

در شمال شرق ایران در سه استان گلستان، خراسان شمالی و سمنان واقع شده است که مساحت آن حدود ۱۱۲۲۰ کیلومترمربع است. منطقه مورد مطالعه منبع مهم تأمین آب برای بخش‌های خانگی، کشاورزی، صنعت و محیط‌زیست در استان گلستان است و لذا بررسی وضعیت منابع آب در این منطقه در دوره آینده دارای اهمیت است.

مواد و روش‌ها

برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) داده‌های مدل بزرگ مقیاس اقلیمی CanESM2 تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 تهیه شد. سپس، این داده‌ها توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در سطح ایستگاه‌های اندازه‌گیری اقلیمی ریزمقیاس شدند. برای بارش ۱۲ ایستگاه اقلیمی و برای دمای حداقل و دمای حداکثر نه ایستگاه اقلیمی در نظر گرفته شد. نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و نرم‌افزار IDRISI تهیه شد. سپس، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از ابزار Land Change Modeler (LCM) در نرم افزار TerrSet انجام شد. میزان جمعیت در حوضه رودخانه گرگانرود و نیز تقاضای آب در بخش‌های خانگی، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست برای دوره آینده پیش‌بینی شد. سپس، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS SMA با استفاده از داده‌های بارش و رواناب دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۷ میلادی واسنجی و برای ژانویه ۲۰۱۳ تا مارس ۲۰۱۴ اعتبارسنجی شد. مدل هیدرولوژیکی واسنجی و اعتبارسنجی شده برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی (رواناب، تغذیه آب زیرزمینی، حجم جریان‌های ورودی، خروجی و ذخیره در مخازن سد) در شرایط تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، مقدار شاخص تنش تأمین آب (WaSSI) از تقسیم تقاضای آب به عرضه آب تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به دست آمد و با شرایط گذشته مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی‌ها نشان می‌دهد که میانگین وزنی شاخص تنش تأمین آب از ۱/۰۰۳ برای دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۴۵ به ۱/۰۳۳ برای دوره ۱۳۹۰-۱۳۴۵ افزایش یافته است. بررسی تغییر اقلیم تغییراتی را در میزان بارش، حداقل و حداکثر دما در ایستگاه‌های مختلف اقلیمی تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم در همه ایستگاه‌های اقلیمی یکسان نیست. پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی، نشان‌دهنده کاهش سطح اراضی

پیش‌بینی شاخص تنش تأمین آب (WaSSI) تحت سناریوهای ترکیبی تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و رشد جمعیت در حوضه رودخانه گرگانرود، استان گلستان

دیا غنچه‌پور^۱، امیر سعدالدین^۲، عبدالرضا بهره‌مند^۳، آنتونی جیکمن^۴، عبدالرسول سلمان‌ماهینی^۵، پری کروک^۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

<https://doi.org/10.22034/18.67.5>

چکیده مبسوط مقدمه

تغییر اقلیم می‌تواند تغییراتی در میزان و الگوی بارش، دما و تبخیر و تعرق ایجاد کند که بر قابلیت دسترسی منابع آب تأثیر می‌گذارد، فراوانی و شدت سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها را افزایش می‌دهد، موجب تخریب بوم‌سازگانی می‌شود که خود عامل حفظ کیفیت آب است و همچنین موجب تغییر دینامیک رواناب می‌شود. از طرف دیگر، تغییر پوشش زمین و افزایش جمعیت نیز بر سیستم هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد. شناخت پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به تغییر فیزیکی (کاربری اراضی) و اقلیمی (بارش و دما) و کمی کردن تغییر بیان آب ناشی از تغییرات محیطی برای توسعه پایدار منابع آب حائز اهمیت بسیار است و مؤلفه مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب است. هدف پژوهش حاضر مدیریت عرضه و تقاضای آب در آینده در شرایط تغییر در مقیاس حوضه رودخانه است. در راستای این هدف، وضعیت عرضه و تقاضای آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت ارزیابی شد. حوضه رودخانه گرگانرود

- ۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۲- استاد (نویسنده مسئول)، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران amir.sadoddin@gau.ac.ir، تلفن (نمابر): ۰۱۷۳۲۴۳۶۴۰۸
- ۳- استاد، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
- ۴- استاد، دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا، استرالیا
- ۵- استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۶- دانشیار، دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا، استرالیا

زراعی و تبدیل آن‌ها به مناطق مسکونی است. علاوه بر این، تبدیل جنگل‌های متراکم به جنگل‌های نیمه‌متراکم و مراتع قابل توجه است. پیش‌بینی تغییر جمعیت و تقاضای آب نشان‌دهنده افزایش این متغیرها است. مقایسه میانگین آبدهی سالانه در گذشته (۲۰۱۷-۲۰۰۶) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا نشان می‌دهد که این متغیر تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب دارای مقادیر ۲۰۷/۰۳۸ و ۲۱۰/۸ میلیون مترمکعب خواهد بود که بطور قابل توجهی بیش از مقدار آن در دوره گذشته با میزان ۱۷۹/۶۴ میلیون مترمکعب است. مجموع مؤلفه‌های عرضه آب به ازای سناریوی RCP2.6 برابر با ۹۳۰/۴۹ و به ازای سناریوی RCP8.5 برابر با ۹۳۵/۸۵ میلیون مترمکعب است. مجموع مؤلفه‌های تقاضای آب به ازای سناریوی RCP2.6 برابر با ۱۴۹۵/۰۴ و به ازای سناریوی RCP8.5 برابر با ۱۳۷۹/۲ میلیون مترمکعب است. مقدار میانه WaSSI در آینده تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۶۱ و ۱/۴۵ پیش‌بینی شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت بر منابع آب حوضه رودخانه گرگانرود مورد بررسی قرار گرفت. با محاسبه شاخص تنش تأمین آب مشخص شد که بر مبنای شاخص استفاده شده، نبود امنیت آبی در دوره آینده در حوضه رودخانه گرگانرود به عنوان یک چالش مطرح خواهد بود. در مدیریت منابع آب باید بر هر دو سمت عرضه و تقاضای آب تمرکز شود. اما، از آنجا که امکان مدیریت عرضه آب کمتر وجود دارد، لازم است تمرکز بیشتری بر مدیریت تقاضای آب صورت گیرد. در همین راستا، باید به دنبال راهکارهایی بود که امکان اجرایی شدن آن‌ها بیشتر باشد. گزینه‌های مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی مانند تغییر الگوی کشت، تغییر تاریخ کشت، کاهش ضایعات بخش کشاورزی و کاهش تبخیر از سطح خاک از جمله راهکارهای مناسب در زمینه مدیریت تقاضای آب هستند. همچنین، مشاهده تغییرات کاربری اراضی و به ویژه افزایش سطح اراضی مسکونی و کاهش سطح جنگل‌های متراکم در این پژوهش هشدار است برای سیاست‌گذاران، تصمیم‌گیرندگان، مدیران و بخش‌های اجرایی به منظور حفاظت بیشتر از منابع طبیعی و مدیریت توسعه اراضی مسکونی. روش‌شناسی و خروجی‌های این پژوهش می‌تواند برای تصمیم‌گیران و مدیران منابع آب در شرایط تغییر و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن، در حوضه رودخانه گرگانرود و شرایط مشابه مفید باشد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی، تغییر جمعیت، شاخص تنش تأمین آب، حوضه رودخانه گرگانرود

مقدمه

امروزه در خصوص اینکه زمین دستخوش چرخه‌ای از تغییر اقلیم می‌شود اتفاق نظر وجود دارد، اگرچه عدم قطعیت‌هایی نیز در این خصوص وجود دارد [۳۶]. تغییر اقلیم می‌تواند تغییراتی در میزان و الگوی بارش، دما و تبخیر و تعرق ایجاد کند که بر قابلیت

دسترسی منابع آب تأثیر می‌گذارد، فراوانی و شدت سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها را افزایش می‌دهد، موجب تخریب بوم‌سازگانی می‌شود که خود عامل حفظ کیفیت آب است و همچنین موجب تغییر دینامیک رواناب می‌شود [۲۵، ۳۵]. از طرف دیگر، تغییر پوشش زمین و افزایش جمعیت نیز بر سیستم هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد [۲۲]. بنابراین مشکلات ناشی از تغییر اقلیم با رشد سریع جمعیت و تبدیل بدون برنامه اراضی زارعی به مناطق مسکونی بدتر می‌شود [۴]. ارزیابی آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف در برابر تغییر اقلیم، در تعیین اقدامات سازگاری مناسب برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم در مقیاس حوضه رودخانه اهمیت زیادی دارد [۳]. با توجه به تشدید اثرات تغییر اقلیم در کنار تغییر کاربری اراضی و افزایش جمعیت، در ارزیابی اثر تغییر اقلیم باید جنبه‌های بسیاری را در نظر گرفت که از سناریوهای توسعه مانند تغییرات کاربری اراضی، مستقل نیست [۲۲]. شناخت بهتر پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به تغییر فیزیکی (کاربری اراضی) و اقلیمی (بارش و دما) و کمی کردن تغییر بیلان آب ناشی از تغییرات محیطی برای توسعه پایدار منابع آب حائز اهمیت بسیار است و مؤلفه مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب بوده و در برنامه‌ریزی و مدیریت بلندمدت منابع آب و نیز کاهش اثرات منفی آن‌ها اهمیت بسیاری دارد [۲۸، ۴۶]. در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت بر منابع آب به صورت مجزا [۱، ۲، ۱۸، ۲۱] و همچنین بررسی اثر توأم تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر منابع آب [۶، ۱۴، ۲۳، ۳۸] مطالعات زیادی از گذشته تا کنون انجام شده است. اما در زمینه ارزیابی اثر هم‌زمان تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت بر منابع آب پژوهش‌های محدودی [۴، ۲۲، ۳۳، ۳۴، ۴۰، ۴۱، ۴۳، ۴۶] در خارج از کشور انجام شده است. اوجدا الیوارس و همکاران [۳۳] اثر افزایش جمعیت، تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در زیرحوضه آلتو-آتویاک واقع در مکزیک را بررسی نمودند. تبخیر و تعرق (با استفاده از مدل HELP3.5) و رواناب (با استفاده از USDA-SCS-CN) برای داده‌های اقلیمی دوره تاریخی و برای داده‌های تولید شده توسط سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 برای افق‌های زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۵، ۲۰۶۹-۲۰۴۵، و ۲۰۹۹-۲۰۷۵ محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش دمای میانگین سالانه، افزایش سطح مناطق شهری، افزایش مصرف آب شهری در پی افزایش جمعیت و کاهش حجم آب زیرزمینی بود. ونگ و همکاران [۴۳] نشان دادند که افزایش دما تحت سناریوی اقلیمی RCP4.5، افزایش جمعیت و افزایش توسعه شهری موجب افزایش تقاضای آب در بخش خانگی می‌شود. اکلو و همکاران [۳۴] اثر رشد جمعیت حاصل از تغییر کاربری اراضی که به دلیل توسعه شهری اتفاق می‌افتد و نیز اثر تغییر اقلیم بر وضعیت آینده منابع آب آشامیدنی جزیره لامو در کنیا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که رشد جمعیت ناشی از تغییر کاربری اراضی، نیروی پیشران مهم‌تری نسبت به تغییر اقلیم در تأثیر بر قابلیت دسترسی

آب آشامیدنی است. البکری و همکاران [۴] اثرات تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و افزایش جمعیت در رابطه با امنیت آب و غذا در اردن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مشکلات کمبود آب و عدم امنیت غذایی با تغییر اقلیم و افزایش جمعیت تشدید می‌یابد. ون‌تی و همکاران [۴۱] به ارزیابی مبتنی بر سناریوی تغییرات کاربری/ پوشش اراضی و اقلیم بر منابع آب و تقاضای آب در حوضه رودخانه سریپوک^۱ در ویتنام^۲ و کامبوج^۳ پرداختند. برای پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در آینده، از مدل HEC-HMS واسنجی شده استفاده شد. بر اساس نتایج حاصله، با افزایش بارش در آینده رواناب سطحی افزایش خواهد داشت. تغییر پوشش/ کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر تقاضای آب داشت و بنابراین قابلیت دسترسی آب در آینده کاهش یافت. سان و همکاران [۴۰] به ارزیابی اثرات بلندمدت تغییرات پیش‌بینی‌شده اقلیم، جمعیت، کاربری اراضی و پوشش اراضی، و قابلیت دسترسی آب زیرزمینی بر منابع آب منطقه‌ای در ایالات متحده آمریکا پرداختند. شاخص تنش تأمین آب (WaSSI)^۴ برای ارزیابی شرایط تنش آب در ماه، سال، و دهه برای واحد هیدرولوژیکی کد هشت رقمی در ۴۸ ایالت پایینی توسعه داده شد. بر اساس نتایج، افزایش ۵۰ درصدی جمعیت اثر بسیار زیادی بر عرضه آب در مناطق شهری بزرگ داشت و فارغ از تغییر اقلیم می‌توانست مشکلات کمبود آب را ایجاد کند. همچنین سان و همکاران نتیجه گرفتند که اثر تغییر کاربری اراضی بر منابع آب و ارتباط عرضه و تقاضای آب کم بود. در مقابل، اثر تغییر اقلیم بیشترین تأثیر را بر عرضه و تقاضای آب منطقه‌ای داشت.

بررسی منابع در دسترس و موجود در پایگاه‌های اطلاعات علمی معتبر و مرجع داخلی نشان داد که بررسی اثر هم‌زمان عوامل مؤثر بر منابع آب همچون تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت مورد توجه پژوهش‌های پیشین قرار نگرفته است؛ این در حالی است که ایران به دلیل واقع شدن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و همچنین با رشد روزافزون مصارف آب، در سال‌های آتی با خطر بروز بحران آب مواجه است [۲۶]. ایران با سرانه آب تجدیدپذیر ۱۵۶۰ مترمکعب از تنش آبی رنج می‌برد. شاخص تنش آبی در برخی از مناطق کشور به طور قابل توجهی کمتر از میانگین سالانه کشور است و این به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک در ایران است که با بارش کم و تبخیر زیاد مشخص می‌شود [۹]. حوضه رودخانه گرگانرود واقع در شمال شرق ایران منبع مهم تأمین آب برای بخش‌های خانگی، کشاورزی، صنعت و محیط‌زیست در استان گلستان است و لذا مطالعه وضعیت منابع آب در این حوضه در راستای حفظ منابع آب و توسعه پایدار منابع آب دارای اهمیت است. لذا، پژوهش حاضر با هدف اصلی مدیریت منابع آب در

حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر در آینده، به بررسی اثرات تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی، و تغییر جمعیت بر شاخص تنش تأمین آب^۵ [۴۰] در حوضه رودخانه گرگانرود می‌پردازد. مطالعات در زمینه بررسی اثر هم‌زمان عوامل مؤثر بر منابع آب همچون تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت در خارج از کشور به صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است و در کشور ایران تاکنون توسط پژوهش‌های پیشین مورد مطالعه قرار نگرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در حوضه رودخانه گرگانرود (شکل ۱) با وسعتی حدود ۱۱۲۲۵ کیلومترمربع انجام شد. حوضه رودخانه گرگانرود دارای انشعابات آبراهه‌ای کوچک و متوسط متعددی است که همگی پس از طی مسافتی به هم پیوسته و رودخانه گرگانرود را تشکیل می‌دهند. میانگین سالانه بارش در حوضه از حدود ۳۰۰ میلی‌متر در کناره‌های جنوبی و شمالی حوضه تا ۱۰۰۰ میلی‌متر در بخش مرکزی آن متغیر است. میانگین سالانه دما در این حوضه از حدود ۱۷ درجه سانتی‌گراد در نواحی کم ارتفاع تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات جنوبی متغیر است [۳۱]. حوضه رودخانه گرگانرود منبع مهم تأمین آب شرب، کشاورزی، و صنعت برای ساکنان حوضه است [۷] و لذا مطالعه وضعیت منابع آب در این حوضه در شرایط تغییر در آینده، اهمیت می‌یابد.

مدل SDSM

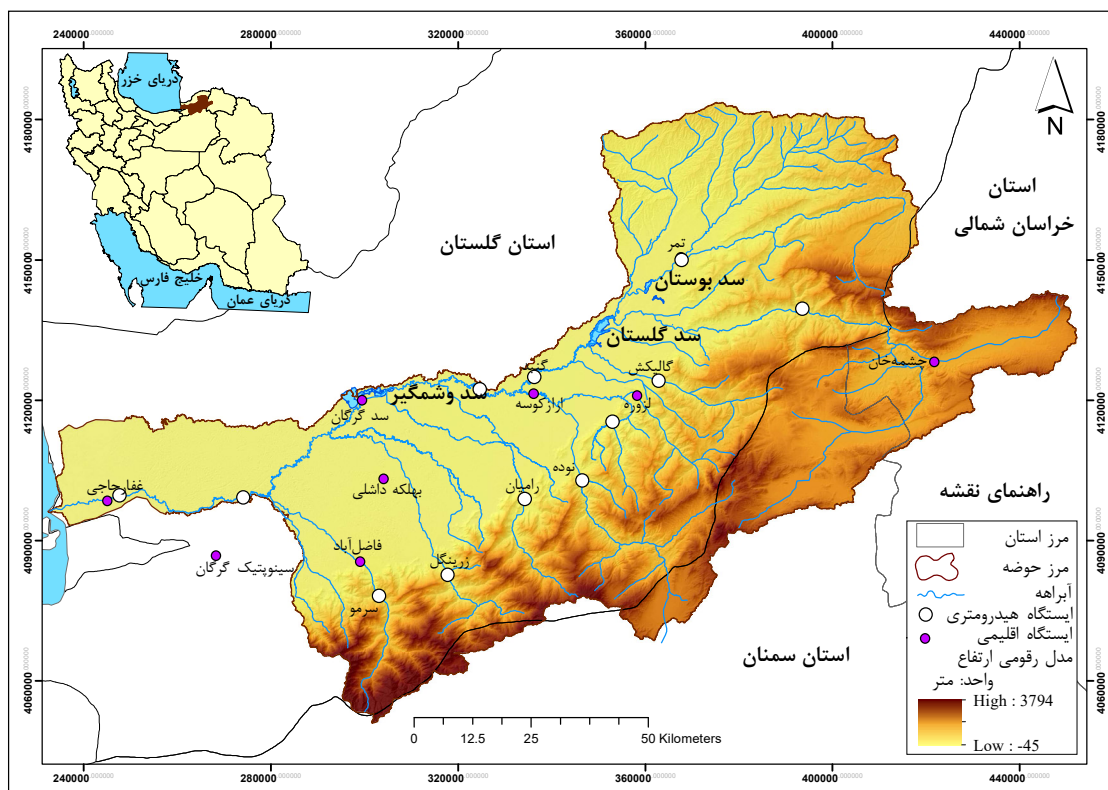
مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) که توسط Wilby و همکاران [۴۴] توسعه داده شد تلفیقی از تولیدکننده آماری آب و هوا^۶ (SWG) و رگرسیون خطی چندگانه^۷ (MLR) است. SDSM یک ابزار پشتیبان تصمیم است که با ممکن ساختن فرایند ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل‌های اقلیمی جهانی بزرگ‌مقیاس، ارزیابی اثرات منطقه‌ای گرمایش جهانی را تسهیل می‌سازد [۱۶]. مبنای این مدل، رگرسیون چند متغیره است و پارامترهای اقلیمی چون بارش و دما را در درازمدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی (متغیرهای NCEP)^۸ پیش‌بینی می‌کند. مدل SDSM در پیش‌یابی سناریوهای انتشار مختلف کاملاً کارآمد است و در عین حال به دلیل ابزارهای رایگان در دسترس مورد استفاده برای تفسیر، به محاسبات ساده‌ای نیاز دارد [۱۳]. این مدل به خوبی شناخته شده است و بطور گسترده‌ای در مطالعه اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده واقع شده است [۱۷].

ابزار LCM

LCM یکی از مدل‌های جدید است که برای تحلیل تبدیلات

5. Water Supply Stress Index (WaSSI)
6. Statistical Weather Generator (SWG)
7. Multiple Linear Regression (MLR)
8. National Center for Environmental Prediction

1. Srepok
2. Vietnam
3. Cambodia
4. Water Supply Stress Index



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه رودخانه گرگانرود در شمال ایران و استان گلستان، خراسان شمالی، و سمنان

Fig 1. Location of the Gorganrud River Basin in the North of Iran and in Golestan, North Khorasan and Semnan

رودخانه‌ای به کار رود [۱۰]. سپاه مهندسی ارتش ایالات متحده^۳، نرم‌افزار مرکز مهندسی هیدرولوژی^۴ را در سال ۱۹۶۴ توسعه داد. مدل HEC-HMS SMA با استفاده از یک سری لایه‌های ذخیره‌کننده، حوزه آبخیز را تبیین می‌کند [۲۷، ۴۷]. در الگوریتم SMA بارش به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شود. مدل تلفات SMA حرکت آب در طی زمان از طریق مؤلفه‌های ذخیره مختلف که نشان‌دهنده جنبه‌های فیزیکی حوزه آبخیز است را شبیه‌سازی می‌کند [۱۲]. با توجه به بارش و تبخیر و تعرق بالقوه، این مدل رواناب سطحی حوضه، جریان آب زیرزمینی، تلفات ناشی از تبخیر و تعرق، و نفوذ عمقی در کل حوضه را محاسبه می‌کند [۱۵].

مراحل انجام پژوهش

الف- پیش‌بینی اقلیم

در این پژوهش، برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و تغییر جمعیت بر شاخص تنش تأمین آب در حوضه رودخانه گرگانرود، پیش‌بینی اقلیم برای دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰ میلادی)، با استفاده از داده‌های مدل بزرگ‌مقیاس جهانی CanESM2 تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 و ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها از طریق مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) انجام شد. داده‌های مورد استفاده برای ریزمقیاس‌نمایی در این پژوهش شامل متغیر اقلیمی

پوشش زمین و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در آینده، تکامل یافته و مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد. LCM شامل ابزارهایی هوشمند است که پیچیدگی تحلیل تغییر کاربری اراضی، مدیریت منابع و ارزیابی خودکار سکونتگاه را مدیریت می‌کنند. این مدل قادر است سناریوهای تغییر کاربری اراضی را با تلفیق عوامل زیستی، فیزیکی، و اجتماعی-اقتصادی مؤثر بر تغییر کاربری اراضی ایجاد کند. LCM در سیستم‌های نرم‌افزاری IDRISI و TerrSet به صورت یک برنامه عمودی^۱ تعبیه شده است [۳۹] و این امکان را به کاربر می‌دهد که به‌طور سریع تغییرات پوشش زمین را تحلیل نموده و سناریوهای تغییر در آینده را شبیه‌سازی نماید^۲. در LCM چهار گام برای پیش‌بینی کاربری و پوشش زمین در آینده دنبال می‌شود که شامل تحلیل تغییر، تعیین پتانسیل تغییر و متغیرهای توضیحی، پیش‌بینی تغییر و اعتبارسنجی مدل است [۲۰]. مدل LCM در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که [۸، ۱۱، ۱۹، ۳۷، ۴۵] از جدیدترین مطالعات در این زمینه هستند.

مدل HEC-HMS SMA

سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی (HMS) یک مدل فیزیک پایه با پارامترهای توزیعی است و می‌تواند برای حوضه‌های بزرگ

3. The U.S. Army Corps of Engineers
4. Hydrologic Engineering Center (HEC)

1. Vertical program
2. <https://clarklabs.org/terrset/land-change-modeler/>

بارش برای ایستگاه سینوپتیک گرگان، ایستگاه‌های تبخیرسنجی تمر، چشمه‌خان، رامیان، لزوره، و ارازکوسه و ایستگاه‌های باران‌سنجی نوده، زرینگل، سرمو، گالیکش، گنبد و سد گرگان و متغیرهای اقلیمی دمای حداقل و دمای حداکثر برای ایستگاه سینوپتیک گرگان و ایستگاه‌های تبخیرسنجی تمر، چشمه‌خان، ارازکوسه، بهلکه‌داشلی، غفارحاجی رامیان، لزوره، و فاضل‌آباد است که از سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد (شکل ۱). انتخاب ایستگاه‌های ذکر شده بر اساس تعداد مناسب سال‌های دارای آمار و موقعیت مکانی هر ایستگاه در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت، بطوریکه در تمام ایستگاه‌های مورد استفاده تعداد سال‌های آماری بیش از ۳۰ سال بود. دوره تاریخی تعریف شده در مدل SDSM دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۵ میلادی است که در برخی از ایستگاه‌های اقلیمی مورد مطالعه، به دلیل کمبود آمار، دوره ذکر شده پوشش داده نمی‌شد.

ب- پیش‌بینی کاربری اراضی

در رابطه با بررسی تغییرات کاربری اراضی در حوضه رودخانه گرگانود می‌توان به مطالعه محمدی و همکاران [۳۰] اشاره نمود که مهم‌ترین تغییرات کاربری اراضی در شهرستان رامیان واقع در حوضه رودخانه گرگانود را تبدیل جنگل‌ها و مراتع به زمین‌های زراعی و مسکونی ذکر کردند و نیز مطالعه اسداللهی و ماهینی [۵] که به بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در استان گلستان پرداخته و کاهش وسعت اراضی جنگلی در این استان را پیش‌بینی نمودند، اشاره کرد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی در دوره گذشته، تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز برای پژوهش حاضر از وبسایت <https://earthexplorer.usgs.gov> تهیه شد که شامل تصاویر Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 برای سال ۲۰۱۷ میلادی و Landsat 4-5 TM C1 Level-1 برای سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۹ میلادی است. تصاویر تهیه شده به محیط نرم‌افزار IDRISI Selva 17.0 وارد شده و پس از برش تصاویر متناسب با منطقه‌ای که لازم بود تحت پوشش قرار دهند، ترکیب رنگی کاذب به منظور بهتر متمایز ساختن انواع کاربری اراضی تهیه شد، بدین ترتیب که برای تصاویر سال ۲۰۱۷ از باندهای ۳، ۴، و ۵ و برای تصاویر سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۹ از باندهای ۳، ۴، و ۲ برای تهیه تصویر رنگی کاذب استفاده شد. به دلیل عدم شناخت کافی از منطقه مورد مطالعه و وسعت زیاد آن، طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی مختلف در IDRISI با استفاده از روش نظارت‌نشده انجام شد. به منظور تدقیق طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی تولید شده، از منابع اطلاعاتی دیگر مانند Google Earth، ترکیب رنگی کاذب و نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده در طرح آمایش سرزمین استان گلستان در سال ۱۳۹۵ استفاده شد. ابتدا هر یک از شیت‌های تهیه شده طبقه‌بندی و سپس سه شیت مربوط به هر سال در کنار یکدیگر موزائیک شدند و تصویر موزائیک شده بر اساس مرز حوضه رودخانه گرگانود برش داده شد. مناطق مسکونی

مربوط به هر سال نیز به طور مجزا با استفاده از تصویر ترکیب رنگی کاذب مربوط به هر سال رقومی شده و به نقشه نهایی اضافه شد. در نهایت سه نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۹، و ۲۰۱۷ میلادی به دست آمد که هر یک دارای هفت نوع کاربری اراضی شامل مرتع، کشاورزی، جنگل متراکم، جنگل نیمه‌متراکم، اراضی بایر، پهنه‌های آبی و مناطق مسکونی بود. پیش‌بینی کاربری اراضی برای دو سال ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ میلادی پس از تهیه نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ میلادی در محیط نرم‌افزار IDRISI با کمک مدل LCM در نرم‌افزار TerrSet انجام شد.

ج- پیش‌بینی جمعیت

پیش‌بینی جمعیت در حوضه رودخانه گرگانود بر اساس نسبت جمعیتی محاسبه شده بین حوضه رودخانه گرگانود و استان گلستان (۰/۵۹) و داده‌های جمعیت پیش‌بینی شده برای استان گلستان در درگاه ملی آمار^۱ انجام شد.

د- برآورد تقاضای آب

تقاضای آب در بخش‌های خانگی و صنعت به روش رگرسیون، در بخش کشاورزی به روش USDA و در بخش محیط‌زیستی با استفاده از روش Q95 (دبی که در ۹۵ درصد مواقع دبی رودخانه معادل آن و یا بیشتر از آن دبی است) [۲۴، ۲۹، ۳۲] پیش‌بینی شد.

ه- اجرای مدل هیدرولوژیکی

ابتدا مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS SMA با استفاده از داده‌های موجود به ترتیب برای دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۷ میلادی و اول ژانویه ۲۰۱۳ تا اول مارس ۲۰۱۴ واسنجی و اعتبارسنجی شد و سپس با داده‌های به دست آمده از بخش تغییر اقلیم شامل داده‌های اقلیمی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ مربوط به سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و نیز اطلاعات به دست آمده از نقشه‌های کاربری اراضی پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ اجرا شد. لازم به ذکر است که اطلاعات به دست آمده از نقشه کاربری اراضی شامل درصد سطح نفوذناپذیر، مقدار CN برای زیرحوضه‌هایی که زمان تمرکز در آن‌ها با استفاده از روش SCS به دست آمد و ذخیره تاج‌پوشش است که این مقادیر برای هر دو سال ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به دست آمده و میانگین آن در مدل مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به وجود سه سد بوستان، گلستان، و وشمگیر در منطقه مورد مطالعه که به ترتیب از سال ۱۳۸۴، ۱۳۷۸، و ۱۳۴۹ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، به منظور تکمیل شماتیک تهیه شده برای ورود به مدل که در محیط ArcGIS تهیه شد، سه سد مذکور در محیط نرم‌افزار HEC-HMS به عنوان مؤلفه مخزن به شماتیک اولیه اضافه شدند. برای روندیابی مؤلفه مخزن چهار روش روندیابی متفاوت در دسترس است. با توجه به ثبت خروجی سد وشمگیر در ایستگاه هیدرومتری سد گرگان، برای

1. <https://www.amar.org.ir/>

این سد از روش "خروجی مشخص" استفاده شد که خود شامل دو روش ذخیره Elevation- Storage و Elevation- Area است که در این پژوهش منحنی Elevation- area تهیه شده بر اساس اطلاعات اخذ شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان به مدل اضافه شد. برای سدهای گلستان و بوستان از روش Outflow curve استفاده شد که شامل سه روش ذخیره Storage- Elevation- Discharge، Elevation- Area- Discharge و Storage- Discharge است. در این پژوهش از روش اول استفاده شد و منحنی Storage- discharge به مدل اضافه شد.

و- محاسبه شاخص تنش تأمین آب

با داشتن مؤلفه‌های عرضه آب شامل رواناب خروجی حوضه، آب ذخیره در پشت سدها، تغذیه آب زیرزمینی، آب برگشتی بخش کشاورزی، آب برداشت شده در مسیر رودخانه و آب سطحی ورودی به حوضه و مؤلفه‌های تقاضای آب شامل تقاضای آب در بخش‌های خانگی، کشاورزی، صنعت، و محیط‌زیست، مقدار شاخص تنش تأمین آب برای دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰ میلادی) در حوضه رودخانه گرگانود، از تقسیم تقاضای آب به عرضه آب محاسبه شد. مقادیر عرضه و تقاضای آب و شاخص تنش تأمین آب به ازای هر سال در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۰ به دست آمده و سپس میانه هر سری اعداد برای محاسبات بعدی در نظر گرفته شد. شکل ۲ نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

نتایج

نتایج بررسی تغییر اقلیم نشان داد که در دوازده ایستگاه اقلیمی مورد بررسی و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، هشت مورد کاهش بارش (ایستگاه‌های باران‌سنجی زرینگل، سرمو، گالیکش، گنبد، و ایستگاه‌های تبخیرسنجی رامیان، لزوره، و ارازکوسه و نیز ایستگاه تبخیرسنجی تمر تحت سناریوی RCP2.6 و ایستگاه سینوپتیک گرگان تحت سناریوی RCP8.5) و چهار مورد افزایش بارش (ایستگاه‌های باران‌سنجی نوده و سد گرگان، ایستگاه تبخیرسنجی چشمه‌خان، ایستگاه تبخیرسنجی تمر تحت سناریوی RCP8.5 و ایستگاه سینوپتیک گرگان تحت سناریوی RCP2.6) مشاهده می‌شود (شکل ۳). میانگین بارش سالانه در حوضه رودخانه گرگانود بر اساس ایستگاه‌های مورد مطالعه، حدود ۶۰۳/۹۱ میلی‌متر است. مقایسه میانگین بارش سالانه ایستگاه‌های اندازه‌گیری در دوره پایه و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آینده نشان داد که بیشترین کاهش بارش مربوط به ایستگاه تبخیرسنجی لزوره تحت سناریوی RCP8.5 و بیشترین افزایش بارش مربوط به ایستگاه باران‌سنجی نوده تحت سناریوی RCP8.5 است که مقادیر مربوطه به ترتیب ۱۷۴/۷۸- و ۳۸۶/۳۹+ میلی‌متر است. ایستگاه تبخیرسنجی لزوره و ایستگاه باران‌سنجی نوده هر دو در میانه حوضه واقع شده‌اند (شکل ۳).

در رابطه با دمای حداقل، در نه ایستگاه اندازه‌گیری مورد بررسی و تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، در هفت ایستگاه کاهش دمای حداقل (ایستگاه‌های تبخیرسنجی چشمه‌خان، ارازکوسه، بهلکه داشلی، غفارحاجی، رامیان، لزوره و فاضل‌آباد) و در دو ایستگاه (ایستگاه تبخیرسنجی تمر و ایستگاه سینوپتیک گرگان) افزایش دمای حداقل در دوره آینده نسبت به دوره پایه نشان داده شد (شکل ۴). هر چند مقدار کاهش اندک است و بیشترین مقدار این کاهش ۱/۶ درجه سانتی‌گراد است که اختلاف میانگین دمای حداقل در دوره پایه و دوره آینده در ایستگاه تبخیرسنجی غفارحاجی تحت سناریوی RCP2.6 است. بیشترین میزان افزایش دمای حداقل در ایستگاه سینوپتیک گرگان تحت سناریوی RCP2.6 رخ می‌دهد، بطوریکه اختلاف میانگین دمای حداقل دوره آینده تحت سناریوی مذکور و دمای حداقل دوره پایه ۱/۵۸ است. ایستگاه تبخیرسنجی غفارحاجی و ایستگاه سینوپتیک گرگان هر دو در پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند (شکل ۴).

در خصوص دمای حداکثر، در نه ایستگاه اندازه‌گیری مورد بررسی و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، در شش ایستگاه افزایش دمای حداکثر (ایستگاه‌های تبخیرسنجی تمر، چشمه‌خان، ارازکوسه، بهلکه داشلی، لزوره، و ایستگاه سینوپتیک گرگان) و در سه ایستگاه (ایستگاه‌های تبخیرسنجی غفارحاجی، رامیان، و فاضل‌آباد) کاهش دمای حداکثر در دوره آینده نسبت به دوره پایه نشان داده شد (شکل ۵). بیشترین میزان افزایش دمای حداکثر در ایستگاه تبخیرسنجی تمر تحت سناریوی RCP2.6 رخ می‌دهد، بطوریکه اختلاف میانگین دمای حداکثر دوره آینده تحت سناریوی مذکور و دمای حداکثر دوره پایه ۰/۲۵ است. بیشترین مقدار کاهش ۰/۹۷ درجه سانتی‌گراد است که اختلاف میانگین دمای حداکثر در دوره پایه و دوره آینده در ایستگاه تبخیرسنجی فاضل‌آباد تحت سناریوی RCP8.5 است. ایستگاه تبخیرسنجی تمر در بالادست و ایستگاه تبخیرسنجی فاضل‌آباد در پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند (شکل ۵).

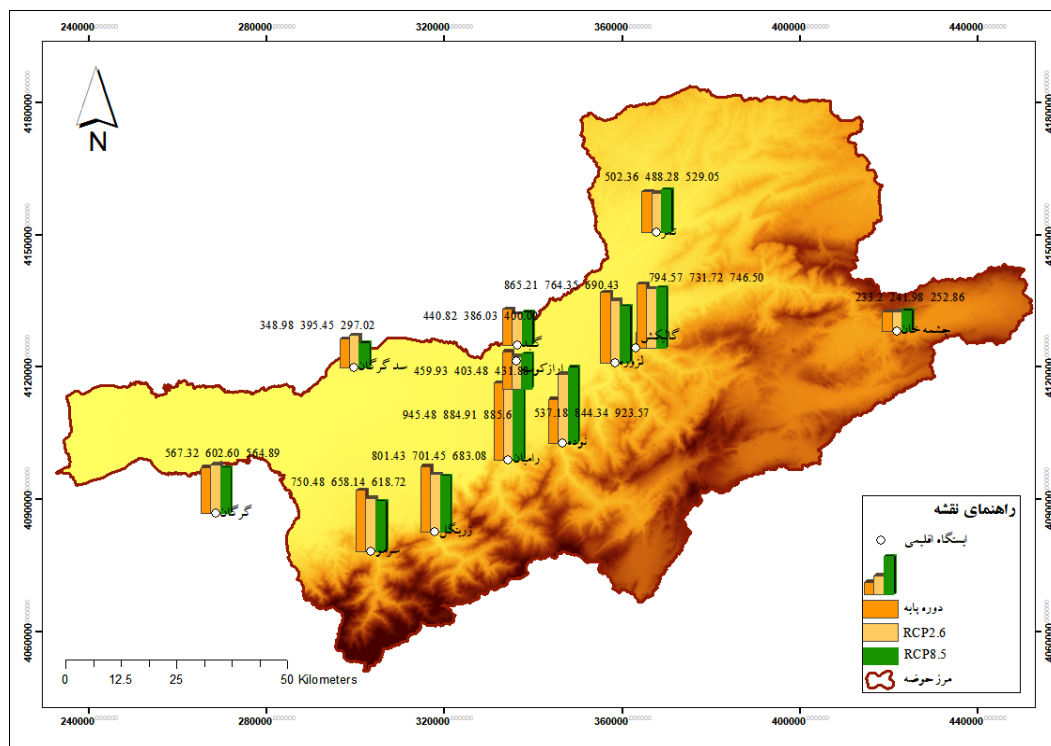
نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده برای سال‌های ۲۰۱۷ میلادی (دوره پایه) و ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ میلادی (دوره آینده) در شکل ۶ ارائه شده است. پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی نشان داد که مهم‌ترین تغییرات در کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در دوره آینده، کاهش سطح اراضی زراعی و تبدیل آن‌ها به اراضی مسکونی و همچنین کاهش سطح جنگل‌های متراکم است. کاهش سطح اراضی زراعی از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۰ به میزان ۴/۴۲ درصد و کاهش سطح جنگل متراکم در همین بازه زمانی ۲/۳۵ درصد بوده است.

جدول ۱ کارایی مدل HEC-HMS SMA در شبیه‌سازی هیدروگراف در حوضه رودخانه گرگانود در ۲۰۰۷-۲۰۰۹ در مرحله واسنجی و جدول ۲ کارایی مدل HEC-HMS SMA در شبیه‌سازی هیدروگراف در حوضه رودخانه گرگانود از اول ژانویه ۲۰۱۳ تا اول مارس ۲۰۱۴ در مرحله اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

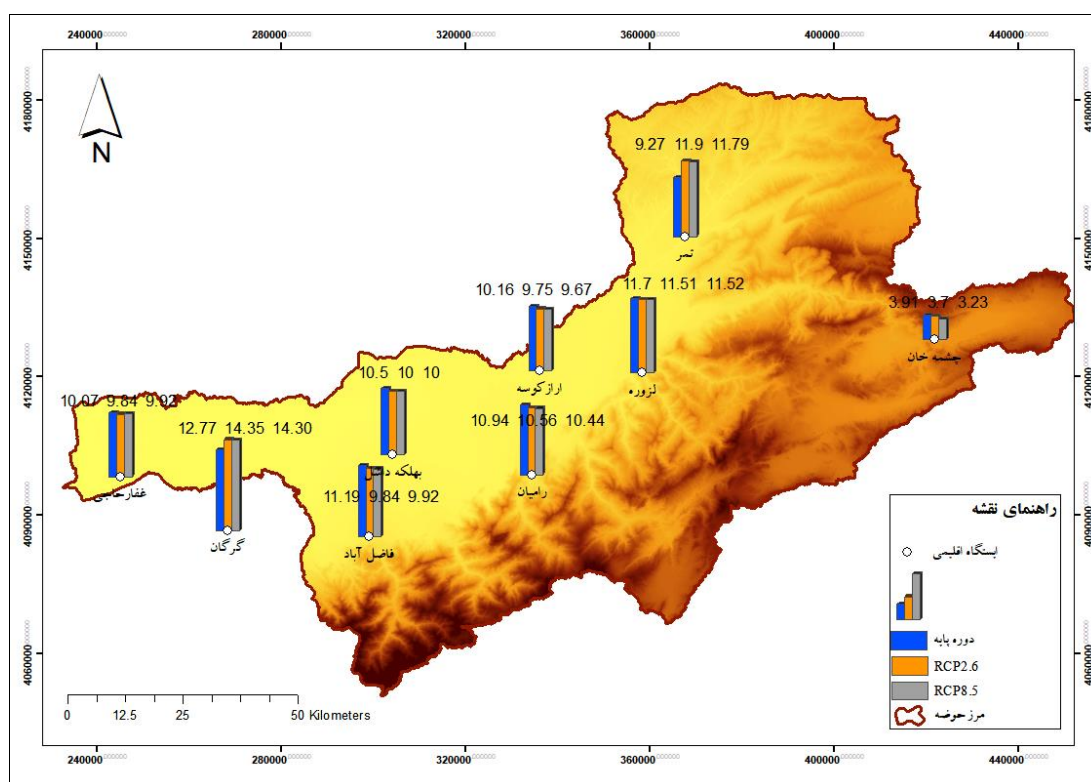


شکل ۲- نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش

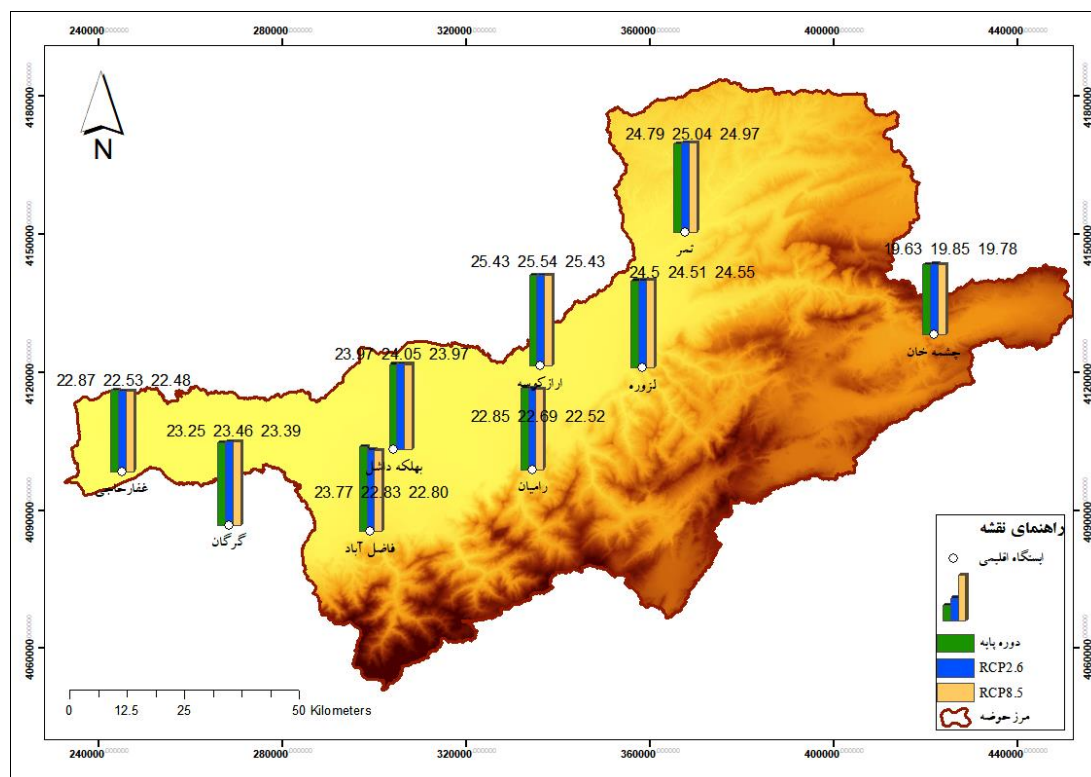
Fig 2. Flowchart of research steps



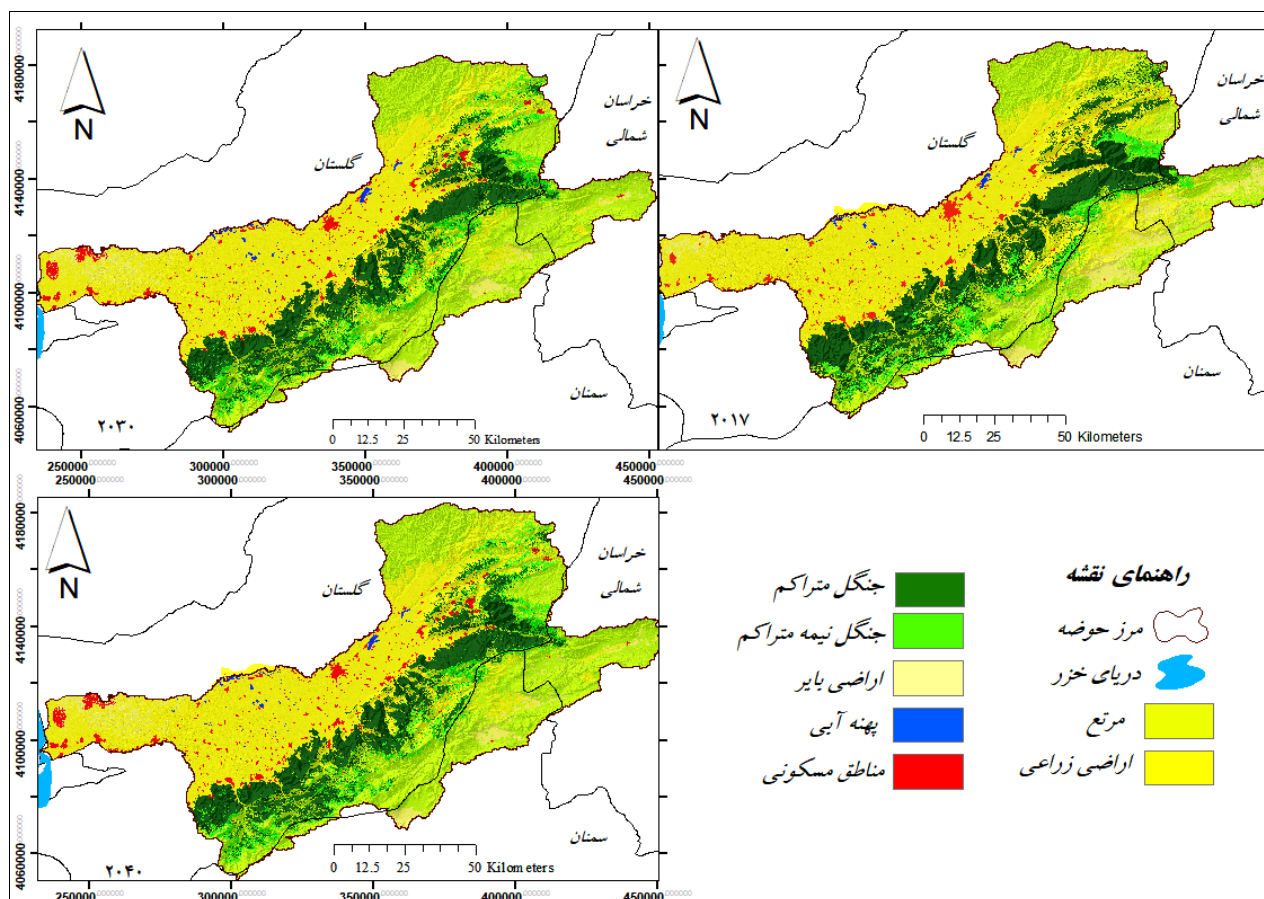
شکل ۳- میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 در ایستگاه‌های اقلیمی
 Fig 3. Mean rainfall (mm) for the baseline and future under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in meteorological stations



شکل ۴- میانگین دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد) در دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 در ایستگاه‌های اقلیمی
 Fig 4. Mean of minimum temperature (°C) for the baseline and future under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in meteorological stations



شکل ۵- میانگین دمای حداکثر روزانه (درجه سانتی گراد) در دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 در ایستگاه‌های اقلیمی
Fig 5. Mean of maximum temperature (°C) for the baseline and future under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in meteorological stations



شکل ۶ - نقشه کاربری اراضی پایه (۲۰۱۷) و پیش‌بینی شده (۲۰۳۰ و ۲۰۴۰) حوضه رودخانه گرگانرود
Fig 6. Baseline (2017) and Projected (2030 and 2040) land use map for the Gorganrud River Basin

جدول ۱- ارزیابی کمی کارایی مدل HEC-HMS SMA در شبیه‌سازی هیدروگراف در حوضه رودخانه گرگانرود در مرحله واسنجی

Table 1. Quantitative evaluation of HEC-HMS SMA model efficiency in hydrograph simulation in Gorganrud River Basin in the calibration stage

RMSE	NS	زیرحوضه - رودخانه Sub-basin- River	RMSE	NS	زیرحوضه - رودخانه Sub-basin- River
0.83	0.32	Sarmoo- Mohammadabad	0.69	0.52	Tamer- Gorgan- rud
0.5	0.7	Ramian- Gharechai	0.7	0.43	Tangrah-Dough
0.58	0.66	Aqqala- Gorganrud	0.8	0.31	Node- Khormaloo
0.84	0.3	Galikesh- Oghan	0.69	0.52	Zaringol- Zaringol
---	---	---	0.8	0.35	Lazoore- Chehelchai

جدول ۲ ارزیابی کمی کارایی مدل HEC-HMS SMA در حوضه رودخانه گرگانرود در مرحله اعتبارسنجی

Table 2. Quantitative evaluation of the HEC-HMS SMA model efficiency in the Gorganrud River Basin in the validation stage

RMSE	NS	زیرحوضه - رودخانه Sub-basin- River	RMSE	NS	زیرحوضه - رودخانه Sub-basin- River
0.62	0.62	Sarmoo- Mohammadabad	0.52	0.73	Tamer- Gorgan- rud
0.64	0.6	Ramian- Gharechai	0.8	0.35	Tangrah-Dough
0.47	0.78	Aqqala- Gorganrud	0.77	0.4	Node- Khormaloo
0.8	0.3	Galikesh- Oghan	0.6	0.63	Zaringol- Zaringol
---	---	---	0.7	0.54	Lazoore- Chehelchai

جدول ۳- میانه مقادیر عرضه آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5

در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ میلادی (میلیون متر مکعب در سال)

Table 3. The median of water supply in the Gorgan-rud River Basin in change conditions under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in 2020-2040 (MCM/year)

عرضه آب Water supply							
مجموع Total	آب برگشتی بخش کشاورزی Return flow of agriculture sector	جریان سطحی ورودی Input inflow	آب مصرفی در مسیر رودخانه Water extracted along the river	نفوذ عمقی Percolation	آب ذخیره در پشت سد Water storage behind dams	رواناب Runoff	سناریوی اقليمی
930.495	448.44	18.1	131.308	125.032	0.035	207.58	RCP2.6
935.848	410.56	18.1	131.308	168.89	0.0297	206.96	RCP8.5

ساتکلیف در زیرحوضه‌های مختلف حوضه رودخانه گرگانرود در بازه ۰/۷۸ - ۰/۳ قرار می‌گیرد. با توجه به مقدار این ضریب در خروجی حوضه رودخانه گرگانرود (ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا) که مقدار ۰/۷۸ را دارد می‌توان گفت عملکرد مدل HEC-HMS SMA در مرحله اعتبارسنجی عملکرد قابل قبولی در خروجی حوضه داشته است.

بر اساس جدول ۱، مدل HEC-HMS SMA در زیرحوضه‌های مختلف حوضه رودخانه گرگانرود کارایی متفاوتی داشته است و مقدار ضریب ناش-ساتکلیف در بازه ۰/۷-۰/۳ قرار می‌گیرد. مقدار این ضریب در خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا) ۰/۶۶ است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در خروجی حوضه در مرحله واسنجی است. بر اساس جدول ۲، مقدار معیار ناش-

جدول ۳ مقادیر میانه عرضه آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر و جدول ۴ میانه مقادیر تقاضای آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر را نشان می‌دهد.

مجموع مؤلفه‌های عرضه آب تحت سناریوی RCP2.6 برابر با ۹۳۰/۴۹۱ و تحت سناریوی RCP8.5 برابر با ۹۳۵/۸۴۸ میلیون مترمکعب در سال است. با توجه به اینکه در پیش‌بینی بارش، مقدار بارش برای سناریوی RCP8.5 در هشت ایستگاه مورد مطالعه (از میان دوازده ایستگاه) بیش از مقدار به دست آمده در سناریوی RCP2.6 بود، میزان رواناب نیز بیشتر به دست آمد و موجب شد مقدار شاخص تنش تأمین آب به ازای RCP8.5 کمتر از RCP2.6 باشد.

میزان جمعیت این حوضه در انتهای افق در نظر گرفته شده (۲۰۴۰ میلادی معادل ۱۴۱۹ شمسی) به ۱۳۸۵۰۰۰ نفر خواهد رسید، در حالی که این مقدار در ابتدای افق مورد بررسی (۲۰۲۰ میلادی معادل ۱۳۹۹ شمسی) معادل ۱۱۶۵۰۰۰ نفر است. بنابراین در دوره بیست و یک ساله مورد نظر، جمعیت حوضه رودخانه گرگانرود ۲۲۰۰۰۰ نفر افزایش خواهد داشت که حدود ۱۹ درصد است. همچنین، تقاضای آب بخش‌های خانگی، صنعت، کشاورزی و تقاضای آب محیط‌زیستی نشان‌دهنده دارای روند افزایشی در دوره مورد مطالعه بود. بطوریکه، میزان تقاضای آب بخش خانگی از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۱۹ شمسی معادل ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ میلادی از ۹۴/۸۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۹ به ۱۱۲/۷۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۹ خواهد رسید. میزان تقاضای آب بخش صنعت در آینده از ۷۹۱۶۱۲/۰۱ مترمکعب در سال ۱۳۹۹ به ۱۷۷۲۳۴۵/۵۹ مترمکعب در سال ۱۴۱۹ می‌رسد. مقدار تقاضای آب بخش کشاورزی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ میلادی در بازه ۱۳۵۸/۹۱-۱۲۴۴/۱۳ میلیون مترمکعب در سال قرار می‌گیرد و نیاز آب محیط‌زیستی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ میلادی به ترتیب تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 مقدار ۳۰/۹۹ و ۲۹/۶۴ میلیون مترمکعب در سال است.

میانه مقادیر شاخص تنش تأمین در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار میانه شاخص تنش تأمین آب در دوره آینده تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5

به‌ترتیب ۱/۶۱ و ۱/۴۵ به دست آمد که در هر دو حالت، این مقادیر بیش از یک هستند و این نشان‌دهنده بیشتر بودن تقاضای آب نسبت به عرضه آب در دوره آینده و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 است. میزان شاخص تنش تأمین آب در دوره گذشته (۱۳۹۰-۱۳۴۵) برابر با ۱/۰۳ بوده است.

جدول ۵- میانه مقادیر شاخص تنش تأمین آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۰ میلادی

Table 5. The median of Water Supply Stress Index in the Gorgan-rud River Basin in change condition under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in 2020-2040

شاخص تنش تأمین آب (WaSSI) Water Supply Stress Index	سناریوی اقلیمی Climatic scenario
1.614	RCP2.6
1.451	RCP8.5

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مشخص شد که در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه احتمال کاهش بارش و افزایش دما در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰ میلادی) وجود خواهد داشت. مطالعاتی که تغییر اقلیم و پیش‌بینی آن در مناطق مختلف کشور و جهان را مورد بررسی قرار داده‌اند نتایج متفاوتی را در خصوص تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره آینده ارائه نموده‌اند. برخی از مطالعات که به نتایجی مشابه نتیجه به دست آمده در این پژوهش دست یافته‌اند شامل عباس نوین‌پور و همکاران [۱]، اوجدا الیوارس و همکاران [۳۳]، ونگ و همکاران، ۲۰۱۷ [۴۳]، زیانوجون و همکاران [۴۶] است که کاهش بارش و افزایش دما را پیش‌بینی نمودند. شرایط اقلیمی پیش‌بینی شده می‌تواند گویای تأثیر منفی تغییر اقلیم بر منابع آب در دوره آینده باشد. نتایج به دست آمده از تهیه نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ با نتایج پژوهش محمدی و همکاران [۳۰]

جدول ۴- میانه مقادیر تقاضای آب در حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط تغییر تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۰ میلادی (میلیون متر مکعب در سال)

Table 4. The median of water demand in the Gorgan-rud River Basin in change conditions under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in 2020-2040 (MCM/year)

تقاضای آب Water demand				سناریوی اقلیمی Climatic scenario
تقاضای آب بخش محیط‌زیستی Environmental flow water demand	تقاضای آب بخش کشاورزی Agricultural water demand	تقاضای آب بخش صنعت Industrial water demand	تقاضای آب بخش خانگی Domestic water demand	
30.99	1358.91	1.02	104.12	RCP2.6
29.93	1244.13	1.02	104.12	RCP8.5

مطابقت دارد. همچنین، نتایج این پژوهش در رابطه با روند کاهشی سطح اراضی جنگلی با نتایج اسداللهی و سلمان ماهینی [۵] منطبق است. مهم‌ترین تغییرات کاربری اراضی در دوره آینده در حوضه رودخانه گرگانرود به صورت کاهش سطح اراضی جنگل متراکم و افزایش سطح اراضی مسکونی است که افزایش جمعیت می‌تواند عاملی تأثیرگذار در این تغییرات باشد. افزایش سطح اراضی شهری (مناطق نفوذناپذیر) موجب افزایش CN و در نتیجه افزایش رواناب می‌شود. از طرف دیگر کاهش سطح اراضی جنگلی موجب کاهش نفوذ آب باران به سطح زمین و در نتیجه کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و افزایش رواناب خواهد شد. کاهش سطح اراضی زراعی به نفع توسعه مناطق مسکونی نیز می‌تواند مسائلی را در خصوص امنیت غذایی در منطقه مورد مطالعه در پی داشته باشد. تغییر جمعیت در کنار توسعه مناطق مسکونی می‌تواند به عنوان عامل مؤثر در افزایش تقاضای آب در دوره آینده نیز نگریسته شود که با نتایج به دست آمده توسط ونگ و همکاران [۴۳] و اوجدا الیوارس و همکاران [۳۳] مطابقت دارد. محاسبه مؤلفه‌های عرضه و تقاضای آب و سپس شاخص تنش تأمین آب در حوضه رودخانه گرگانرود، تأثیر منفی این تغییرات بر شاخص مذکور را نشان داد. در مطالعه سان و همکاران [۴۰] نیز مشخص شد که تغییر اقلیم بر عرضه و تقاضای آب در سطح منطقه‌ای تأثیرگذار است. همچنین در مطالعه کیم و همکاران [۲۲] افزایش کمبود آب در بلندمدت و در مطالعه البکری و همکاران [۴] تشدید مشکلات کمبود آب و عدم امنیت غذایی با تغییر اقلیم و افزایش جمعیت نتیجه‌گیری شد. با محاسبه شاخص تنش تأمین آب برای دوره گذشته مشخص شد که مقدار این شاخص از ۱/۰۰۳ برای دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۴۵ به ۱/۰۳۳ برای دوره ۱۳۹۰-۱۳۴۵ افزایش یافته است و سپس در دوره آینده نیز به ازای سناریوی RCP2.6 ۱/۶۱ و به ازای سناریوی RCP8.5 ۱/۴۵ است که تشدید وضعیت نامناسب منابع آب در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. لذا، این امر لزوم اعمال مدیریت صحیح منابع آب در حوضه رودخانه گرگانرود را نشان می‌دهد.

بطور کلی، در این پژوهش با بررسی اثر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی، و تغییر جمعیت بر منابع آب حوضه رودخانه گرگانرود بر شاخص تنش تأمین آب مشخص شد که بر مبنای شاخص مورد استفاده، امنیت آبی در دوره آینده در حوضه رودخانه گرگانرود به عنوان یک چالش مطرح خواهد بود و لذا منابع آب در این منطقه نیازمند مدیریت مشارکتی صحیح است. از آنجا که امکان مدیریت عرضه آب کمتر وجود دارد، لازم است بر مدیریت تقاضای آب تمرکز شود. در همین راستا، باید به دنبال راهکارهایی بود که امکان اجرایی شدن آن‌ها بیشتر باشد. گزینه‌های مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی مانند تغییر الگوی کشت، تغییر تاریخ کشت، کاهش ضایعات بخش کشاورزی و کاهش تبخیر از سطح خاک از جمله راهکارهای مناسب در زمینه مدیریت تقاضای آب هستند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و مدیران منابع آب

به‌منظور مدیریت منابع آب در آینده، در شرایط تغییر و عدم قطعیت کمک کند. همچنین، مشاهده تغییرات کاربری اراضی و به ویژه افزایش سطح اراضی مسکونی و کاهش سطح جنگل‌های متراکم در این پژوهش هشدار است برای سیاست‌گذاران، تصمیم‌گیرندگان، مدیران و بخش‌های اجرایی به‌منظور حفاظت بیشتر از منابع طبیعی و مدیریت توسعه اراضی مسکونی.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌ها و همکاری‌های بی‌دریغ مسئولان دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

دیا غنچه‌پور: مفهوم‌سازی، انجام پژوهش و تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله
امیر سعدالدین: راهنمایی و مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
عبدالرضا بهره‌مند: راهنمایی و مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله
آنتونی جیکمن: مفهوم‌سازی، مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله
عبدالرسول سلمان‌ماهینی: مفهوم‌سازی، مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله
بری کروک: مفهوم‌سازی، مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله

منابع

1. Abbas Novinpour, E. Kaki, M. and Sadeghi Aghdam, F. 2020. The Effect of Climate Change on Surface and Groundwater Resources in Rozeh Tea Plain. Journal of New Findings in Applied Geology 15(29), 15-27.(In Persian)
2. Ahmadi, M. Motamedvaziri, B. Ahmadi, H. Moeini, A. and Zehtabian, Gh. 2019. Evaluating the impact of climate change on extreme flows in Kan watershed. Journal of Water and Soil Resources Conservation 9(2), 101-121.(In Persian)
3. Akbari, A. Sadoddin, A. and Asgari, H. 2024. A framework for modeling an agronomic system's vulnerability to climate change

change in Brunei Darussalam using statistical downscaling model. *Theoretical and Applied Climatology*. 133 (1-2): 343-360.

14. Farokhzadeh, B. Choobeh, S. and Nouri, H. 2018. Impacts of climate and land use change on runoff (Case Study: Balighloo Chai Basin, Iran). *International Journal of Environmental Science and Development*. 9(3).

15. Feldman, A. D. 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

16. Gagnon, S. Singh, B. Rousselle, J. and Roy, L. 2005. An application of the Statistical Downscaling Model (SDSM) to simulate climate data for streamflow modelling in Quebec. *Canadian Water Resources Journal*. 30(4): 297-314.

17. Gebremedhin, M. A. Abraha, A. Z. and Fenta, A. A. 2018. Changes in future climate indices using Statistical Downscaling Model in the upper Baro basin of Ethiopia. *Theoretical and applied climatology*. 133 (1-2): 39-46.

18. Gholamian, H. and Ildoromi, A. 2020. The effects of land use changes on the maximum flood discharge in the Songhor Watershed. *Journal of Geography and Environmental Planning* 31(3), 1-29 (In Persian)

19. Ghonchepour, D. Sadoddin, A. Salmanmahiny, A. Bahremand, A. Jakeman, A. and Croke, B. 2023. Detection and prediction of land use changes and population dynamics in the Gorganrud River basin, Iran. *Land Degradation & Development*. 34 (10): 2990-3002.

20. Kassaye, S. M. Tadesse, T. Tegegne, G. Hordofa, A. T. and Malede, D. A. 2024. Relative and combined impacts of climate and land use/cover change for the streamflow variability in the Baro River Basin (BRB) Earth. 5(2): 149-168

21. Khoshravesh, M. and Norooz Valashedi, R. 2020. Investigating the effect of climate change scenarios on the monthly flow discharge at the outlet of Gelevar Dam. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 27 (4), 23-43. (In Persian)

22. Kim, S., Kim, B.S., Jun, H., Kim, H.S. 2014. Assessment of future water resources and water scarcity considering the factors of climate change and social-environmental change in Han River Basin, Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 28(8): 1999-2014.

23. Kiprotich, P., Wei, X., Zhang, Z., Ngigi, T., Qiu, F., and Wang, L. 2021. Assessing the Impact of Land Use and Climate Change on Surface Runoff Response Using Gridded Observations and SWAT. *Hydrology*. 8(1): 48

24. Lewakabessy, G. and Nara, O. D. 2024. Analysis of mainstay

with reflections from the Caspian coastal agro-ecological zone of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 196(2): 210.

4. Al-Bakri, J. T. Salahat, M. Suleiman, A. Suifan, M. Hamdan, M. R. Khresat, S. Kandakji, T. 2013. Impact of climate and land use changes on water and food security in Jordan: Implications for transcending "the tragedy of the commons". *Sustainability*. 5(2): 724-748.

5. Asadollahi, Z. and Salmanmahini, A. 2016. Investigating the effect of land use change on the supply of ecosystem services (carbon storage and sequestration). *Journal of Environmental Researches* 8(1), 203-214. (In Persian)

6. Ashraf, S. Ali, M. Shrestha, S. Hafeez, M.A. Moiz, A. Sheikh, Z.A. 2022. Impacts of climate and land-use change on groundwater recharge in the semi-arid lower Ravi River basin, Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*. 17.

7. Azari, M. Saghafian, B. Moradi, H. R. and Faramarzi, M. 2017. Effectiveness of soil and water conservation practices under climate change in the Gorganroud Basin, Iran. *CLEAN-Soil, Air, Water*. 45(8): 1700288.

8. Bachri, S. Shrestha, R. P. Irawan, L. Y. Masruroh, H. Prastiwi, M. R. H. Billah, E. N. Putri, N.R.C. Hakiki, A.R.R. and Hidiyah, T. M. 2024. Land use change simulation model using a land change modeler in anticipation of the impact of the Semeru volcano Eruption disaster in Indonesia. *Environmental Challenges*, 100862.

9. Barati, A. A. Pour, M. D. and Sardooei, M. A. 2023. Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus. *Science of the Total Environment*. 882, 163549.

10. Bashar, K. E. and Zaki, A. F. 2005. SMA Based Continuous Hydrologic Simulation Of The Blue Nile. In a paper published in the International Conference of UNESCO Flanders FUST FRIEND/NILE Project" Towards a Better Cooperation". Sharm El-Sheikh, Egypt.

11. Benkhelif, A. Setti, M. H. Sehl, B. Djeddaoui, F. and Nazrul, I. 2024. Predicting urban growth and its impact on fragile environment using Land Change Modeler (LCM): a case study of Djelfa City, Algeria. *Geo Journal*. 89(2): 72.

12. Bennett, T. H., and Peters, J. C. 2000. Continuous soil moisture accounting in the hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). In *Building partnerships. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management* 2000.

13. Binti Pg. D. S. N. A. Hasan, A. Ratnayake, U. Shams, S. Nayan, Z. B. H. and Rahman, E. K. A. 2018. Prediction of climate

approaches for strategic basin planning. Asian Development Bank, GIWP, UNESCO, and WWF-UK.

36. Pulido-Velazquez, D. García-Aróstegui, J.L. Molina, J.L. Pulido-Velazquez, M. 2015. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, se Spain). Could Increased Rainfall Variability Increase the Recharge Rate? Hydrological Processes. 29: 828-844.

37. Shafie, B. Javid, A. Irani Behbahani, H. Darabi, H. and Hosseinzadeh Lotfi, F. 2024. Analysis of the Current and Future Prediction of Land Use/Land Cover Change Using (LCM) in Latian Dam Watershed. Environmental Researches. 14(28): 55-74.

38. Shirmohammadi, B. Malekian, A. Salajegheh, A. Taheri, B. Azarnivand, H. Malek, Z. Verburg, P.H. 2020. Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. Land Use Policy. 90: 104299.

39. Shooshtarian, M. R. Dehghani, M. Margherita, F. Gea, O. C. and Mortezaazadeh, S. 2018. Land use change and conversion effects on ground water quality trends: An integration of land change modeler in GIS and a new Ground Water Quality Index developed by fuzzy multi-criteria group decision-making models. Food and Chemical Toxicology. 114: 204-214.

40. Sun, G. McNulty, S.G. Myers, J.M. Cohen, E.C. 2008. Impacts of climate change, population growth, land use change and groundwater availability on water supply and demand across the conterminous US. Watershed Update. 6(2): 1-30.

41. Van Ty, T. Sunada, K. Ichikawa, Y. and Oishi, S. 2012. Scenario-based impact assessment of land use/cover and climate changes on water resources and demand: a case study in the Srepok River Basin, Vietnam—Cambodia. Water Resources Management. 26(5): 1387-1407

42. Varis, O. Kuikka, S. 1999. Learning Bayesian decision analysis by doing: lessons from environmental and natural resources management. Ecological Modelling. 119 (2-3): 177-195.

43. Wang, X.J. Zhang, J.Y. Shahid, S. Xie, W. Du, C.Y. Shang, X.C. Zhang, X. 2017. Modeling domestic water demand in Huaihe River Basin of China under climate change and population dynamics. Environment, Development and Sustainability. 20(2): 1-14.

44. Wilby, R. L. Dawson, C. W. and Barrow, E. M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environmental Modelling & Software. 17(2): 145-157

discharge in the Way Batumerah Watershed for annual water allocation plans. International Journal of Advanced Engineering Research and Science. 11 (03).

25. Mahdaoui, K. Chafiq, T. Asmlal, L. and Tahiri, M. 2024. Assessing hydrological response to future climate change in the Bouregreg watershed, Morocco. Scientific African. 23, e02046.

26. Malmir, M. mohammadrezapour, O. Sharif Azari, S. 2016. Evaluation of climate change impacts on agricultural water allocation in Qara Su watershed, using WEA . Journal of Irrigation and Water Engineering 6(23), 143-155. (In Persian)

27. Maneshdavi, A. Nikbakht Shahbai, A. and Fathian H. 2018. Rainfall-Runoff continuous simulation in Abolabbas watershed using SMA by HEC-HMS. Journal of Soil and Water Research 49(2), 317-327. (In Persian)

28. Mango, L.M. Melesse, A.M. McClain, M.E. Gann, D. Setegn, S.G. 2011. Land use and climate change impacts on the hydrology of the Upper Mara River Basin, Kenya: Results of a modeling study to support better resource management. Hydrology and Earth System Sciences. 15(7): 2245.

29. Mehmood, K. Tischbein, B. Mahmood, R. Borgemeister, C. Flörke, M. and Akhtar, F. 2024. Analyzing and evaluating environmental flows through hydrological methods in the regulated Indus River Basin. Ecohydrology. e2624.

30. Mohammadi, M. Amiri, M. Dastourani, J. 2015. Modeling land use changes in Ramian city in Golestan province. The Journal of Spatial Planning 19(4), 141-158. (In Persian)

31. Mohammadi, P. Ebrahimi, K. Barafshan, J. 2023. Investigation of land use changes in Gorganrood catchment using Google Earth Engine Platform. Iran-Watershed Management Science & Engineering. 17 (60): 11-20.

32. Nugroho, A. R. 2024. The challenges in implementing the environmental flow concept in Indonesia. In E3S Web of Conferences (Vol. 485, p. 03016). EDP Sciences.

33. Ojeda Olivares, E.A. Sandoval Torres, S. Belmonte Jiménez, S.I. Campos Enríquez, J.O. Zignol, F. Reygadas, Y. Tiefenbacher, J.P. 2019. Climate change, land use/land cover change, and population growth as drivers of groundwater depletion in the Central Valleys, Oaxaca, Mexico. Remote Sensing. 11 (11): 1290.

34. Okello, C. Tomasello, B. Greggio, N. Wambiji, N. Antonellini, M. 2015. Impact of population growth and climate change on the freshwater resources of Lamu Island, Kenya. Water. 7(3): 1264-1290.

35. Pegram, G. Yuanyuan, L. Le Quesne, T. Speed, R. Jianqiang, L. Fuxin, S. 2013. River basin planning principles: procedures and

47. Yousefi Mobarhan, E. Abghari, H. Erfanian, M. 2014. Calibration and evaluation of the HMS SMA model in Zolachai Watershed, Iran. Journal of Watershed Management Research (101), 79-87. (In Persian)

45. Wiwoho, B. S. McIntyre, N. and Phinn, S. 2024. Assessing Future Land-Uses under Planning Scenarios: A Case Study of the Brantas River Basin, Indonesia. Environmental Challenges. 100873.

46. Xiau-jun, W. Jian-yun, Z. Shamsuddin, S. Rui-min, H. Xing-hui, X. Xin-li, M. 2015. Potential impact of climate change on future water demand in Yulin city, Northwest China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 20(1): 1-19

Predicting the Water Supply Stress Index (WaSSI) under the Combined Scenarios of Climate Change, Land Use Change and Population Growth for the Gorgan-Roud River Basin, Golestan Province- Iran

Diba Ghonchehpour¹, Amir Sadoddin^{2*}, Abdolreza Bahremand³, Anthony Jakeman⁴, Abdolrassoul Salmanmahiny⁵, Barry Croke⁶

Received: 12-03-2024 Accepted: 02-09-2024

Extended Abstract

Introduction

Climate change creates changes in precipitation amount and pattern, temperature and evapotranspiration, which influences water resources availability, increases floods and droughts frequency and intensity, leads to degradation of the environment, which serves the water quality and leads to the dynamic change of runoff. On the other hand, land cover change and population increase impact on hydrological system too. Understanding the hydrological response of watersheds to physical change (land use) and climate change (precipitation and temperature) and quantifying the water balance change due to environmental change are very important for water resources sustainable development and an important component in water resources management and planning. This research aims to manage water supply and demand in the future under change conditions at a river basin-scale. In line with this goal, the situation of water supply and demand in the Gorganrud River basin was evaluated under the conditions of climate change, land use change and population change. The Gorganrud river basin is located in the northeast of Iran in the three provinces of Golestan, North Khorasan and Semnan, with an area of about 11,220 square kilometers. The studied area is an important source of water supply for the domestic, agricultural, industrial and environmental sectors in Golestan province, so it is important to investigate the water resources condition in this area in the future period.

Materials and methods

To project the climatic condition in future the data related to the CanESM2 large-scale global climate model under two scenarios of RCP2.6 and RCP8.5 were prepared. Then, these data were downscaled using Statistical Down Scaling Model (SDSM4.2) for local climatic gauging stations. Twelve climatic stations were considered for precipitation and nine for minimum and maximum temperatures. Land use maps for 1999, 2009 and 2017 were prepared using Landsat satellite images and IDRISI

1. Ph.D. graduated, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2. Professor (Corresponding Author), Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, amir.sadoddin@gau.ac.ir
3. Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4. Professor, Institute for Water Futures, The Fenner School of Environment and Society, Australian National University, Canberra, Australia
5. Professor, Department of Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
6. Associate Professor, Institute for Water Futures, The Fenner School of Environment and Society, Australian National University, Canberra, Australia & Mathematical Sciences Institute, Australian National University, Canberra, Australia

software. Then, land use changes were predicted using the Land Change Modeler (LCM) tool in the TerrSet software. The population size and water demand for domestic, industrial, agricultural, and environmental sectors were predicted for the future period. Then, HEC-HMS SMA was calibrated and validated using rainfall and runoff data of 2007-2009 and January 2013-March 2014, respectively.

The calibrated and validated hydrological model was used to simulate the hydrological components (runoff, groundwater recharge, and volumes of inflow, outflow, and storage in dam reservoirs) under climate and land use changes. Finally, the value of the Water Supply Stress Index (WaSSI) was calculated under two climate change scenarios, RCP2.6 and RCP8.5.

Results and Discussion

Investigations show that the weighted average of the Water Supply Stress Index has increased from 1.003 for the period 1966-2006 to 1.033 for the period 1966-2011. The study of climate change shows changes in precipitation, minimum and maximum temperature in different climate stations under both RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. It should be noted that the impact of climate change scenarios is not the same in all climate stations. The prediction of land use change indicates the reduction of agricultural lands and their conversion into residential areas. In addition, the conversion of dense forests to semi-dense forests and rangelands is significant. The forecast of population changes and water demand indicates the increase of these variables. The comparison of the average annual rainfall in the past (2006-2017) and the future (2020-2040) at the Aqqla hydrometric station shows that this variable will have values of 207.038 and 210.8 million cubic meters under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, respectively which is significantly more than its amount in the last period with the amount of 179.64 million cubic meters. The total water supply components for the RCP2.6 scenario is equal to 930.49 and for the RCP8.5 scenario is equal to 935.85 million cubic meters. The sum of water demand components according to RCP2.6 scenario is equal to 1495.04 and according to RCP8.5 scenario it is equal to 1379.2 million cubic meters. The median value of WaSSI in the future under two climate change scenarios RCP2.6 and RCP8.5 was predicted to be 1.61 and 1.45, respectively.

Conclusion

In this research, the impact of climate change, land use change and population change on the water resources of the Gorganrud River Basin was investigated. By calculating the Water Supply Stress Index, it was found that based on the used index, the lack of water security in the Gorganrud River Basin will be a challenge in the future. In the management of water resources, it is necessary to focus on both sides of water supply and demand but, since it is possible to manage water supply less, it is necessary to focus more on water demand management. In this regard, we should look for solutions that are more likely to be implemented. Water demand management measures in the agricultural sector such as changing the cropping pattern, changing the cropping date, reducing agricultural sector waste and reducing evaporation from the soil surface are among the appropriate solutions in the field of water demand management. In addition, the observation of land use changes and especially the increase in the area of residential areas and the decrease in the area of dense forests in this research is a warning for policy makers, decision makers, managers and executive departments in order to further protect natural resources and manage the development of residential areas. The methodology and outputs of this research can be useful for decision makers and managers of water resources in the conditions of change and uncertainties related to it, in the Gorganrud River Basin and similar conditions.



Keywords: *Climate change, land use change, population change, Water Supply Stress Index, the Gorgan-rud River Basin.*

Acknowledgments

The authors consider it necessary to express their sincere thanks for the support of the authorities of the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Conflict of Interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest in writing and publishing the content and results of this research.

Data Availability

The data and results used in this study are available from the corresponding author upon request.

Authors' Contributions

Diba Ghonchepour: Conceptualization, performing software analyses, writing the initial draft of the manuscript.

Amir Sadoddin: Guidance and conceptualization, Editing and revising the manuscript, controlling the results.

Abdolrea Bahremand: Guidance and conceptualization, Editing and revising the manuscript.

Anthony Jakeman: Conceptualization, Consulting, Reviewing the text of the article.

Abdorrassoul Salmanmahiny: Conceptualization, Consulting, Reviewing the text of the article.

Barry Croke: Conceptualization, Consulting, Reviewing the text of the article.