تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴ (ص ۱۹۳-۱۸۳)

ارزیابی یکپارچهٔ آثار تغییر اقلیم بر سامانه‌های منابع آب و کشاورزی دشت هشتگرد با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها

حدیثه رحیمی‌خوب[1*]، عباس ستوده‌نیا[2]، علی‌رضا مساح بوانی[3]، علی‌رضا گوهری[4]

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

۲. دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۴. گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۱۰ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷)

چکیده

جمعیت دشت هشتگرد، به دلیل توسعهٔ فعالیت‌های اقتصادی- اجتماعی، رشدی سریع دارد. این رشد جمعیت به بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و کمبود آب در بخش کشاورزی انجامیده است. از طرف دیگر، پدیدهٔ تغییر اقلیم می‌تواند کمبود منابع آب را در دوره‌های آتی تشدید کند. بنابراین، ارزیابی سامانه‌های منابع آب و کشاورزی این دشت به رویکردی جامع و چندرشته‌ای نیاز دارد. هدف این تحقیق شبیه‌سازی کمّی و کیفی آثار تغییر اقلیم و رشد جمعیت بر سامانه‌های منابع آب و کشاورزی دشت هشتگرد با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها بود. بدین منظور از خروجی‌های مدل HadCM3، تحت سناریوهای انتشار A2 و B1، استفاده شد و مدلی بر مبنای رویکرد پویایی سیستم‌ها، با درنظرگرفتن تعاملات و بازخوردهای درون سیستم، توسعه یافت. نتایج نشان داد در دورهٔ ۲۰۲۰- ۲۰۳۹ شاخص آسیب‌پذیری در بخش کشاورزی از ۰/۱ به ۰/۲۷، تحت سناریوی انتشار A2 نسبت به سناریوی ادامهٔ وضع موجود (B.a.U.)، افزایش می‌یابد؛ در حالی که این شاخص در دو بخش شرب و صنعت ثابت می‌ماند. در نتیجه، بخش کشاورزی بیشتر از دو بخش دیگر از تغییر اقلیم و رشد جمعیت آسیب خواهد دید.

کلیدواژگان: پویایی سیستم‌ها، تغییر اقلیم، دشت هشتگرد، HadCM3.

مقدمه

آب عامل اصلی تحولات پیچیدهٔ جهانی و توسعهٔ پایدار کشورهاست؛ طوری که بر اهمیت تأثیر امنیت آب بر بخش‌های مختلف کشورهای جهان، اعم از مسائل اقتصادی- اجتماعی و زیست‌محیطی، در گزارش «چالش‌های امنیت آبی در قرن ۲۱» تأکید شده است (Grey and Garrick, 2012). فشار بر منابع آب، به دلیل رشد جمعیت و پیشرفت اقتصادی- اجتماعی و تغییر اقلیم، روزبه‌روز بیشتر می‌شود (Vörösmarty *et al*., 2010). توزیع منابع آب و چرخهٔ هیدرولوژیکی تا حد زیادی تحت تأثیر افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو و بروز پدیدهٔ گرمایش جهانی است (Hagemann *et al*., 2013). پدیدهٔ تغییر اقلیم به افزایش دما و کاهش احتمالی بارش در بسیاری از مناطق، به‌ویژه مناطق گرم و خشک، می‌انجامد. بخش کشاورزی مصرف‌کنندهٔ عمدهٔ منابع آب است. امروزه در جهان بیش از ۷۰ درصد کل آب برداشت‌شده به بخش کشاورزی اختصاص دارد (UN-water, 2014). بنابراین، نخستین بخشی که با کمبود آب مواجه می‌شود بخش کشاورزی است (UN- water, 2006). کمبود آب بر همهٔ بخش‌های اقتصادی- اجتماعی تأثیر می‌گذارد و پایداری منابع طبیعی را تهدید می‌کند. علاوه بر این، محققان بر این باورند که تغییر اقلیم کمبود منابع آب را در دوره‌های آتی افزایش می‌دهد (Lobell *et al*., 2008).

مطالعهٔ عوامل مؤثر بر کمبود آب و مشکلات ناشی از آن به رویکردی درون‌بخشی و چندرشته‌ای در زمینهٔ مدیریت منابع آب نیاز دارد؛ رویکردی که مدیریت آب و منابع مرتبط را، به منظور به‌حداکثررساندن سطح رفاه اقتصادی- اجتماعی، تضمین کند. مدل‌سازی و ارزیابی یکپارچهٔ منابع آب در اواسط دههٔ ۱۹۸۰، به منزلهٔ واسطه‌ای بین علوم مختلف و مسائل پیچیدهٔ زیست‌محیطی، مانند تغییر اقلیم، مطرح شد (Akhtar *et al*., 2013). برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت سیستم‌های منابع آب باید همهٔ روابط اجتماعی- اقتصادی، مانند آموزش نامناسب و فشار جمعیت و فقر، را در بر گیرد (Loucks, 2005). روش‌های

*نویسندهٔ مسئول: Hadisrahimikhoob@yahoo.com

مختلفی برای شبیه‌سازی و ارزیابی منابع آب وجود دارد که متناسب با هدف کاربر به کار می‌رود. رویکرد پویایی سیستم‌ها، با درنظرگرفتن تعاملات و بازخوردهای درون سیستم، روشی نو برای مقابله با پیچیدگی‌های مدیریت منابع آب است (Simonovic and Rajasekaram, 2004).

در سال‌های اخیر، محققان در سراسر دنیا به رویکرد پویایی سیستم‌ها و جنبه‌های مختلف مدیریت منابع آب به طور گسترده توجه کرده‌اند (Madani and Marino, 2009; Gohari *et al*, 2013; Akhtar *et al*., 2013; Davies *et al*., 2009; Mirchi *et al*., 2010; Dawadi and Ahmad, 2013): مثلاً، مدلی برای ارزیابی یکپارچهٔ منابع آب در حوضهٔ آبریزی در غرب کانادا، با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها، توسعه داده شد. مدل مذکور شامل زیرمدل آبیاری برای تخمین نیاز آب آبیاری و تبخیر- تعرق پتانسیل و نیز زیرمدل اقتصادی برای محاسبهٔ ارزش آب به منظور استفاده در بخش‌های مختلف اقتصادی است (Hassanzadeh *et al*., 2014).

Davies and Simonivic (2011) مدل اقلیمی- اجتماعی- زیست‌محیطی ANEMI را در مقیاس جهانی با رویکرد پویایی سیستم‌ها توسعه دادند و تأکید کردند ارزیابی یکپارچه در این مقیاس می‌تواند موجب افزایش درک علمی و بهبود سیاست‌گذاری اجتماعی- اقتصادی شود. بررسی منابع آب حوضهٔ اوکاناگان[1] تحت تأثیر تغییر اقلیم با رویکرد پویایی سیستم‌ها نشان داد تغییر اقلیم به کاهش منابع آب در دسترس و افزایش تقاضای آب می‌انجامد و کمبود آب را تشدید می‌کند. مدل توسعه‌داده‌شده به کاربران امکان می‌دهد که آب در دسترس و تقاضای آب در بخش‌های کشاورزی و شرب را بررسی و راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم را شناسایی کنند (Langsdale *et al*., 2007).

بررسی‌ها نشان می‌دهد گرچه تا کنون مطالعات مختلفی در زمینهٔ تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب در نقاط مختلف دنیا انجام شده، در عمدهٔ این تحقیقات اثر تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی و منابع آب سطحی و زیرزمینی به صورت مجزا بررسی شده و به آثار بازخوردی بین آن‌ها توجه نشده است؛ در حالی که سیستم منابع آب سطحی و زیرزمینی بر سیستم کشاورزی تأثیر متقابل دارند و باید رفتار آن‌ها در تعامل با یک‌دیگر بررسی شود. علاوه بر این، برای رفع مشکلات کم‌آبی و افزایش امنیت آبی در دوره‌های آتی، به مطالعات و اقدامات در سطوح محلی (منطقه‌ای) و حوضهٔ آبریز و ملی نیاز است. این مطالعات و اقدامات باید برای همهٔ مناطق و حوضه‌های آبریز کشورها انجام شود تا بتوان آثار پدیدهٔ تغییر اقلیم را به صورت دینامیک بررسی کرد و راهکارهای سازگار برای مقابله با این پدیده را، با درنظرگرفتن تعاملات آن با سیستم‌های دیگر، ارائه داد (UN- water, 2006).

دشت هشتگرد، واقع در استان البرز، یکی از مناطقی است که به دلیل توسعهٔ بخش صنعت و نزدیکی به شهرهای بزرگ تهران و کرج، مهاجرپذیر است و رشد جمعیت آن بیش از متوسط رشد جمعیت ایران برآورد می‌شود (Statistical center of Iran, 2011). توسعهٔ بخش صنعت و افزایش جمعیت دشت کاهش حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی را در پی داشته است. از طرف دیگر، این دشت در سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی و در نتیجه خشک‌شدن بیش از پیش چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌ها روبه‌رو بوده است (Yekom Consulting Engineering Co., 2011). بدیهی است برای مطالعهٔ آثار تغییر اقلیم بر منابع آب (سطحی و زیرزمینی) دشت هشتگرد باید سایر عوامل تأثیرگذار، از قبیل رشد جمعیت و توسعهٔ بخش صنعت، به صورت پویا بررسی شود. هدف این تحقیق ارزیابی یکپارچهٔ سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی محدودهٔ مطالعاتی دشت هشتگرد، تحت تأثیر تغییر اقلیم، با رویکرد پویایی سیستم‌ها بود.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

دشت هشتگرد، با وسعت ۱۲۷۱ کیلومتر مربع، یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضهٔ آبریز دریاچهٔ نمک کشور ایران است و در شمال آن قرار دارد (شکل ۱). این حوضه بین طول‌های جغرافیایی ۵۰٫۳ تا ۵۱٫۰ درجهٔ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵٫۷ تا ۳۶٫۱ درجهٔ شمالی گسترده شده است. بارندگی سالیانه در این منطقه ۳۴۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانهٔ آن ۱۳ درجهٔ سانتی‌گراد است.

مصارف آب دشت هشتگرد در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. عمدهٔ آب سطحی منطقهٔ مطالعه‌شده از رودخانهٔ کردان تأمین می‌شود. آب سفره‌های زیرزمینی نیز اغلب از چاه‌ها برداشت می‌شود.

تولید سناریوهای اقلیمی

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در

1. Okanagan

دوره‌های آتی وجود دارد. در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی مدل‌های سه‌بعدی جفت‌شدهٔ گردش عمومی جوـ اقیانوس (AOGCM) است (Wibly and Harris, 2006). در این تحقیق، از خروجی مدل HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 استفاده شد. سپس، برای دسترسی به داده‌های اقلیمی منطقه در دوره‌های پایه و آتی، با واردکردن مختصات مکانی نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه (ایستگاه سینوپتیک قزوین) و همچنین طول دورهٔ آماری مورد نیاز از طریق مرکز توزیع داده[1] (DDC)، سری‌های زمانی دما و بارش در دورهٔ پایه (۱۹۷۱ـ ۱۹۹۰) و دورهٔ آتی (۲۰۲۰ـ ۲۰۳۹) به دست آمد. با توجه به اینکه خروجی‌های مدل AOGCM را نمی‌توان به طور مستقیم در مطالعات مختلف به منظور پیش‌بینی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای استفاده کرد، از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برای رفع این مشکل استفاده می‌شود (Massah Bavani and Morid, 2005). در این تحقیق روش ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از مدل مولد آب‌وهوا (LARS-WG) به کار رفت. این مدل یکی از مدل‌های پرکاربرد مولد داده‌های تصادفی اقلیمی است که برای تولید درجهٔ حرارت بیشینه و کمینهٔ هوا، تابش و بارش روزانه در یک ایستگاه، تحت شرایط تغییر اقلیم، به کار می‌رود.

پویایی سیستم‌ها

پویایی سیستم‌ها یک تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای توصیف ساختار سیستم‌های پیچیده و تجزیه‌وتحلیل رفتار دینامیکی آن‌هاست (Forrester, 1961). این رویکرد در اصل با هدف تسهیل تعاملات بین مدل‌های ذهنی[2] مدیران و مدل‌های قراردادی[3] تحلیلگران توسعه یافته است (Akhtar *et al*., 2013). پویایی سیستم‌ها با نگرش جامع به مسائل قادر است روابط و بازخورد فرایندهای طبیعی (هیدرولوژیک) را با جنبه‌های اجتماعیـ اقتصادی سیستم‌های منابع آب، با استفاده از ساختارهای ذخیره و جریان، بیان کند (Sterman, 2000; Draper *et al*., 2003). سیستم‌های منابع آب شامل تعامل عوامل مختلف است و عدم قطعیت در روابط خطی و غیر خطی میان این عوامل، بررسی و ارزیابی مسائل و مشکلات منابع آب را پیچیده‌تر می‌کند (Chen and Wei, 2014). به دلیل پیچیدگی مسائل سیستم‌های منابع آب و دیگر سیستم‌هایی که با آن تعامل دارند یا به آن وابسته‌اند، نگرشی جامع و سیستمی و آینده‌نگر ضرورت دارد؛ طوری که همهٔ جنبه‌های اثرگذار و تأثیر اجزا بر یک‌دیگر را شبیه‌سازی کند. بنابراین، در این زمینه، به منظور درک تأثیر متقابل زیرسیستم‌های مختلف در مدیریت صحیح و کارآمد مسائل پیچیده، مدیران به استفاده از مفهوم نگرش سیستمیک نیازمند دارند تا بتوانند در پایش وضعیت حال و آینده برای استخراج راهبردها و گزینه‌های مدیریتی موفق شوند. در این تحقیق روابط به کمک نرم‌افزار VensimPLE شبیه‌سازی شد.

ساختار مدل

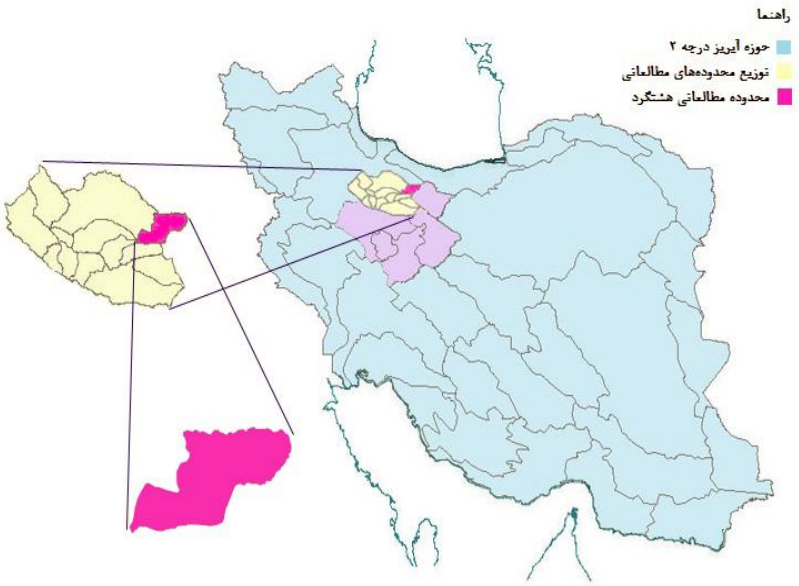
مدل مفهومی تبیین‌شده برای منطقهٔ مطالعاتی هشتگرد شامل سه زیرسیستم هیدرولوژیک، اقتصادیـ اجتماعی و کشاورزی بود.

زیرسیستم هیدرولوژیک

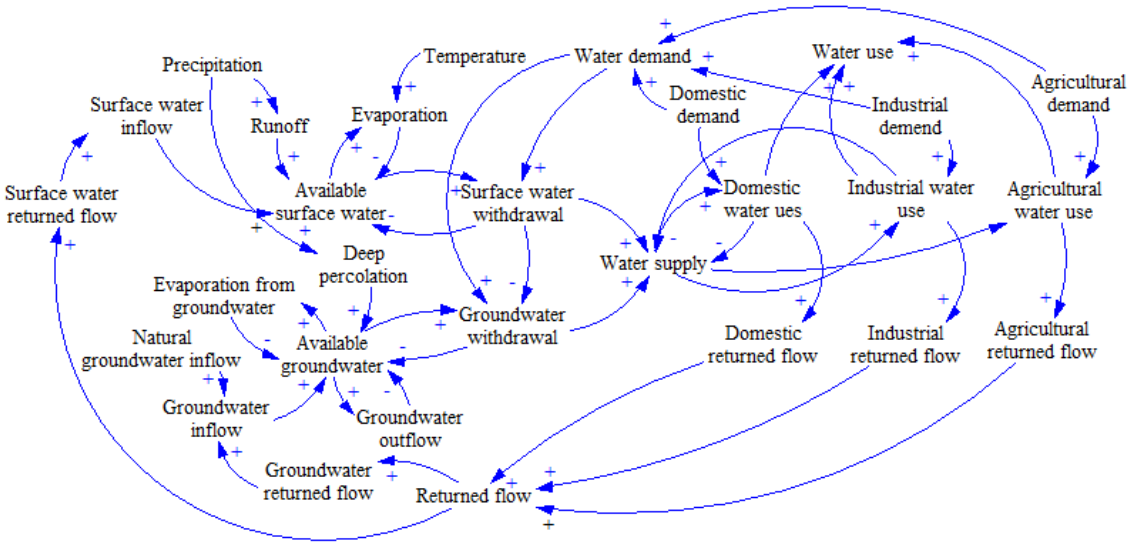
زیرسیستم هیدرولوژیک شامل روابط بازخوردی بین متغیرهای اقلیمی و منابع آب است. این زیرسیستم بر اساس معادلهٔ بیلان آب منابع سطحی و زیرزمینی یا به عبارتی با درنظرگرفتن همهٔ ورودی‌ها و خروجی‌ها در سطح منطقهٔ مطالعاتی هشتگرد ساخته شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکـ از قبیل دما، بارش، تبخیر، رواناب، جریان‌های طبیعی و همچنین تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی از طریق آب‌های برگشتیـ کنترل‌کنندهٔ تعادل آب در منطقهٔ مطالعاتی است. به منظور تطابق با وضعیت منطقهٔ مطالعاتی، آب به ترتیب اولویت به بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی تخصیص یافت. آب مورد نیاز کل محدوده ابتدا از منابع آب سطحی و در صورت کمبود این منابع از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌شود. جریان آب برگشتی از بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و خدمات به مثابهٔ درصدی از آب استفاده‌شده در هر یک از زیربخش‌ها به دو منبع آب سطحی و زیرزمینی افزوده می‌شود. میزان نشت آب‌های زیرزمینی به آب‌های سطحی، به علت پایین‌بودن سطح آب زیرزمینی و فقدان سفرهٔ معلق آب زیرزمینی، در محدودهٔ مطالعاتی در نظر گرفته نشد.

در این زیرسیستم، متغیرهای بارندگی و دما به صورت میانگین سالیانه وارد مدل شد. متغیرهای نفوذ عمقی و تبخیر از منابع آب سطحی به ترتیب به صورت تابعی از بارندگی و دما در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی رواناب برای دوره‌های آتی از روابط رگرسیونی بین بارندگی و رواناب در یک دورهٔ بیست‌ساله استفاده شد. متغیرهای تبخیر از منابع آب زیرزمینی، جریان طبیعی ورودی به آب زیرزمینی و جریان خروجی از محدودهٔ بیلان آب زیرزمینی در دورهٔ شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شد.

1. Data Distribution Center
2. Mental Models
3. Formal Models



شکل ۱. منطقهٔ مطالعه‌شده



شکل ۲. نمودار علّی و معلولی زیرسیستم هیدرولوژیک دشت هشتگرد به‌کاررفته در مدل Vensim

زیرسیستم اقتصادی‌ـ اجتماعی

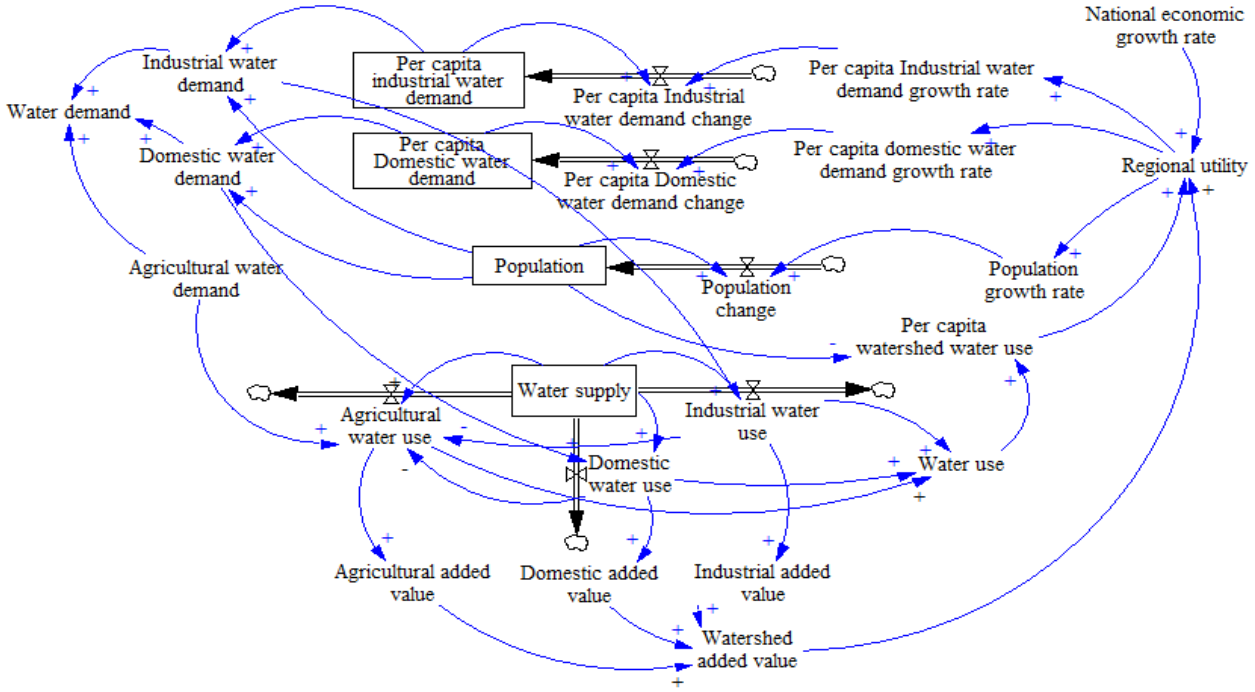
جمعیت، ارزش افزوده در زیربخش‌های کشاورزی و صنعت و خدمات، و مطلوبیت منطقه متغیرهای اصلی زیرسیستم اقتصادی‌ـ اجتماعی را تشکیل می‌دهند (شکل ۳). تقاضای آب در بخش‌های صنعت و شرب تحت تأثیر وضعیت اقتصادی‌ـ اجتماعی منطقه است. مطلوبیت منطقه به افزایش مهاجرت و جذب جمعیت در منطقه می‌انجامد که خود عامل افزایش سرانهٔ مصرف آب در بخش‌های صنعت و شرب است. افزایش سرانهٔ مصرف آب نیز سبب افزایش نرخ رشد سرانهٔ مصرف آب در بخش‌های مختلف می‌شود و به دنبال آن نیاز آبی کل دشت افزایش می‌یابد. از آنجا که بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در بخش‌های مختلف کشاورزی و صنعت و شرب متفاوت است، در این مدل ارزش افزوده مجموع بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در بخش‌های مختلف تعریف شده است. در این مطالعه مطلوبیت منطقه تحت تأثیر عواملی همچون نرخ رشد اقتصاد ملی، ارزش افزودهٔ ناشی از مصرف آب و سرانهٔ مصرف آب در نظر گرفته شد. نرخ رشد اقتصاد ملی به صورت عامل برون‌زا بر مطلوبیت حوضه تأثیرگذار است. رشد اقتصادی منطقه نیز با ارزیابی ارزش افزودهٔ

ناشی از مصرف آب در همان سال تعریف شد. سرانهٔ مصرف آب در حوضه نیز رابطه‌ای مستقیم با کل آب مصرف‌شده دارد. تا هنگامی که عرضهٔ آب با تقاضا برابر باشد و به عبارت دیگر، هیچ محدودیتی وجود نداشته باشد، حوضه با کمبود آب مواجه نمی‌شود و ساکنان آن در رفاه به سر می‌برند.

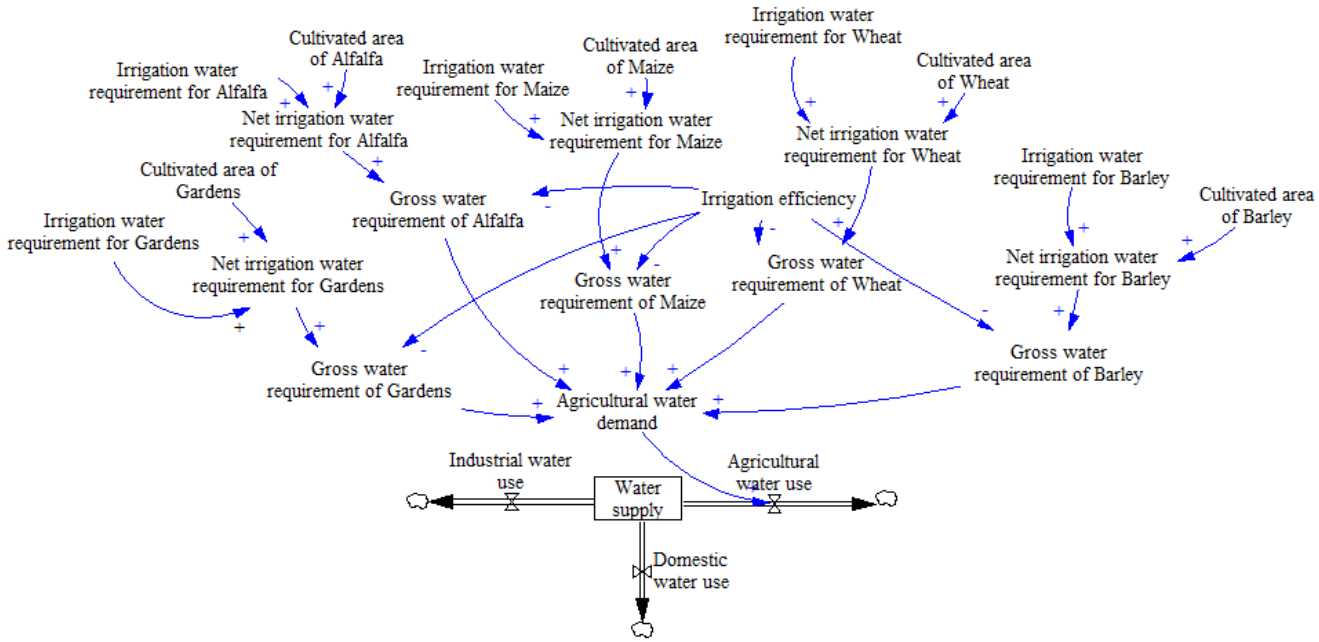
در این زیرسیستم، مقدار اولیه برای متغیر جمعیت و نیاز سرانهٔ آب بخش شرب و صنعت با استفاده از داده‌های سازمان آمار و شرکت آب منطقه‌ای استان تهران وارد مدل شد.

زیرسیستم کشاورزی

در منطقهٔ مطالعاتی هشتگرد انواع محصولات آبی کشت می‌شود. محصولات غالب کشاورزی منطقه عبارت‌اند از گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه و باغ‌ها (سیب، انگور، گردو، هلو). بر همین اساس زیرسیستم کشاورزی تعریف شد (شکل ۴). نیاز آبی محصولات ورودی مدل بودند. نیاز آبی ناخالص هر گیاه با احتساب بازده آبیاری به دست می‌آید و نیاز آبی کشاورزی از مجموع نیاز آبی ناخالص محاسبه‌شده برای همهٔ محصولات تعیین می‌شود.



شکل ۳. نمودار ذخیره و جریان زیرسیستم اقتصادی_ اجتماعی دشت هشتگرد به‌کاررفته در مدل Vensim



شکل ۴. نمودار ذخیره و جریان زیرسیستم کشاورزی دشت هشتگرد به‌کاررفته در مدل Vensim

مقادیر سطح زیر کشت محصولات از سازمان جهاد کشاورزی استخراج شد. نیاز آبی هر گیاه به کمک مدل بیلان آب به دست آمد. گفتنی است سطح زیر کشت محصولات در طول دورهٔ شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شد.

شاخص‌های ارزیابی منابع آب

در این مطالعه چهار شاخص منابع آب به منظور ارزیابی و مقایسهٔ آثار تغییر اقلیم در دوره‌های آتی به کار رفت. این شاخص‌ها شامل قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری، حداکثر کمبود و شاخص پایداری سیستم است. شاخص قابلیت اطمینان بر اساس رابطهٔ ۱ به صورت احتمال تأمین تقاضای آب در دورهٔ زمانی شبیه‌سازی‌شده با استفاده از منابع آب در دسترس تعریف می‌شود. این شاخص توانایی سیستم را در فراهم‌کردن و عرضهٔ آب کافی در درازمدت نشان می‌دهد (kleme *at el*., 1981; Hashimato *at al*., 1982).

$$Rel=\frac{\text{Number of years with } D=0}{N} \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

D نشان‌دهندهٔ کمبود آب و N تعداد سال یا دورهٔ شبیه‌سازی است.

شاخص آسیب‌پذیری بیانگر احتمال ناتوانی منابع آب در تأمین تقاضاست. این شاخص در سال iام به صورت مقدار مورد انتظار کمبود یا میانگین کمبود نسبت به میانگین سالیانهٔ تقاضا در دورهٔ کمبود تعریف می‌شود (Sandoval *et al*., 2011).

(رابطهٔ ۲)

$$Vul=\frac{\sum_{i=1}^{n} D_i \,/\, \text{Number of years with } D>0}{\text{Water demand}}$$

بر اساس رابطهٔ ۲، میانگین کمبود از حاصل جمع میزان کمبود آب در طول دورهٔ شبیه‌سازی با توجه به تعداد سال‌هایی که میزان کمبود آب بزرگ‌تر از ۰ است به دست می‌آید.

شاخص کمبود حداکثر نشان‌دهندهٔ حداکثر کمبود آب در سال iام در هر بخش است (رابطهٔ ۳). این شاخص به صورت شاخصی بی‌بعد از تقسیم حداکثر کمبود سالیانهٔ هر بخش بر نیاز آب سالیانهٔ همان بخش محاسبه می‌شود (Sandoval *et al*., 2011). حداکثر کمبود برابر با حداکثر حجم کمبود آب در هر بخش در طول دورهٔ شبیه‌سازی است.

$$\text{Max Deficit}=\frac{\text{Max}(D_{annual})}{\text{Water demand}} \quad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

شاخص پایداری منابع آب به صورت تابعی از شاخص‌های قابلیت اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و کمبود حداکثر طبق رابطهٔ ۴ محاسبه می‌شود (Loucks, 1997).

$$SI=\left[Rel\times(1-Vul)\times(1-Max.Def)\right]^{1/3} \quad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

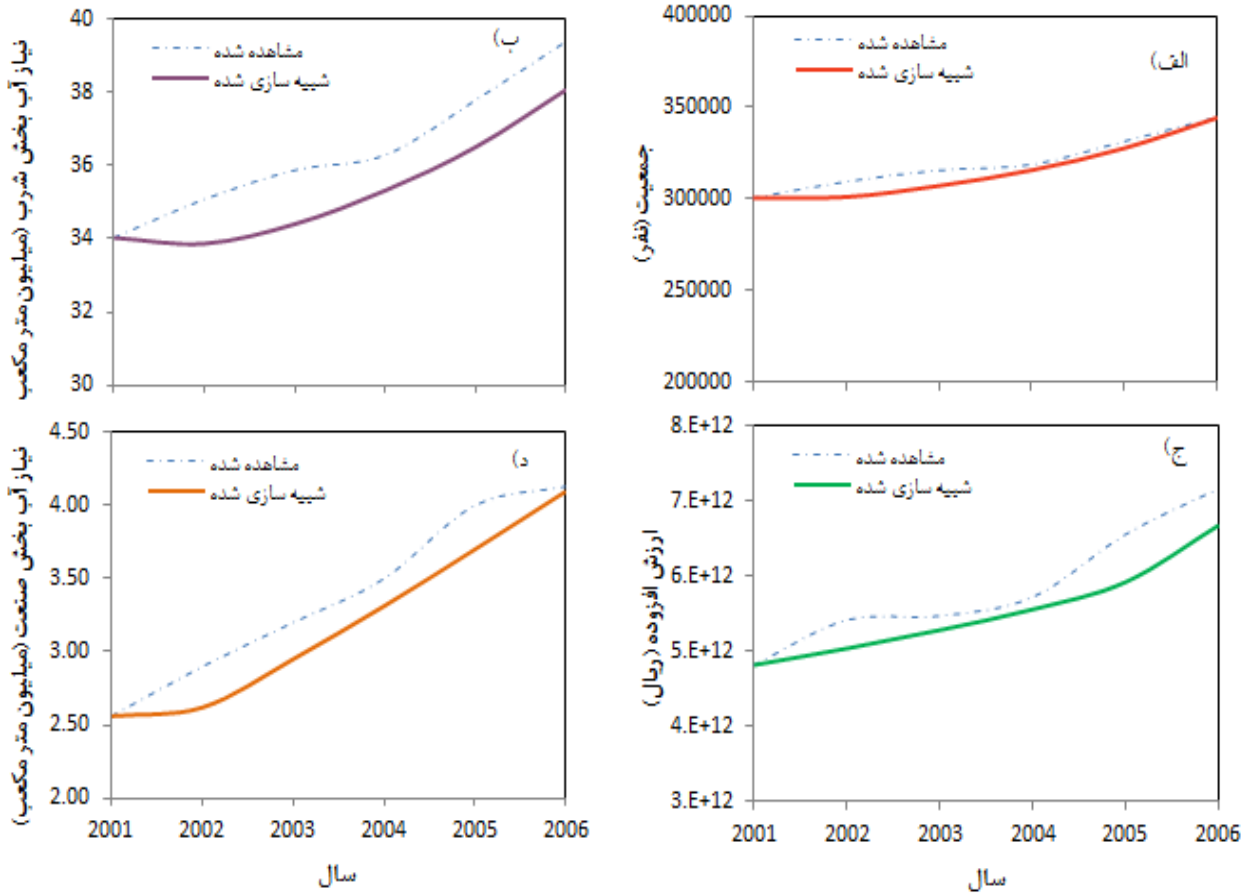
یافته‌ها و بحث

شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم منطقه به کمک مدل HadCM3

سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش منطقه به کمک مدل HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی شد. جدول ۱ سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش منطقه را تحت دو سناریوی انتشار B1 و A2 در دورهٔ ۲۰۲۰ـ۲۰۳۹ نسبت به دورهٔ پایه نشان می‌دهد.

جدول ۱. سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش منطقه تحت دو سناریوی انتشار B1 و A2

ماه	بارش		دما	
	HadCM3-B1	HadCM3-A2	HadCM3-B1	HadCM3-A2
ژانویه	۱٫۱۴	۰٫۹۲	۰٫۳	۰٫۱
فوریه	۰٫۸۸	۰٫۷۷	۱٫۲	۰٫۵
مارس	۱٫۲۴	۱٫۱۰	۱٫۷	۱٫۹
آوریل	۱٫۰۴	۰٫۹۲	۰٫۸	۱٫۶
مه	۱٫۰۳	۰٫۸۸	۱٫۲	۱٫۹
ژوئن	۱٫۱۲	۰٫۷۹	۲٫۲	۲٫۹
ژوئیه	۰٫۸۸	۰٫۵۶	۱٫۴	۲٫۳
اوت	۰٫۴۷	۰٫۵۲	۱٫۹	۱٫۴
سپتامبر	۰٫۸۵	۰٫۷۲	۱٫۷	۱٫۹
اکتبر	۱٫۲۲	۱٫۱۶	۱٫۰	۱٫۷
نوامبر	۱٫۳۶	۱٫۳۴	-۰٫۳	۱٫۴
دسامبر	۱٫۲۴	۱٫۱۴	-۰٫۱	۱٫۷



شکل ۵. مقایسهٔ خروجی مدل سیستم دینامیک با داده‌های مشاهداتی طی آزمون تکرار رفتار

الف) متغیر جمعیت؛ ب) متغیر نیاز آبی بخش شرب؛ ج) متغیر ارزش افزوده؛ د) متغیر نیاز آبی بخش صنعت

مقادیر مثبت جدول برای سناریوی دما نشان می‌دهد در بیشتر ماه‌ها مدل HadCM3 در دورهٔ ۲۰۲۰ـ ۲۰۳۹ افزایش دما را برای منطقه شبیه‌سازی می‌کند. بیشترین افزایش دما در ماه ژوئن تحت سناریوی A2 و معادل ۲/۹ درجهٔ سانتی‌گراد است. به طور کلی می‌توان گفت منطقهٔ مطالعاتی در اثر تغییر اقلیم گرم‌تر و خشک‌تر خواهد شد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان افزایش بارش در ماه نوامبر و بیشترین میزان کاهش در ماه اوت تحت سناریوی B1 است.

صحت‌سنجی مدل سیستم دینامیک

قبل از به‌کارگیری مدل، باید از عملکرد صحیح مدل مطمئن شد. توانایی مدل در شبیه‌سازی ساختار سیستم با بررسی بازسازی رفتار سیستم در گذشته و تحلیل حساسیت سنجیده می‌شود. در این تحقیق، از آزمون مقایسهٔ نتایج خروجی مدل با رفتار مشاهده‌شدهٔ مسئله (آزمون تکرار رفتار) استفاده شد. صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ صورت گرفت. این بررسی با ابزارهای آماری، مانند ضریب تبیین[1] و جذر میانگین مربعات خطای نسبی[2]، انجام شد.

شکل ۵ مقایسهٔ مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ متغیرهای جمعیت، نیاز آبی بخش شرب، نیاز آبی بخش صنعت و ارزش افزوده را در آزمون‌های تکرار رفتار نشان می‌دهد. در نگاهی کلی، همبستگی روندهای مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ متغیرهای آزمون‌شده برای مدلی یکپارچه پذیرفتنی است. این همبستگی نشان می‌دهد مدل به‌خوبی واسنجی شده است.

نتایج آزمون تکرار رفتار برای متغیرهای منتخب در جدول ۲ می‌آید. ضریب تبیین مقداری بدون بعد است و در بهترین حالت این مقدار برابر ۱ خواهد بود. همچنین، ضریب جذر میانگین مربعات خطای نسبی، که نشان‌دهندهٔ میزان خطای مدل است، بدون بعد است و مطلوب‌ترین مقدار برای آن ۰ است.

1. Coefficient of determination(R2)
2. Relative Root Mean Square Error(RMSEr)

جدول ۲. نتایج آزمون‌های آماری متغیرهای منتخب مدل

مشخصهٔ آماری	جمعیت	نیاز آب بخش شرب	نیاز آب بخش صنعت	ارزش افزوده
ضریب تبیین (R^2)	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۶
جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSEr) بر حسب درصد	۱/۸۳	۳/۴۳	۶/۴۳	۶/۴۶

رفتار متغیرهای اصلی سیستم تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی

بررسی رفتار متغیرهای اصلی در سیستم دشت هشتگرد، تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی، اطلاعات ارزشمندی برای سیاست‌های مدیریتی و راه‌کارهای سازگاری فراهم می‌آورد. مدل توسعه‌یافته تحت تأثیر تغییر اقلیم برای دو سناریوی انتشار A2 و B1 و سناریوی حفظ شرایط موجود[1] در دوره‌های آتی اجرا شد تا بتوان رفتار متغیرهای راهبردی منطقه را در دورهٔ ۲۰۲۰ـ ۲۰۳۹ بررسی و ارزیابی کرد.

رفتار متغیرهای اصلی در زیرسیستم اقتصادی‌ـ اجتماعی

مدل توسعه‌داده‌شده با استفاده از پارامترهای ورودی جدید، شامل دما و بارش و نیاز آبی محصولات کشاورزی منطقه، در دوره‌های آتی، تحت سناریوهای انتشار A2 و B1، اجرا و الگوهای رفتاری در طول زمان شبیه‌سازی شد. نمای گرافیکی و توصیف این الگوهای رفتاری برای متغیرهای کلیدی زیرسیستم اقتصادی‌ـ اجتماعی، شامل جمعیت و نیاز آب بخش شرب و صنعت، در شکل ۶ می‌آید. نتایج شبیه‌سازی برای ادامهٔ شرایط موجود در دوره‌های آتی (B.a.U.) نیز به مثابهٔ مرجع، برای مقایسه، ارائه شد.

نتایج نشان می‌دهد آثار منفی تغییر اقلیم بر میزان منابع آب در دسترس به کاهش مطلوبیت منطقه می‌انجامد. سطح بسیار پایین مطلوبیت منطقه تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 موجب کاهش نرخ رشد جمعیت و نیاز آب در بخش‌های شرب و صنعت در مقایسه با مقادیر مشابه در دورهٔ پایه می‌شود. سناریوی B1 در مقایسه با سناریوی A2 شرایط نسبتاً مرطوب و پربارش را در منطقه شبیه‌سازی می‌کند و نسبت به سناریوی A2 مطلوبیت بیشتری دارد. در مقابل سناریوی A2 نشان‌دهندهٔ شرایط گرم و خشک است و شاخص مطلوبیت منطقه را پایین‌تر برآورد می‌کند. بنابراین، مطلوبیت منطقه و به تبع آن روند رشد جمعیت و نیاز آب بخش شرب و صنعت تحت سناریوی انتشار A2 پایین‌تر از سناریوی B1 است.

رفتار متغیرهای اصلی در زیرسیستم کشاورزی

الگوهای رفتاری متغیرهای اصلی زیرسیستم کشاورزی در طول دورهٔ شبیه‌سازی در شکل ۷ می‌آید.

بر اساس شکل ۷ الف، افزایش دما موجب افزایش نیاز آب بخش کشاورزی می‌شود. مقادیر نیاز خالص بخش کشاورزی تحت سناریوی انتشار A2 بیشتر از سناریوی انتشار B1 است. با توجه به اینکه سناریوی A2 شرایط گرم و خشک منطقه را نشان می‌دهد، نیاز بخش کشاورزی در این سناریو نسبت به دو سناریوی دیگر بیشتر است. کمبود آب در بخش کشاورزی نیز در طول دورهٔ پایه و آتی شبیه‌سازی شد. شکل (۷ ب) نشان می‌دهد پدیدهٔ تغییر اقلیم به تشدید کمبود و تنش آب در بخش کشاورزی می‌انجامد.

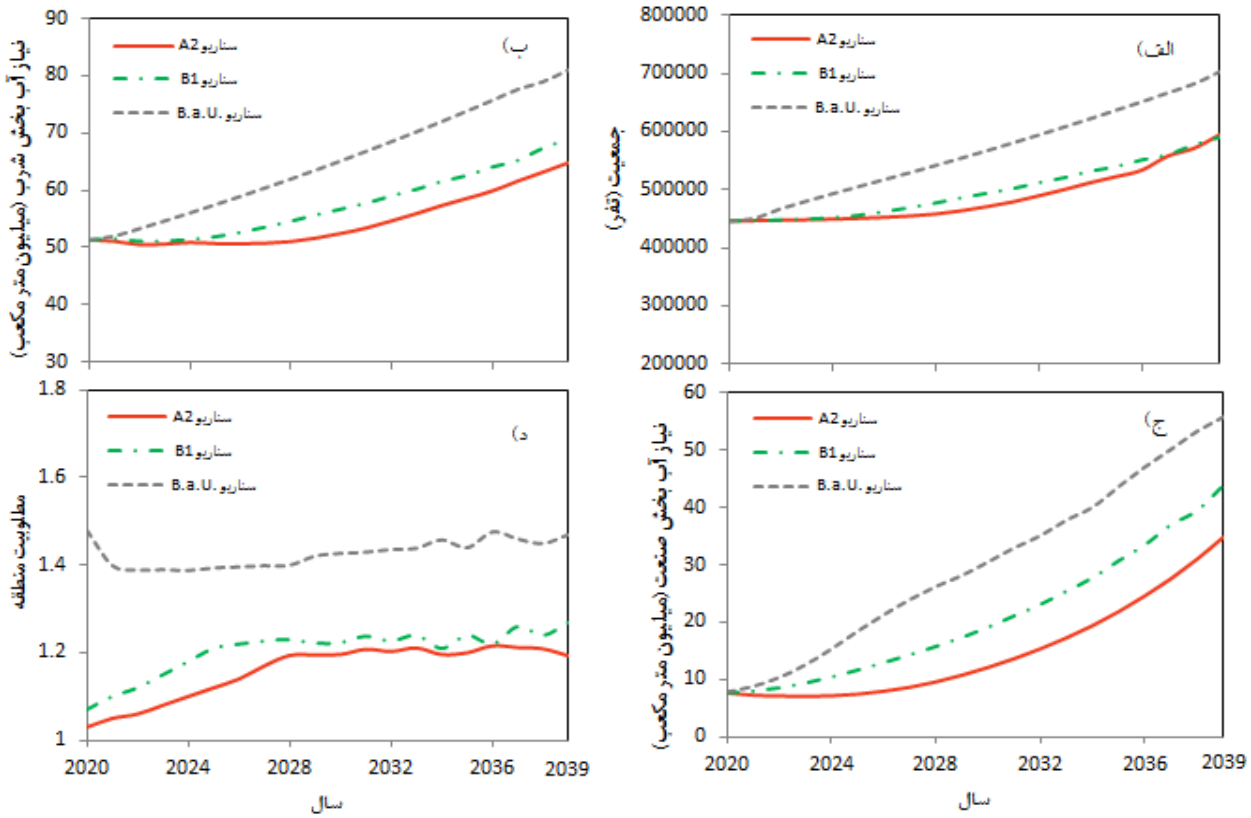
آثار تغییر اقلیم بر شاخص‌های منابع آب

تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه به کمک چهارشاخص ارزیابی، تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1، بررسی شد. جدول ۳ مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌های ارزیابی را تحت سناریوی انتشار A2 و B1 نشان می‌دهد. مقادیر شاخص‌ها برای سناریوی ادامهٔ وضع موجود نیز برای مقایسه می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیاز آب در بخش کشاورزی تحت هر دو سناریوی انتشار بالاست و به طور کامل تأمین نمی‌شود (مقادیر شاخص‌های Rel برابر ۰). از آنجا که منابع آب در منطقهٔ مطالعاتی به ترتیب اولویت به بخش شرب، صنعت و کشاورزی تخصیص می‌یابد، نیاز آب بخش شرب و صنعت به طور کامل تأمین می‌شود (مقادیر شاخص‌های Rel و SI مساوی ۱ و شاخص Vul مساوی ۰)؛ در حالی که بخش کشاورزی با کمبود آب مواجه است و با تغییر اقلیم آسیب می‌بیند (Vul بزرگ‌تر از ۰ و Max.Deficit نسبتاً بالا).

نتیجه‌گیری

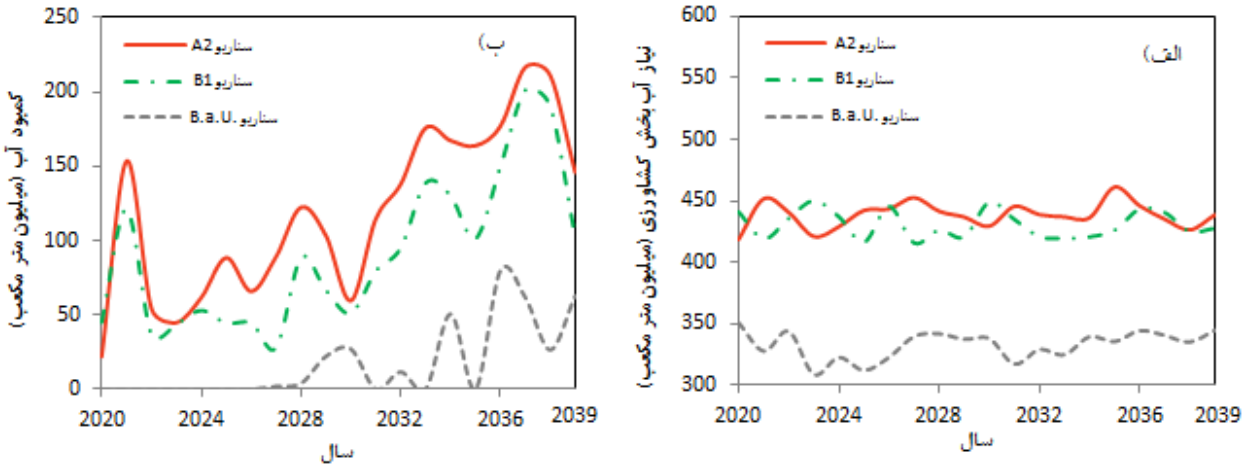
این مطالعه با هدف ارزیابی یکپارچهٔ آثار تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و کشاورزی محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد انجام گرفت. مدلی جامع بر مبنای رویکرد پویایی سیستم‌ها توسعه داده شد تا بتوان تأثیر این پدیده را در تعامل با سایر محرک‌های اجتماعی و اقتصادی بررسی کرد. در این رویکرد روابط و بازخورد متغیرهای موجود در زیرسیستم‌ها با نمودارهای

1. Business as usual



شکل ۶. رفتار متغیرهای اصلی زیرسیستم اقتصادی_اجتماعی در دوره‌های آتی

الف) متغیر جمعیت؛ ب) متغیر نیاز آب بخش شرب؛ ج) متغیر نیاز آب بخش صنعت؛ د) متغیر مطلوبیت منطقه



شکل ۷. رفتار متغیرهای اصلی زیرسیستم کشاورزی در دوره‌های آتی

الف) متغیر نیاز آب بخش کشاورزی؛ ب) متغیر کمبود آب در بخش کشاورزی

جدول ۳. نتایج شاخص‌های منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹

سناریو اقلیمی	بخش کشاورزی				بخش شرب و صنعت			
	SI index	Max. Deficit	Vul Index	Rel Index	SI index	Max. Deficit	Vul Index	Rel Index
A2	۰/۰۰	۰/۴۹	۰/۲۷	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰
B1	۰/۰۰	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰
B.a.U.	۰/۷۰	۰/۲۴	۰/۱۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰

علت و معلولی و نمودار ذخیره و جریان بیان شد. از مدل اقلیمی HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 به منظور بررسی آثار تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و کشاورزی دشت هشتگرد استفاده شد. ریزمقیاس‌نمایی آماری نشان داد درجهٔ حرارت منطقه در اکثر ماه‌های سال افزایش می‌یابد و این میزان افزایش در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. درجهٔ حرارت سالیانه به طور متوسط در دورهٔ ۲۰۲۰ـ ۲۰۳۹ تحت سناریوی انتشار A2 و B1 به ترتیب ۱٫۳ و ۱٫۰ درجهٔ سلسیوس نسبت به دورهٔ ۱۹۷۱ـ ۱۹۹۰ افزایش می‌یابد. تغییرات بارندگی ماهیانه روند کلی صعودی یا نزولی را نشان نمی‌دهد. با این حال، متوسط میزان بارندگی در زمستان تحت سناریوی انتشار A2 با کاهش ۹٫۱ درصدی روبه‌رو می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد آثار منفی پدیدهٔ تغییر اقلیم به تشدید تنش و کمبود آب و در نتیجه افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌انجامد. از طرفی، کمبود منابع آب به کاهش مطلوبیت منطقه و کاهش نرخ رشد جمعیت و نیاز آب در بخش‌های صنعت و شرب نسبت به سناریوی ادامهٔ وضع موجود منجر می‌شود. چهار شاخص منابع آبـ شامل قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری، حداکثر کمبود، شاخص پایداری سیستمـ به منظور ارزیابی و مقایسهٔ آثار تغییر اقلیم در دوره‌های آتی مقایسه شد. نتایج نشان داد از آنجا که منابع آب در منطقهٔ مطالعاتی به ترتیب اولویت به بخش شرب، صنعت و کشاورزی تخصیص می‌یابد، آب مورد نیاز بخش شرب و صنعت در دوره‌های آتی به طور کامل تأمین می‌شود و شاخص‌های منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییری نمی‌کند؛ در حالی که بخش کشاورزی با کمبود آب مواجه می‌شود و در مقایسه با دو بخش شرب و صنعت با تغییر اقلیم آسیب می‌بیند، به طوری که شاخص آسیب‌پذیری در بخش کشاورزی تحت سناریوی انتشار A2 و B1 نسبت به سناریوی ادامهٔ وضع موجود (B.a.U.) به ترتیب ۲٫۷ و ۲٫۱ برابر می‌شود.

REFERENCES

Akhtar, M. K., Wibe, J., Simonovic, S. P., and MacGee, J. (2013). 'Integrated assessment model of society-biosphere-climate-economy-energy system'. *Environmental modeling& Software*. 49: 1-21.

Chen, Z. and Wei, S. (2014). 'Application of system dynamics to water security research'.*Water resources management*. 28: 287-300.

Davies, E. G. R. and Simonovic, S. P. (2009). 'Energy Sector for the Integrated System Dynamics Model for Analyzing Behaviour of the Social-Economic-Climatic Model'. *Water Resources Research Report* .no. 063, Facility for Intelligent Decision Support. Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, p. 191.

Davies, E. G. R. and Simonovic, S. P. (2011). 'Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system'. *Advances in Water Resources*, 34(6), 684-700.

Dawadi, S. and Ahmad, S. (2013). 'Evaluating the impact of demand-side management of water resources under changing climatic conditions and increasing population'. *Journal of environmental management*. 114: 261-275.

Draper, A. J., Jenkins, M. W., Kirby, K. W., Lund, J. R., and Howitt, R. E. (2003). 'Economic engineering optimization for California water management'. *Journal of water resources planning and management. ASCE*. 129: 155-164.

Forrester, J. W. 1961. *Industrial Dynamics,* MIT Press, Cambridge.

Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, and Madani, K. (2013). 'Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire'. *Journal of Hydrology* . 491: 23-39.

Grey, D. and Garrick, D. (2012). 'Water security as a defining of 21st century challenge. Water Security, Risk and Society Cinference.

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D. B., Flowell, S., Gosling, S. N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Ludwing, F., Voss, F., and Wiltshire, A. J. (2013). 'Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models'. *Earth System Dynamics*.4: 129-144.

Hassanzadeh, E., Elshorbaghy, A., Wheater, H., and Gober, P. (2014). 'Managing water in complex system: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada'. *Journal of Environmental modeling& Software.*58: 12-26.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). 'Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation'. *Water Resources*. 18: 14-20.

Langsdale, S., Beall, A., Carmichael, J., Cohen, S., and Forster, C. (2007). 'An Exploration of Water Resources Futures under Climate Change Using System Dynamics Modeling', *Integrated Assessment* , 7: 51-79.

Lobell, D., Burke, M., Tebaldi, C., Mastrandera, M., Falcon, W., and Naylor, R. (2008) .Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. Science.319 (5863), 607-610.

Loucks, D. P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrology Sci*. *J*. 42: 513-530.

Loucks D. P. and van Beek, E. (2005). 'Water Resources Systems Planning and Management.' United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.

Madani, K. and Marino, M. A. (2009). 'System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin'. *Water Resources Management*. 23: 2163-2187.

Massah Bavani, A. R. and Morid, S. (2005). 'The impacts of climate change on water resources and agricultural production'. *Journal of Water Resources*. 1: 40-47. (In Farsi).

Mirchi, A., Watkins, D. W. Jr., Madani, K. (2010). 'Modeling for watershed planning, management and decision making'. In: Vaughn JC (ed) Watersheds management, restoration and environmental impact. Nova Science Publishers, Hauppauge, New York.

Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., and Loucks, D. P. (2011). 'Sustainability index for water resources planning and management'. *Journal of water resources planning management*. 137: 381-390.

Simonovic, S. P. and Rajasekaram, V. (2004). Integrated analyses of Canada's water resources: a system dynamics approach. *Can. Water Resour. J.* 29: 223-250.

Statistical center of Iran. (2011). *Population and housing census report*, from http://www.amar.org.ir.

Sterman, J. D. (2000). Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill Higher Education, New York.

UN-Water. (2006). Coping with water scarcity: a strategic issue and priority for system-wide action.

Un-Water. (2014). Annual report: Water and energy Facts and Figures.

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Reidy Liermann, C., and Davies, P. M. (2010). 'Global threats to human water security and river biodiversity'. *Journal of Science*. 467(7315): 555-561.

Wilby, R. L. and Harris, I. (2006). 'A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK'. *Water resources research.* 42(2): 1-10.

Yekom Consulting Engineering Co., (2011). Determination of resources and consumption of water in the Namak Lake Basin. Iran (In Farsi).