پارامترهای مدل HELP

پارامتر	مقدار	واحد
عرض جغرافیا	۳۰/۲۵	درجه شمالی
شاخص سطح برگ	۱	بدون بعد
عمق تبخیر و تعرق	۴۵	سانتی‌متر
متوسط سرعت باد	۱۱/۳	کیلومتر بر ساعت
رطوبت نسبی فصل زمستان	۴۷	درصد
رطوبت نسبی فصل بهار	۲۶	درصد
رطوبت نسبی فصل پاییز	۲۰	درصد
رطوبت نسبی فصل تابستان	۳۷	درصد

جدول ۷- میزان تغذیه تحت سناریوهای مختلف عمق تبخیر و تعرق با استفاده از مدل HELP در دوره پایه

عمق تبخیر و تعرق (سانتی‌متر)	۲۰	۳۰	۴۰	۴۵	۵۰	۶۰
میزان تغذیه (میلی‌متر در سال)	۱۴/۹۳	۶/۶	۲/۵۹	۰/۴۹	۰	۰
درصد از کل بارش سالانه	۱۰/۵۵	۴/۷	۲/۵۹	۳/۵	۰	۰
درصد تغییرات نسبت به عمق ۲۰ سانتی‌متر	۰	-۵۵	-۷۵	-۹۷	-	-

جدول ۸- میزان تغذیه تحت سناریوهای مختلف شاخص سح برگ با استفاده از مدل HELP در دوره پایه

شاخص سح برگ		
۲	۱/۵	۱
۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۴۹
میزان تغذیه (میلی متر در سال)		
۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۳۵
درصد نسبت به کل بارش		
۲۰	۱۲	۰
درصد تغییرات نسبت به شاخص برگ برابر با ۱		

پوشش سطح زمین می شود که اثر بازمانده در میزان تبخیر از سطح و درون خاک دارد. در واقع تغذیه در منطقه مورد مطالعه، در بازه زمانی بسیار کوتاهی و آن هم در فصل زمستان، زمان به خواب رفتن گیاه و عدم فعال بودن عوامل تبخیر و تعرق صورت می گیرد.

با استفاده از مدل HELP، میزان تغذیه منطقه مورد مطالعه در دوره پایه و دوره های آتی، تخمین زده شد. جدول ۹، میانگین وزنی تغذیه همراه با وضعیت بارندگی فصل زمستان (فصل بارش موثر در تغذیه) و درصد تغییرات تغذیه نسبت به دوره پایه را نشان می دهد.

با افزایش عمق تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ، میزان تغذیه سالانه به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. کاهش میزان تغذیه با افزایش عمق تبخیر و تعرق، به دلیل خروج آب از لایه های زیرین خاک ناشی از عمل تبخیر آب قبل از رسیدن آب به انتهای ناحیه ریشه می باشد. اما افزایش میزان تغذیه با افزایش شاخص سطح برگ در منطقه مورد مطالعه، به دلیل این است که در زمان ریزش های جوی در منطقه مورد مطالعه (فصل زمستان)، رشد گیاهان متوقف شده و در واقع توسط گیاه هیچگونه گیرش گیاهی، تعرق و مصرف آبی صورت نمی گیرد. اما افزایش لاشبرگ گیاهی، باعث افزایش هوموس خاک و

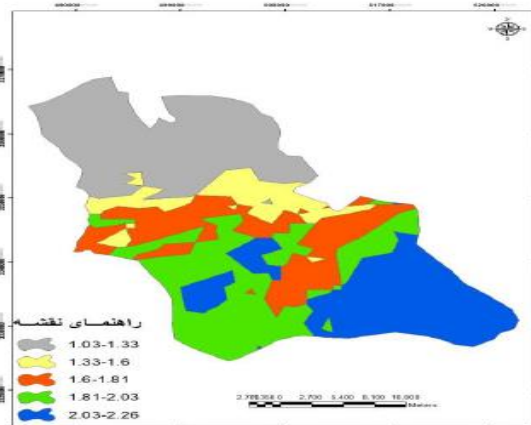
جدول ۹- میزان و درصد تغییرات تغذیه نسبت به کل بارش سالانه و نسبت به بارش فصل زمستان در دوره پایه و دوره های آتی

دوره	بارش (میلی متر در سال)	تغذیه (میلی متر در سال)	درصد تغذیه به کل بارش	درصد تغییرات تغذیه به دوره پایه	مقدار بارش فصل زمستان (میلی متر)	درصد بارش فصل زمستان به بارش کل سال
پایه	۱۴۱/۵	۱/۸۵	۱/۳	۰	۷۱/۱	۵۰/۲
۲۰۱۰-۲۰۳۹	۱۳۱/۱	۱/۶۸	۱/۲۹	-۹/۲	۸۱/۲	۶۲
۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۲۰/۴	۱/۵۷	۱/۳	-۱۵/۱	۷۲/۵	۶۰/۲
۲۰۷۰-۲۰۹۸	۱۱۶/۳	۱/۳۴	۱/۳۴	-۱۵/۶	۷۲/۷	۶۲/۵

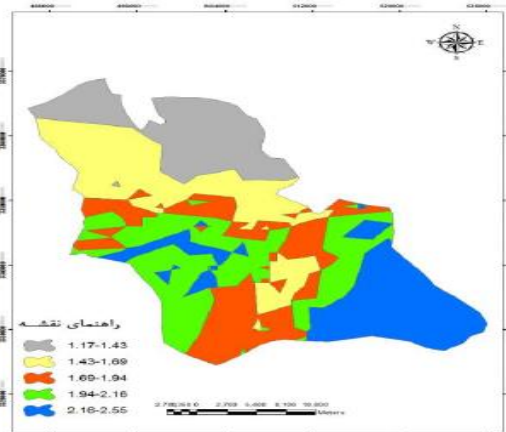
۱۵/۱ و ۱۵/۶ درصد کاهش پیدا می کند.

به منظور بررسی تغییرات مکانی تغذیه در حوزه آبخیز کرج، از روش زمین آماری کریجینگ استفاده شده و نقشه های توزیع مکانی تغذیه در حوزه آبخیز کرج برای دوره پایه و دوره های آتی، تهیه گردید (شکل ۵).

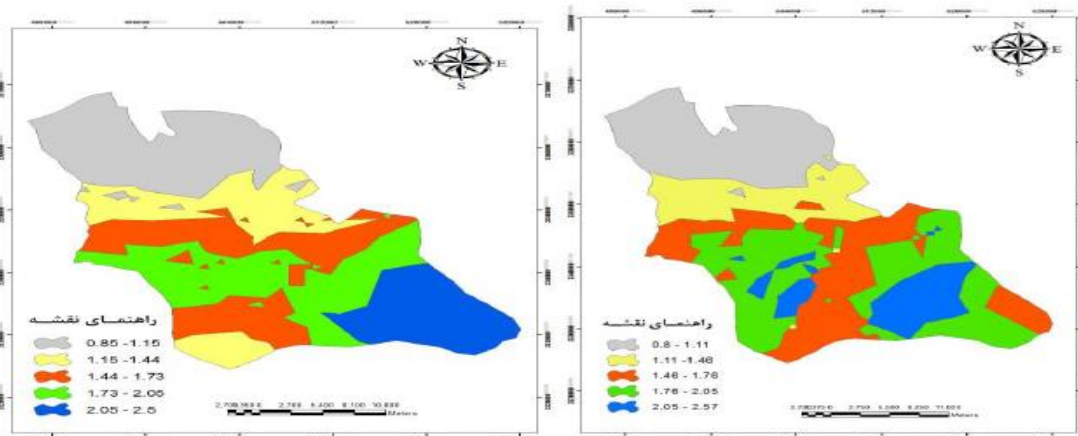
با توجه به نتایج مندرج در جدول ۹، میزان تغذیه حوضه نسبت به کل بارش سالانه بسیار پایین است. نتایج حاصل از شبیه سازی میزان تغذیه تحت سناریو منتخب A₂، حاکی از این بود که میزان تغذیه در دوره های (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۷۰-۲۰۹۸) نسبت به دوره پایه، به ترتیب ۹/۶،



ب



الف



د

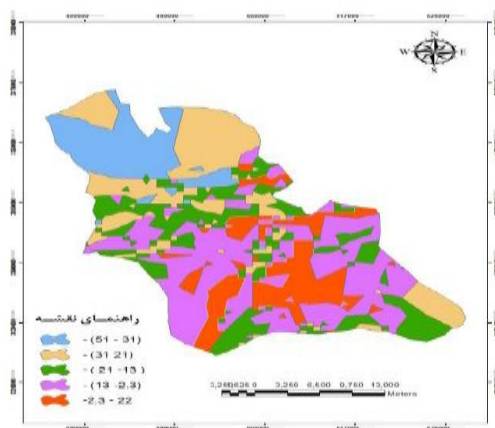
ج

شکل ۵- توزیع مکانی تغذیه در حوزه آبخیز کرج، (الف) دوره پایه، (ب) دوره (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (ج) دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (د) دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)

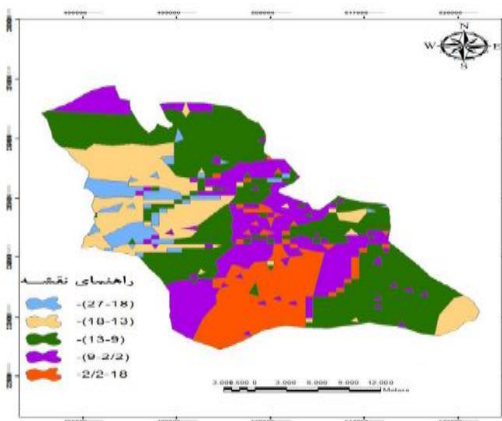
شیب نسبتاً تند، رسوبگذاری برحسب اندازه ذرات صورت می‌گیرد؛ به نحوی که رسوبات درشت دانه در دو طرف آبخوان نسبت به مرکز آبخوان، بیشتر می‌باشد. با نزدیک شدن به مرکز آبخوان، اندازه ذرات کوچکتر می‌شود. این مسأله می‌تواند نفوذپذیری و در نتیجه میزان تغذیه را کاهش دهد.

شکل ۶، درصد تغییرات مکانی تغذیه (نسبت به دوره پایه) را در هر یک از دوره‌ها نشان می‌دهند. کاهش میزان تغذیه در بخش‌های شمال غربی، جنوب و جنوب شرقی در دوره‌های آتی، به طور واضحی نمایان است.

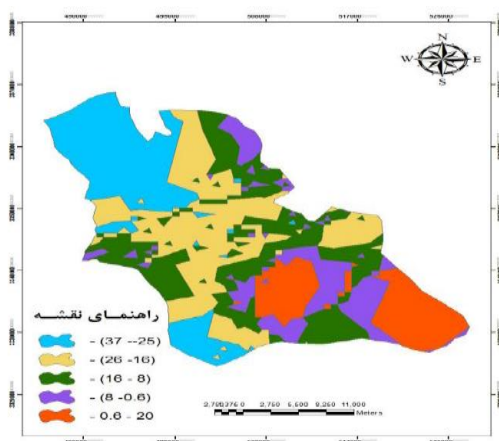
بر اساس نقشه توزیع مکانی تغذیه، میزان تغذیه از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی کاهش می‌یابد که این کاهش ناشی از نوع رسوبات و اندازه آنها می‌باشد. به طوری که هر چه از طرف جنوب شرقی به سمت شمال شرقی بیش می‌رویم، رسوبات ریزدانه‌تر و از نوع رس همراه با املاح خواهند شد. بنابراین ضریب نفوذپذیری آنها کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان تغذیه هم کاهش پیدا می‌کند. همچنین کمترین میزان تغذیه مربوط به خط میانی آبخوان از سمت جنوب غربی به سمت شمال غربی می‌باشد. علت این است که حوزه آبخیز کرج از دو طرف توسط ارتفاعات محصور شده است و به دلیل



ب



الف



ج

شکل ۶- درصد تغییرات مکانی تغذیه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه (الف) دوره (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (ب) دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (ج) دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دو مدل جهانی HadCM3 و CGCM1، اثر تغییر اقلیم روی میزان تغذیه حوزه آبخیز رودخانه کرج، مورد بررسی قرار گرفت. در راستای بررسی اثر تغییر متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش و تشعشعات خورشیدی به عنوان مهم‌ترین ورودی به اکوسیستم‌های طبیعی در مقیاس محلی (حوزه آبخیز کرج)، ابتدا با استفاده از خروجی حاصل از نتایج دو مدل جهانی HadCM3 و CGCM1 و استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، متغیرهای مذکور در سه دوره (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۸-۲۰۷۰) شبیه‌سازی شدند و سپس میزان تغییرات آنها نسبت به دوره پایه، مورد بررسی قرار گرفت.

در زمینه شاخص دمایی، نتایج ارزیابی نشان داد که مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی شاخص‌های دمایی، از دقت قابل قبولی برخوردار است. با توجه به میانگین خطای مطلق محاسبه شده برای شاخص‌های دمایی، نتایج مدل HadCM3 در زمینه شبیه‌سازی متوسط دمای روزانه و متوسط حداکثر دما، بهتر از نتایج مدل CGCM1 می‌باشد؛ اما در خصوص متوسط حداقل دما، نتایج برعکس می‌باشد. به دلیل این که هدف غایی این تحقیق محاسبه میزان تغذیه با استفاده از مدل HELP است و در این مدل متوسط دمای روزانه مورد نیاز است، لذا مبنای انتخاب مدل برتر، متوسط دمای روزانه می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دما نشان داد که در دوره‌های آبی، دما به‌طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. افزایش متوسط دما برای دوره‌های فوق

نسبت به دوره پایه بر اساس مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2، به ترتیب برابر با (۱/۵، ۱/۴۴)، (۲/۸، ۲/۴۳) و (۵/۵۵، ۳/۵) درصد می‌باشد. محدوده پیشنهادی برای افزایش متوسط دما تا سال ۲۱۰۰ بر اساس میانگین مدل‌های جهانی، بین ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد است (IPCC، ۱۹۹۷)؛ بر این اساس، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط هر دو سناریوی مدل HadCM3 در محدوده تغییرات جهانی افزایش متوسط دما می‌باشد. در خصوص مقایسه بین دو سناریوی A2 و B2، نتایج نشان داد که نتایج حاصل از سناریوی A2، مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهده‌ای دارند. نتایج حاصل از این بخش تحقیق، با نتایج تحقیق صمدی و همکاران (۲۰۱۹)، رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۷) و ساری صراف و جلالی عنصرودی (۱۳۹۸) مبنی بر افزایش متوسط دمای روزانه در دوره‌های آبی، مطابقت دارد.

در مورد بارش، نتایج ارزیابی حاکی از این بود که مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی بارش، از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که هیچکدام از متغیرهای خروجی مدل CGCM1 رابطه معنی‌داری با متغیر مستقل بارش ندارند. در خصوص پیش‌بینی متوسط بارندگی سالانه، مدل HadCM3 سناریو A2 از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی بارش، حکایت از آن دارد که مدل در خصوص شبیه‌سازی وقایع حدی بارش، از توانایی لازم برخوردار نیست؛ اما با توجه به این که هدف غایی این تحقیق استفاده از متوسط بارش روزانه به عنوان ورودی به مدل تغذیه می‌باشد نه وقایع حدی، لذا مدل در

تشعشات خورشیدی برخوردار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تشعشات خورشیدی در دوره‌های آتی، حکایت از افزایش روند تغییرات این متغیر در مقیاس سالانه دارد. در دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، مقدار این متغیر تحت سناریوی A₂، به ترتیب برابر است با ۲۰/۹، ۲۱/۱ و ۲۱/۳ مگاژول بر مترمربع در روز است. درصد تغییرات تشعشات خورشیدی در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه، به ترتیب برابر با ۰/۵، ۱/۴ و ۲/۴ درصد می‌باشد. اگر چه درصد تغییرات جزئی است؛ اما روند تغییرات صعودی است. در مقیاس فصلی به غیر از فصل زمستان، در سایر فصول سال، روند تغییرات تشعشات خورشیدی افزایشی می‌باشد. همچنین در مقیاس ماهانه، این متغیر در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر، دارای روند کاهش و برای سایر ماه‌های سال، دارای روند افزایشی است. بیشترین میزان افزایش مربوط به ماه اوت می‌باشد که نتیجه آن، افزایش بیشتر شدت تشعشات خورشیدی در فصل تابستان و کاهش آن در فصل زمستان خواهد بود. این پدیده منجر به اختلاف شدیدتر تغییرات آب و هوایی در فصول سرد و گرم سال خواهد شد که زمینه ایجاد ناهنجاری‌های اقلیمی بیشتری در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه را فراهم می‌کند. کاهش تشعشات خورشیدی در فصل زمستان را می‌توان ناشی از آلودگی هوا از یک طرف و وارونگی هوا از طرف دیگر، دانست.

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی میزان تغذیه حوضه، از مدل HELP استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل، این مدل به عمق تبخیر و تعرق حساسیت بالایی دارد. مدل به عمق ریشه بسیار حساس است و با افزایش عمق ریشه، میزان تغذیه به شدت کاهش پیدا می‌کند که این موضوع به دلیل فعال بودن عوامل تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه می‌باشد؛ به طوری که با افزایش عمق تبخیر و تعرق، میزان بیشتری از آب موجود در خاک به اتمسفر برمی‌گردد. بنابراین دقت در برآورد پارامتر عمق تبخیر و تعرق، از اهمیت زیادی برخوردار است. نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص حساسیت مدل HELP به عمق تبخیر و تعرق، با نتایج حاصل از تحقیق سبیک و آلن (۲۰۰۶)، رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۷) و ساری صراف و جلالی عنصرودی (۱۳۹۸) مطابقت دارد.

خصوص پیش‌بینی متوسط بارش روزانه، توانایی لازم را دارد. بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در دوره‌های آتی حاکی از این است که در هر سه دوره (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، روند تغییرات بارش کاهش است؛ به طوری که میزان بارش در سه دوره آتی، به ترتیب برابر با ۱۳۰، ۱۲۰ و ۱۱۶ میلی‌متر است. درصد تغییرات نسبت به دوره پایه، به ترتیب برابر با ۸/۱-، ۱۵/۱- و ۱۸- درصد می‌باشد. از نظر فصلی، کاهش میزان بارش، عموماً مربوط به فصل بهار است. بر اساس نتایج حاصل، پیش‌بینی می‌شود در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای تغییر اقلیم، بر اساس میزان بارش، بر شدت خشکی فصول خشک افزوده شود. بیشترین مقدار کاهش بارش، مربوط به ماه آوریل می‌باشد که در دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، نسبت به دوره پایه، بیش از ۵۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. البته بخشی از این کاهش، ناشی از توانایی مدل در شبیه‌سازی بارش در فصل بهار است که آن را می‌توان ناشی از آشفته‌گی‌های آب و هوایی در این فصل در منطقه مورد مطالعه دانست. لازم به ذکر است که اگر چه درصد افزایش در ماه سپتامبر در هر سه دوره آتی قابل ملاحظه است، اما به دلیل کمبود میزان مطلق بارش در این ماه (۰/۱ میلی‌متر در دوره مشاهده‌ای)، تأثیر چندانی در بارش سالانه نخواهد داشت. کاهش بارش در اوایل فصول بهار و تابستان، سبب خشکی بیش از حد منطقه در دوره‌های آتی خواهد شد. به‌طورکلی از ماه مارس تا اوت در هر سه دوره آتی، با کاهش بارش روبرو هستیم که روند کاهش در حال افزایش است و در دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، به حداکثر خود می‌رسد. نتایج حاصل از این بخش تحقیق، همسو با نتایج تحقیق صمدی و همکاران (۲۰۱۹)، رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۷) و ساری صراف و جلالی عنصرودی (۱۳۹۸) مبنی بر کاهش متوسط بارش روزانه در دوره‌های آتی، می‌باشد.

در زمینه تشعشات خورشیدی، نتایج ارزیابی نشان داد که مدل ریزمقیاس نمایی SDSM از دقت مناسبی برای ریزمقیاس نمایی تشعشات خورشیدی برخوردار است. نتایج حاکی از این بود که هیچ‌کدام از متغیرهای خروجی مدل CGCM1، رابطه معنی‌داری با متغیر مستقل تشعشات خورشیدی ندارند. همچنین با توجه به شاخص‌های آماری و گرافیکی، مدل SDSM تحت سناریوی A₂، از توانایی لازم به منظور شبیه‌سازی

بررسی میزان تغذیه حوضه نسبت به کل بارش سالانه، حاکی از این بود که میزان تغذیه نسبت به بارش، بسیار پایین است. متوسط میزان وزنی تغذیه برای دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، به ترتیب معادل ۱/۸۵، ۱/۶۸، ۱/۵۷ و ۱/۵۶ میلی‌متر در سال می‌باشد که به ترتیب معادل ۱/۳، ۱/۲۹، ۱/۳ و ۱/۳۴ درصد از کل بارش سالانه است. شرایط خشک اقلیمی حاکم بر حوزه آبخیز کرج مانند سایر مناطق خشک، باعث می‌شود نزولات جوی قبل از عبور از ناحیه ریشه، توسط عوامل تبخیر و تعرق دوباره به اتمسفر برگردند. کاهش میزان تغذیه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه را می‌توان ناشی از افزایش دما و کاهش بارش دانست. اما روند کاهش میزان تغذیه، از یک روند ثابتی در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه برخوردار نیست. برای مثال از دوره پایه تا دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰)، میزان تغذیه از یک روند کاهشی تندی برخوردار است. درصد تغییرات تغذیه در دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰) و (۲۰۶۹-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه، به ترتیب برابر ۹/۲- و ۱۵- درصد است. اما درصد تغییرات از دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰) تا دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، با روند کندتری صورت می‌گیرد. به‌ویژه درصد تغییرات تغذیه در دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰) نسبت به دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰)، فقط ۱- درصد است. از طرفی هم نگاهی به درصد تغذیه سالانه نسبت به کل بارش سالانه در دوره‌های مختلف، نشان می‌دهد که نه تنها میزان تغذیه روند نزولی ندارد، بلکه در بعضی موارد روند صعودی هم دارد. به عنوان مثال در دوره (۲۰۹۸-۲۰۷۰)، ۱/۳۴ درصد کل بارش به آب‌های زیرزمینی خواهد پیوست؛ در حالی که در دوره پایه، ۱/۳ درصد کل بارش به تغذیه تبدیل می‌شود. این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش نسبی بارش و کاهش تشعشعات خورشیدی در فصل زمستان دانست. یعنی این که علی‌رغم کاهش میزان بارش و افزایش تشعشعات خورشیدی در مقیاس سالانه در فصل زمستان، این دو متغیر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند که می‌تواند بخشی از عوامل تبخیر و تعرق ناشی از افزایش دما را تعدیل نمایند. بنابراین میزان تغذیه در دهه‌های آبی، تحت تاثیر دو گروه متغیر اقلیمی افزایشی و کاهشی قرار خواهد گرفت که مقدار و میزان این دو گروه از عوامل، تعیین کننده اصلی مقدار تغذیه می‌باشند. به

طوری که کاهش میزان تشعشعات خورشیدی همراه با افزایش میزان بارش فصل زمستان، به عنوان عوامل افزایشی در میزان تغذیه عمل می‌کنند و افزایش دمای فصل زمستان و کل سال، به عنوان عوامل کاهشی در فرآیند تغذیه عمل می‌نمایند. برآیند این دو گروه از عوامل، تعیین کننده میزان و درصد تغییرات تغذیه در دهه‌های آبی می‌باشد. نتایج این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیقات لیترمی و مالانتز (۲۰۱۹)، نادریانفر (۱۳۹۰)، رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۷) و ساری صراف و جلالی عنصرودی (۱۳۹۸) مطابقت دارد؛ آنها نیز این نتیجه رسیده‌اند که تغییر اقلیم باعث کاهش میزان تغذیه حوزه های آبخیز رودخانه می‌گردد و مهمترین دلیل کاهش میزان تغذیه، افزایش دما و کاهش بارش می‌باشد. اما نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق سیبک و آلن (۲۰۰۶)، توز و همکاران (۲۰۱۷)، نینچی و باتیلان (۲۰۱۹) و بیگی و همکاران (۱۳۹۷) همسو نمی‌باشد؛ آنها بیان نموده‌اند که میزان تغذیه تحت شرایط تغییر اقلیم در دهه‌های آبی، افزایش می‌یابد که مهمترین دلیل آن، افزایش قابل توجه بارش در ماه‌های مرطوب و یا ذوب یخ و برف موجود در خاک به دلیل افزایش دما می‌باشد.

میزان تغذیه در نقاط مختلف حوزه آبخیز کرج در شرایط فعلی و آبی، بسیار متفاوت می‌باشد. حداکثر میزان تغذیه در مقیاس نقطه‌ای مربوط به بخش‌های جنوب شرقی حوضه با بافت نسبتاً سبک و ضریب نفوذپذیری نسبتاً بالا می‌باشد. حداقل میزان تغذیه عموماً مربوط به بخش شمال و شمال غرب حوضه است که دارای خاک‌های سنگین با نفوذپذیری کم می‌باشند. بنابراین هرچه به سمت شمال و شمال غرب حوضه پیش می‌رویم، رسوبات ریزدانه‌تر و در نتیجه ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. کاهش نفوذپذیری، سبب می‌شود که رطوبت مازاد بر ظرفیت مزرعه قبل از زهکشی از طریق نیروی ثقل و عبور از ناحیه ریشه، توسط عوامل تبخیر و تعرق دوباره به اتمسفر برگردند. یا این که با سنگین شدن بافت خاک، میزان زیادی از آب در درون خاک به صورت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی نگهداری می‌شود.

منابع

بیگی، ا. (۱۳۹۷) بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن زمین بر تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی

- IPCC. (1997) The regional impact of climate change: an assessment of vulnerability: A Special Report of IPCC working group II, 17 P.
- Jana, B. K. and Majumder M., (2019) Impact of climate change on Natural Resource management, Springer, 2010th Edition, 730 p.
- Jyrkama, M.I., Sykes. J.F. and S.D. Normam (2014) Recharge estimation for transient groundwater modelling, *Ground Water*, 40(6):639-649.
- Koukidis, E. N. and . A. A. Berg (2019) Sensitivity of statistical downscaling model (SDSM) to reanalysis products, *Atmosphere ocean*, 47(1):1-18.
- Nyenje, P. M., and Batelaan. O. (2019) Estimating the effects of climate change on groundwater recharge and baseflow in the upper Ssezibwa catchment, *Uganda Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 54(4):713-726.
- Samadi, S. Z., Mahdavi, M., Sharifi, F. and Bihamta, M. R. (2019) Methodology for selecting the best predictor for climate change impact assessment in Karkheh Basin Iran, *Journal of Environmental Science and Engineering*, 51(4): 249-256.
- Scanlon, B.R., Keese. K.E., Flint. AL., Flint. L.E., Gaye. C.B., Edmunds. W.M. and I. Simmers (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions, *Hydrological Processes*, 20(1):3335-3370.
- Scibek, J., Allen, D. M. (2006) Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels . *Water Resources Research*, 42(11): 1-18.
- Toews, M. W. (2017) Modelling Climate Change Impacts on Groundwater Recharge an a Semi-Arid Region Southern Okanagan, British Columbia, MSc Thesis, Simon Fraser University, 227P.
- Wilby, R. L and W. C. Dawson (2017) SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, SDSM manual version 4.2., Environment Agency of England and Wales:94 pp.
- (مطالعه موردی: حوزه آبریز کرخه). پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۲۹ صفحه.
- رضایی بنفشه، م.، جلالی عنصرودی، ط. و م.ع. حسن‌پور اقدم بگلو (۱۳۹۷) بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات زمانی تغذیه آب زیرزمینی حوزه آبریز تسوج، فضای جغرافیایی، ۱۸ (۶۱):۲۵۵-۲۶۹.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان تهران، دفتر مطالعات منابع آب (۱۳۹۰) سیمای منابع و مصرف آب در استان تهران. ۳۲ صفحه.
- صراف ساری، ب. و ط. جلالی عنصرودی (۱۳۹۸) بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر موازنه ی آبی ناشی از بارش در آبخوان تسوج برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۷، هیدروژئومورفولوژی، ۱۹(۱۹):۱۶۳-۱۸۵.
- نادریانفر، م. انصاری، ح. ضیایی، ع. ن. و داوری. ک. (۱۳۹۰) بررسی روند تغییرات نوسانات آب زیرزمینی در حوزه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف، مهندسی انجمن آبیاری و آب ایران، ۱(۳):۲۲-۳۷.
- Crosbie, R. S., Scanlon. B. R., Mpelasoka. F. S., Reedy. R. C., Gates. J. B., and Zhang. L. (2013) Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA, *Water Resource Research*, 49(7):1-16.
- Healy, R. W. (2018) Estimating groundwater recharge, Cambridge University Press, United Kingdom, 244 P.

Evaluating the effects of climate change on the amount of groundwater recharge in Karaj Watershed

Baharak Motamedvaziri^{1*}, Hadi Kiadaliri², Amir Eshaghi³ and Ali Eskandari⁴

- 1) Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *Corresponding author
Email Address: bmvaziri@gmail.com
- 2) Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 3) PhD Graduated in Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 4) MSc Graduated in Natural Resources Engineering- Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Date of Submission: 2021/04/22

Date of Acceptance: 2021/08/09

Abstract

Climate change is one of the most important challenges that influencing natural ecosystems and have different effects on precipitation, temperature, intensity and frequency of droughts and floods and hydrological parameters of watersheds. The purpose of this study is to investigate the effect of climate change on the trend of changes in temperature, precipitation and solar radiation and also to determine the effect of changes in these variables on the recharge of the Karaj watershed. In this study first using the outputs of the two HadCM3 and CGCM1 global models, and using SDSM micro-scale model, climatic variables were simulated for three decades (2010- 2039, 2040-2069 and 2070-2098). In the next step, using HELP model, the rate of groundwater recharge was estimated and the effect of changing these variables on the amount of natural recharge was investigated. Also the results showed that this model is highly sensitive to evapotranspiration. Result of simulating climatic variables under A₂ climate change scenario show that in future decades, amount of temperature, precipitation and solar radiation will be increase (1.5, 2.8 and 4.55 percent), decrease (8.1, 15.1 and 18 percent) and increase (0.5, 1.4 and 2.4 percent), respectively. Result of simulating the amount of groundwater recharge using model under A₂ climate change scenario show that in future decades, amount of groundwater recharge will be decrease (9.6, 15.1 and 15.6 percent). Also research result show that HELP model is highly sensitive to evapotranspiration amount.

Keywords: Climate change, Groundwater recharge, HELP, Karaj watershed, SDSM.