

تحلیل دینامیکی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مبتنی بر همبست آب - غذا - انرژی (مورد مطالعاتی: استان البرز)

مهدی رحمانی^۱، سید حبیب موسوی جهرمی^{۲*} و حسین حسن‌پور درویشی^۳

چکیده

مطابق با رتبه‌بندی انستیتوی جهانی منابع، ایران با رتبه ۱۴ استرس آبی در جهان، در بین ۲۰ کشوری که بالاترین استرس منابع آبی را در جهان دارند، قرار دارد. روند فعلی برداشت از منابع آب زیرزمینی در ایران یک‌روند ناپایدار است و ادامه آن آسیب‌های جبران‌ناپذیر جدی بر کمیت و کیفیت آبخوان‌ها خواهد زد. در میان رویکردهای مدیریت پایدار منابع آب، همبست آب - غذا - انرژی مقدمات لازم برای مدیریت پایدار منابع محدود موجود را به‌صورت یکپارچه فراهم می‌آورد. پژوهش حاضر به تحلیل دینامیکی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی بر مبنای همبست آب - غذا - انرژی پرداخته و راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را با توجه به روند تغییرات جمعیت، رشد اقتصادی و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. برای این منظور مدل پویایی سیستم با استفاده از داده‌های استان البرز طراحی شد. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، سناریوهای بهبود امنیت منابع آب زیرزمینی شامل: سناریو بهره‌برداری بهینه منابع تأمین آب شامل سیاست تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها؛ سیاست مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز و کنترل برداشت‌های غیرمجاز و سیاست احداث و بهره‌برداری سامانه‌های ذخیره‌سازی و استحصال آب باران و فاضلاب و استفاده مجدد، سناریوی مدیریت تقاضای آب کشاورزی شامل سیاست‌های توسعه سیستم‌های آبیاری، ترویج الگوی کشت مناسب با شرایط اقلیمی و توان اکولوژیکی، سیاست کاهش ضایعات کشاورزی در طول دوره تولید و سیاست توسعه عملکرد محصولات کشاورزی و توسعه کشت مکانیزه و سناریوی مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی شامل سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف و کاهش اتلاف انرژی الکتریکی، احداث نیروگاه بازیافت حرارت از فرایندهای صنعتی و بهره‌برداری از پتانسیل انرژی تجدیدپذیر خورشیدی طراحی و نتایج ارزیابی شد. یافته‌های مدل دینامیکی نشان داد سیاست ترکیبی به‌عنوان بهترین راهکار امنیت منابع آب زیرزمینی در راستای مدیریت پایدار منابع آب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، امنیت منابع، همبست آب - غذا - انرژی، تحلیل دینامیکی سیاست‌ها.

ارجاع: رحمانی م. موسوی جهرمی س. ح. و حسن‌پور درویشی ح. ۱۴۰۲ تحلیل دینامیکی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مبتنی بر همبست آب - غذا - انرژی (مورد مطالعاتی: استان البرز). مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۲۳-۳۰. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2023.14174.2476>

۱ - دانشجوی دکتری رشته عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

۲ - استاد گروه عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

۳ - دانشیار گروه عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

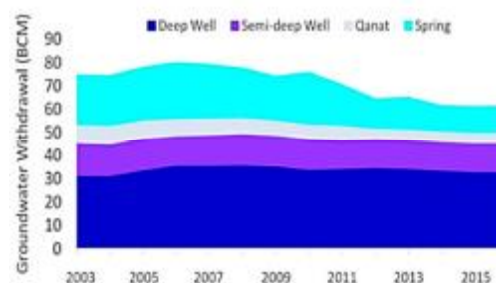
* نویسنده مسئول: h-mousavi@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

مقدمه

براساس گزارش مرکز بین‌المللی ارزیابی منابع آب زیرزمینی، کشور ایران با جمعیت به‌مراتب کمتر از کشورهای هند، چین، آمریکا و پاکستان در مقام پنجم با بیش از ۱۰۰ درصد برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی نسبت به تغذیه آن‌ها در دنیا قرار دارد (مرکز بین‌المللی ارزیابی منابع آب زیرزمینی، ۲۰۱۴) در دهه‌های پیش، مطابق با آمارها، ایران از ۱۳۰ میلیارد مترمکعب منابع آب زیرزمینی برخوردار بود؛ اما در ۲۰ سال گذشته منابع آب تجدیدشونده به ۱۱۰ میلیارد مترمکعب و در ۶ سال گذشته به کمتر از ۱۰۰ میلیارد مترمکعب کاهش یافته است (پایگاه اطلاع‌رسانی وزارت نیرو، ۱۳۹۵). برداشت‌های بی‌رویه، حفر چاه‌های غیرمجاز و عدم نظارت کافی بر میزان برداشت‌های فراتر از میزان پروانه بهره‌برداری موجب افت سطح و کاهش کیفیت آب زیرزمینی، نشست زمین در تعدادی از دشت‌ها و پایین آمدن محسوس آبدی چاه‌ها و در معرض نابودی قرارگرفتن تعدادی از آبخوان‌های کشور شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تعداد چاه‌ها به رقم بالای ۶۰۰ هزار حلقه در کشور رسیده است و از این تعداد چاه، بیش از ۴۶ میلیارد مترمکعب آب برداشت می‌شود. روند فعلی برداشت از منابع آب زیرزمینی در ایران یک روند ناپایدار است و ادامه آن آسیب‌های جبران‌ناپذیر جدی بر کمیت و کیفیت آبخوان‌ها خواهد زد (گوهری و همکاران، ۲۰۱۷ و مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۶).



شکل ۱- روند برداشت از انواع منابع آب زیرزمینی در ایران و تعداد چاه‌های آب (گوهری و همکاران، ۲۰۱۷)

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی بر استفاده از منابع آب زیرزمینی برای مدت نامحدود، بدون ایجاد پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی یا اجتماعی غیرقابل قبول تأکید می‌کند (سنت آرپاریکو و همکاران، ۲۰۱۵). در تعریف

دیگری مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی بر مبنای آبدی پایدار، به مدیریت بهره‌برداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی به‌طوری که پیامدهای نامطلوب وقوع نیابد، تعبیر می‌شود. در این تعریف، منظور از پیامدهای نامطلوب، افت مزمن سطح آب زیرزمینی، کاهش ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی، نشست زمین و کاهش آب‌های سطحی مرتبط با آب زیرزمینی است (اداره منابع آب کالیفرنیا، ۲۰۱۵). در سال‌های اخیر مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی موردتوجه پژوهشگران بسیاری بوده و مطالعات گسترده‌ای به‌منظور یافتن استراتژی پایدار منابع آب زیرزمینی انجام شده است. برای نمونه راثو و پراساد (۲۰۲۰) به تخمین تأثیر استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در هندوستان پرداخته و استراتژی‌های مدیریت پایدار آب زیرزمینی را پیشنهاد داده‌اند. ژیا و همکاران (۲۰۱۹) سیستم ارزیابی پایدار منابع آب زیرزمینی را در چین مطرح کرده‌اند. داس و همکاران (۲۰۲۰) با توجه به تغییرات اقلیمی به بررسی پایدار آب‌های زیرزمینی در مناطق آبی هند پرداختند.

در میان رویکردهای مدیریت پایدار منابع آب، رویکرد همبست آب- غذا- انرژی یکی از رویکردهای شناخته‌شده‌ای است که در مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۱، با هدف ارتباط بین آب و توسعه اقتصادی و امنیت منابع مطرح شده است (هاف، ۲۰۱۱). رویکرد همبست آب- غذا- انرژی مقدمات لازم برای مدیریت پایدار منابع محدود موجود را به‌صورت یکپارچه فراهم می‌آورد. تعداد محدودی از پژوهش‌ها به توسعه مدل سیاست‌گذاری با رویکرد همبست آب- غذا- انرژی به‌منظور یکپارچگی بین بخش‌ها پرداخته‌اند. اختر و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی کیفیت و کمیت تغییرات منابع آب با توجه به جمعیت، آب و هوا، اقتصاد، انرژی و غذا در مقیاس کانادا پرداخته‌اند. کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی پویایی سیستم مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر امنیت منابع آب، غذا و انرژی در جلگه خوزستان پرداخته‌اند. صمدی فروشانی و همکاران (۲۰۲۲) به مدیریت یکپارچه منابع آب براساس حکمرانی آب و پیوند آب- غذا- انرژی با استفاده از پویایی سیستم و رویکردهای تحلیل شبکه اجتماعی پرداختند. صمدی فروشانی و همکاران (۱۴۰۱) به تحلیل ساختار حکمرانی منابع آب ایران مبتنی بر همبست آب- غذا- انرژی پرداختند. ون و همکاران

مختلف، انتخاب و پیاده‌سازی راه‌حل مناسب (استرمن، ۲۰۰۰). منطبق با روش‌شناسی پویایی سیستم، پس از فرموله‌کردن فرضیه‌های پویا، به‌منظور ساخت مدل جریان روندهای متغیرها در طول زمان موردتوجه قرار گرفت و با توجه به این روندها و براساس قوانین ریاضی و توابع رگرسیونی ارتباط بین متغیرها، فرموله شد. در ادامه نمودار جریان در شکل ۲ ارائه شده است. شبیه‌سازی اولیه مدل پویا در افق زمانی ۲۰ ساله صورت گرفته است. سال مبنا در مدل ۱۳۹۰ است و از داده‌های سری زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ برای ارزیابی اعتبار رفتاری مدل استفاده شده است. جمع‌آوری اطلاعات آماری به استناد نتایج عملکرد وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، سدهای کشور، میزان ارزش افزوده با توجه به گزارش‌های مرکز آمار ایران و سازمان مدیریت برنامه و بودجه کشور در نظر گرفته شده است. اعتبارسنجی مدل شامل آزمون‌های برازندگی، آزمون سازگاری ابعاد، آزمون کفایت مرز، آزمون بازتولید رفتار و آزمون خطای انتگرال‌گیری انجام شد. از نظر رفتاری نیز رفتار متغیرهای مدل موردتأیید خبرگان قرار گرفت. به‌طوری‌که با ارائه نتایج پیش‌بینی رفتار متغیرها به خبرگان و تحلیل آن پس از تعدیلاتی از منطقی‌بودن رفتار متغیرها اطمینان حاصل شد. جدول ۱ نتایج آزمون رفتاری با توجه به شاخص حداقل مجذور میانگین مربع نسبت خطا برخی متغیر را نشان می‌دهد.

پس از شبیه‌سازی اولیه، تحلیل حساسیت مونت‌کارلو انجام شد. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل و مطالعات امکان‌یابی طرح‌های عملیاتی مدیریت منابع آب استان البرز و با مشارکت سیاست‌گذاران آب منطقه‌ای البرز، سه سناریو به‌منظور بهبود امنیت منابع آب زیرزمینی با توجه به پیوند امنیت منابع آب- غذا- انرژی در نظر گرفته شد و با توجه به تمرکز هر یک از سناریوها، سیاست‌هایی برای اعمال بر مدل طراحی شد که در ادامه تشریح می‌شود:

(۲۰۲۲) سیاست‌های مختلف دولت چین را بر سیستم آب- غذا- انرژی بررسی کردند.

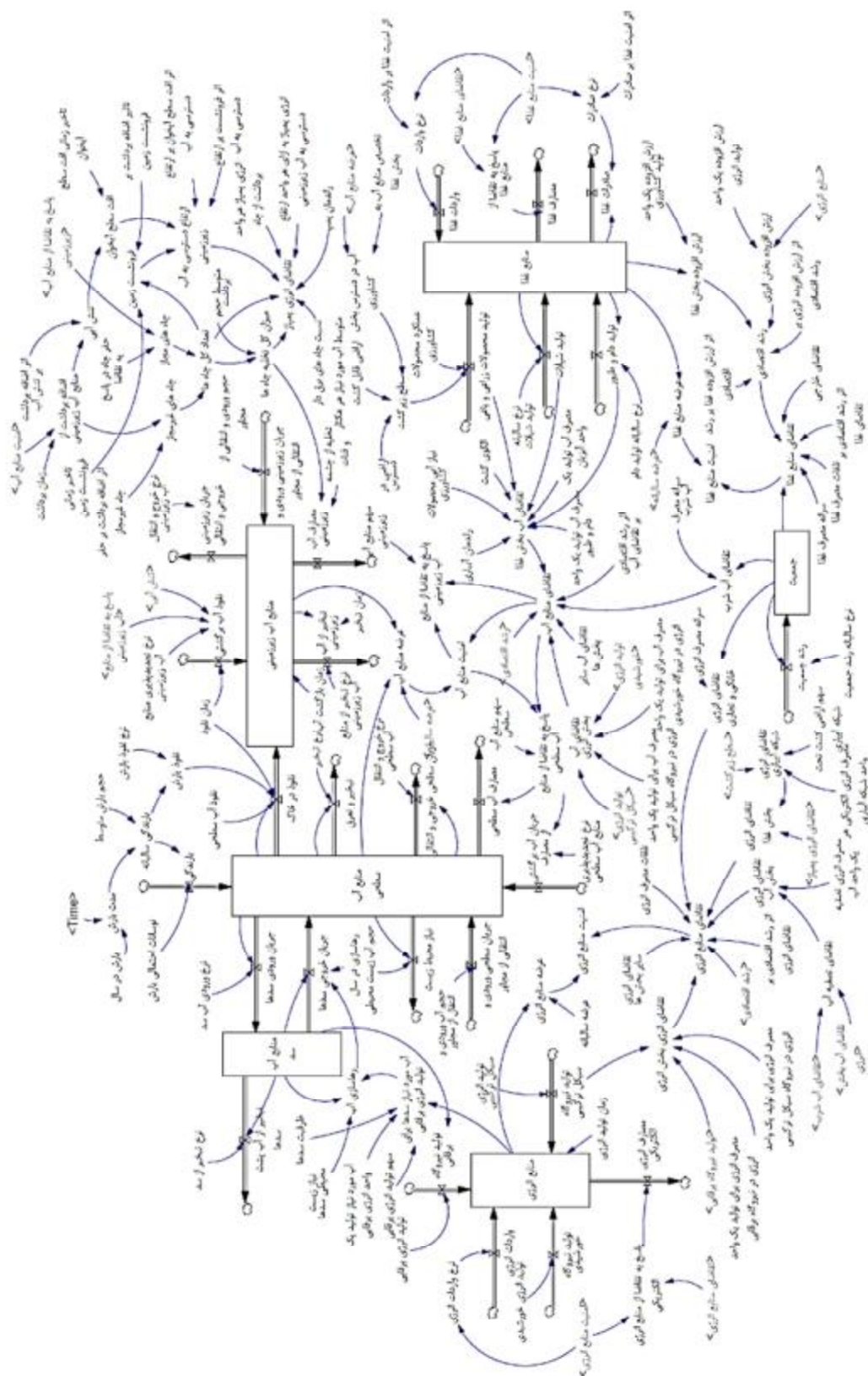
بررسی مطالعات نشان می‌دهد تعداد محدودی بر مدیریت پایدار آب زیرزمینی مبتنی بر همبست آب- غذا- انرژی متمرکز هستند و تاکنون مدل پویایی سیستم امنیت منابع آب زیرزمینی مبتنی بر همبست آب- غذا- انرژی موردتوجه قرار نگرفته است، طراحی این مدل به‌عنوان ابزار سیاست‌گذاری مدیریت یکپارچه منابع آب با تأکید بر بهبود امنیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در راستای حرکت به‌سوی مدیریت پایدار منابع آب است.

مواد و روش‌ها

مورد مطالعاتی استان البرز: حدود ۸۵ درصد آب موردنیاز استان البرز با اتکا به منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و رشد جمعیتی استان البرز سالیانه بیش از سه درصد و دوبرابر میانگین رشد جمعیت کشوری است (مطالعات آمایش استان البرز، ۱۳۹۵). این امر باعث شده در همه زمینه‌ها استان البرز دچار توسعه نامتوازن شود؛ منابع آب البرز توان پاسخگویی به این توسعه نامتوازن را ندارد و این باعث تنش آبی در کلان‌شهر کرج و شهرهای اطراف و حتی روستاها شده است. میزان وابستگی به آب زیرزمینی ۷۳/۷۶ درصد است؛ بنابراین وابستگی بالای منطقه به آب زیرزمینی سبب کاهش حجم و کسری مخازن زیرزمینی حوضه شده است؛ بنابراین حفظ امنیت این منابع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از نرم‌افزار Vensim DSS 6.4E پرداخته است. روش‌شناسی پویایی سیستم گام‌های زیر را دربرمی‌گیرد: گام اول: شناسایی و تعریف مسئله، گام دوم: شناسایی فرضیه‌های پویا، گام سوم: نمودار علی و نمودار جریان، گام چهارم: شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل، گام پنجم: تعریف سناریوهای

جدول ۱- آزمون اعتبار رفتاری (حداقل مجذور میانگین مربع نسبت خطا) برخی متغیرهای مدل

		۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸
جمعیت (Million people) RMSPE=0.011	At	۲/۴۱۱	۲/۴۶	۲/۵	۲/۶	۲/۶۶	۲/۷	۲/۷۷	۲/۸۷
	St	۲/۴۱۱	۲/۴۷	۲/۵	۲/۶۱	۲/۶۷	۲/۷۵	۲/۷۸	۲/۸۸
تولید محصولات کشاورزی (Million Ton), RMSPE=0.035	At	۱/۹	۲/۲	۱/۹	۲/۰۴	۲/۰۱	۱/۹۱	۱/۸۵	۱/۷۳
	St	۲/۰	۲/۱۷	۲/۰۱	۲/۰۲	۱/۹۷	۱/۸۶	۱/۷۸	۱/۶۷



شکل ۲- نمودار جریان مدل مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مبتنی بر همبست آب - غذا - انرژی

۱- سناریو امنیت منابع آب زیرزمینی مبتنی بر بهره‌برداری بهینه منابع تأمین آب

دسته راهکار این سناریو با بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی متمرکز بر پایداری منابع آب زیرزمینی است. برای این منظور سه راهکار در نظر گرفته شد:

۱-۱- سیاست تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها: با توجه به ضرورت اقدامات فوری برای کاهش روند افت شدید سطح آبخوان‌های البرز به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، انتظار می‌رود به منظور نگهداشت منابع آب سطحی با احداث سدهای تغذیه مصنوعی سالانه ۱۰ میلیون مترمکعب آب برای تغذیه به آبخوان تخصیص یابد و موجب کاهش روند افت سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های البرز شود.

۲-۱- سیاست مسدودکردن چاه‌های غیرمجاز و کنترل برداشت‌های غیرمجاز: یکی دیگر از نموده‌های توسعه نامتوازن تعداد بالای چاه‌های آب در البرز عنوان می‌شود. حدود ۱۱ هزار حلقه چاه در البرز حفر شده که از این تعداد ۲ هزار و ۵۰۰ چاه مجاز و ۸ هزار ۳۰۰ چاه غیرمجاز است (مطالعات برنامه آمایش استان البرز، ۱۳۹۵). این سیاست بر ساماندهی چاه‌های غیرمجاز و کنترل میزان برداشت از چاه‌ها تمرکز یافته است.

۳-۱- سیاست احداث و بهره‌برداری سامانه‌های ذخیره‌سازی و استحصال آب باران و فاضلاب و استفاده مجدد: میزان پساب تولیدی استان البرز در شرایط فعلی برابر با ۲۴۵ میلیون مترمکعب در سال است که با توجه به طرح‌های اجراشده، شبکه‌های جمع‌آوری و دفع فاضلاب تنها ۱۴/۵ میلیون مترمکعب در سال از آن در خروجی تصفیه‌خانه‌های احداث‌شده قابل‌تحويل است؛ بنابراین احداث و بهره‌برداری از سایر تأسیسات دفع فاضلاب و برنامه‌ریزی برای استفاده مجدد از آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای افزایش راندمان بهره‌برداری از فاضلاب برای مصارف کشاورزی در مناطقی که فاقد تصفیه‌خانه بوده و امکان احداث آن وجود ندارد، همانند روستاها و به‌ویژه رودخانه‌های کرج، طالقان و کردان ایجاد سامانه سیستم تصفیه فاضلاب و بازیافت آب از فاضلاب با روش‌های نوین بازچرخانی، آب موردنیاز مصارف غیرشرب قابل‌تأمین خواهد بود. بدیهی است با ایجاد این سیستم امکان آبیاری اراضی کشاورزی با آب تولیدشده فراهم می‌شود.

۲- سناریو امنیت منابع آب زیرزمینی- غذا مبتنی بر مدیریت تقاضای آب کشاورزی

با توجه به مصرف عمده منابع آب در بخش کشاورزی و اتکای آن به منابع آب زیرزمینی و عدم تغذیه طبیعی آبخوان و تنش آبی بالای البرز، دسته راهکارهای این سناریو بر مدیریت تقاضای منابع آب در بخش کشاورزی با حفظ امنیت منابع غذا در منطقه است. برای این منظور چهار راهکار شناسایی شد:

۱-۲- سیاست توسعه سیستم‌های آبیاری: نسبت سطح اراضی که به روش نوین آبیاری می‌شوند، در مقایسه با سطح تحت پوشش سیستم آبیاری سنتی بسیار ناچیز و تنها ۱۶/۷۶ درصد است. عمده سیستم‌های نوین آبیاری مورد استفاده در سطح منطقه، شامل آبیاری بارانی به شیوه کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک برای اراضی زراعی و آبیاری موضعی شامل قطره‌چکان و بابلر برای باغات است. راندمان کل آبیاری در استان البرز در وضعیت موجود برای گیاهان زراعی معادل ۴۶ درصد و برای باغات معادل ۵۰ درصد گزارش شده است که با توجه به روش‌های آبیاری امکان افزایش راندمان تا سقف ۷۰ درصد وجود دارد.

۲-۲- سیاست ترویج الگوی کشت مناسب با شرایط اقلیمی و توان اکولوژیک: این سیاست متمرکز بر کشت گیاهان با نیاز آبی کمتر و عملکرد بالاتر است. عمده محصولات کشاورزی در استان البرز، گندم آبی، جو آبی، ذرت علوفه‌ای، سبزیجات و صیفی‌جات، یونجه و گوجه‌فرنگی است. روند الگوی کشت در سال‌های اخیر به دلیل سوددهی بالا، جذابیت کشت محصولات علوفه‌ای و میوه‌های خشک را در میان زارعان افزایش داده است. ذرت علوفه‌ای با توجه به نیاز آبی بالا بی‌شک مصرف آب را افزایش خواهد داد. باغات میوه‌های خشک، مانند بادام و گردو نیز با توجه به رشد ۲۵ درصدی در سال‌های اخیر نیاز آبی را افزایش خواهند داد. سیاست ترویج الگوی کشت مناسب بر حمایت از احداث کارخانه‌های صنعتی کشاورزی با هدف ترغیب کشاورزان به محصولات با نیاز آبی کمتر نظیر دانه‌های روغنی کلزا و گیاهان دارویی امکان کاهش ۱۰ درصدی تقاضای منابع آب در بخش کشاورزی را فراهم خواهد آورد.

۲-۳- سیاست کاهش ضایعات کشاورزی در طول دوره تولید: با اعمال تکنیک‌هایی چون کشت گونه‌های مقاوم، برداشت به‌موقع محصول و نظارت در مرحله عملیات

برداشت مکانیزه متمرکز است.

۲-۴- سیاست توسعه عملکرد محصولات کشاورزی و توسعه کشت مکانیزه: اصلاح بذر و برنامه‌های حفظ نباتات و مبارزه با آفات، کوددهی با کودهای آلی و زیستی در سطح مزارع، تخصیص کمک‌های حمایتی برای خرید دستگاه‌های کشت مکانیزه و راه‌اندازی شرکت‌های خدمات مکانیزاسیون به دلیل پراکندگی اراضی، امکان توسعه حداقل ۲۰ درصدی عملکرد محصولات کشاورزی را به دنبال دارد.

۳- سناریوی امنیت منابع آب زیرزمینی-انرژی مبتنی بر مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی

این سناریو با توجه به تقاضای انرژی الکتریکی در البرز و بحران امنیت انرژی، در جست‌وجوی مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی در راستای امنیت منابع آب زیرزمینی است. بر این مبنا سه سیاست طراحی شده است:

۱-۳- سیاست بهینه‌سازی مصرف و کاهش اتلاف انرژی الکتریکی: راندمان نیروگاه سیکل ترکیبی منتظر قائم ۴۵ درصد تخمین زده شده است، خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور واحدهای گازی و تغییر در کمپرسور یا اتاق احتراق از فعالیت‌هایی است که حدود ۲۰ درصد از اتلاف انرژی جلوگیری خواهد کرد.

۲-۳- سیاست احداث نیروگاه بازیافت حرارت از فرایندهای صنعتی: پتانسیل احداث نیروگاه ۲۱ مگاوات بازیافت حرارت از کارخانه‌های تولید سیمان در البرز وجود دارد. میزان هزینه موردنیاز برای سرمایه‌گذاری در احداث این نیروگاه حرارتی برای هر کیلووات ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار برآورد شده است.

۳-۳- سیاست بهره‌برداری از پتانسیل انرژی تجدیدپذیر خورشیدی: این راهکار با توجه به پتانسیل ظرفیت تولید ۱۵۰ مگاوات در نیروگاه خورشیدی تعریف شده است.

نتایج و بحث

تغییرات سناریوها به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر مدل اعمال و درنهایت بهترین ترکیب سیاست‌ها شناسایی شد. در جدول ۲ سیاست ترکیبی منتخب امنیت منابع آب زیرزمینی ارائه شده است. شکل ۳ رفتار متغیرهای کلیدی مدل را پس از اعمال سیاست ترکیبی منتخب در مقایسه با سه سناریو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

می‌شود، با اعمال سیاست ترکیبی منابع آب زیرزمینی حدوداً از سال هشتم شبیه‌سازی شروع به احیا خواهد کرد. امنیت منابع آب، غذا و انرژی به‌صورت پایدار پاسخگوی تقاضا خواهند بود.

جدول ۲- سیاست ترکیبی امنیت منابع آب زیرزمینی

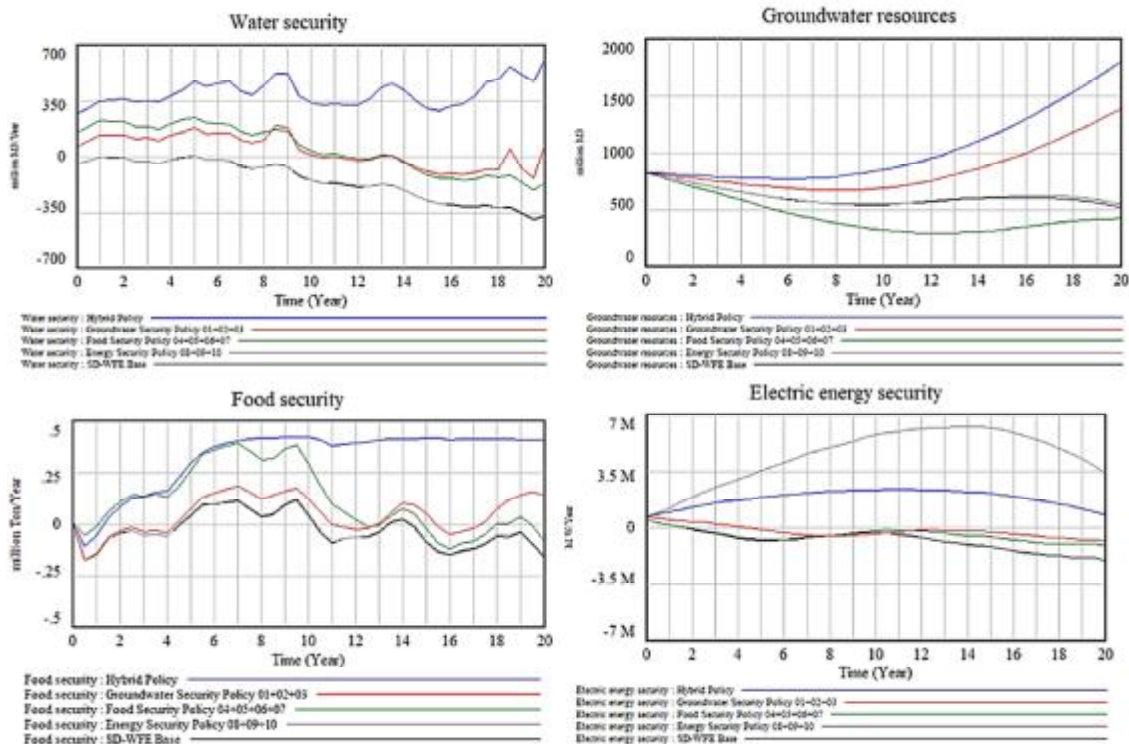
تغییرات اعمال شده در مدل	سیاست‌های ترکیبی
تغذیه مصنوعی سالانه ۱۰م مم	تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها
مسدودکردن سالانه ۱۰۰ چاه	مسدودکردن چاه‌های غیرمجاز
تأمین ۱۰ درصد از آب کشاورزی با بازچرخانی آب	بهره‌برداری پساب خاکستری و استفاده مجدد
افزایش ۱۵ درصدی راندمان آبیاری	توسعه سیستم‌های آبیاری
کاهش ۱۰ درصدی تلفات تولید	کاهش ضایعات کشاورزی
افزایش ۱۰ درصدی عملکرد	توسعه عملکرد کشاورزی
کاهش ۵ درصدی شدت مصرف انرژی	کاهش اتلاف انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها
تولید ۱ مگاوات انرژی خورشیدی	سیستم‌های پمپاژ خورشیدی بخش کشاورزی

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به مدل‌سازی دینامیکی مدیریت پایدار منابع آب بر مبنای همبست آب- غذا- انرژی پرداخته و راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب را با توجه به روند تغییرات جمعیت، رشد اقتصادی و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر را بر تنش آبی و امنیت منابع آب زیرزمینی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. برای این منظور پس از شناسایی پیچیدگی‌های پیوندهای منابع آب-غذا-انرژی، مدل پویایی سیستم طراحی و شبیه‌سازی اولیه انجام شد. نتایج اولیه نشان از عدم امنیت منابع آب، غذا و انرژی در طول دوره ۲۰ ساله شبیه‌سازی داشت. پس از تحلیل حساسیت مدل، نقاط اهرمی تغییر شناسایی شد و با مشارکت سیاست‌گذاران، سه سناریوی امنیت منابع آب زیرزمینی مبتنی بر بهره‌برداری بهینه منابع تأمین آب، امنیت منابع آب زیرزمینی-غذا مبتنی بر مدیریت تقاضای آب کشاورزی و امنیت منابع آب زیرزمینی-انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی طراحی و دسته سیاست‌هایی شناسایی شد. اعمال سیاست‌ها بر مدل نشان داد که هیچ‌یک از سناریوها به‌تنهایی منجر به مدیریت پایدار منابع آب-غذا و انرژی نخواهد شد. پس‌ازآن با اعمال سیاست‌های ترکیبی و تعیین میزان حداقل تغییرات موردنیاز در یک برنامه پنج‌ساله، سیاست‌های منتخب ارائه شده است.

- توسعه ۱۰ درصدی عملکرد محصولات کشاورزی با اصلاح بذر و برنامه‌های حفظ نباتات و مبارزه با آفات، کوددهی با کودهای آلی و زیستی در سطح مزارع، تخصیص کمک‌های حمایتی برای خرید دستگاه‌های کشت مکانیزه و راه‌اندازی خدمات مکانیزاسیون؛
- کاهش حداقل ۵ درصدی اتلاف انرژی الکتریکی در نیروگاه سیکل ترکیبی با توجه به راندمان پایین ۴۵ درصدی کنونی از طریق فعالیتهایی نظیر خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور واحدهای گازی و تغییر در کمپرسور یا اتاق احتراق؛
- توسعه سیستم‌های پمپاژ خورشیدی در کشاورزی و اعمال سیاست‌های حمایت مالی کشاورزان، یافته‌های مدل نشان داد سیاست ترکیبی به‌عنوان بهترین راهکار امنیت منابع آب زیرزمینی البرز در راستای مدیریت پایدار منابع آب خواهد بود. در مطالعات آتی می‌توان مدل را با افزودن متغیرهایی نظیر سامانه‌های تصفیه آب، آلودگی آب‌های زیرزمینی، آب مجازی، تغییرات اقلیم و بهره‌برداری از انرژی باد توسعه داد.

- احداث سدهای تغذیه مصنوعی و تخصیص سالانه ۱۰ میلیون مترمکعب آب برای تغذیه به آبخوان با توجه به افت شدید سطح آبخوان‌های البرز به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت تغذیه طبیعی آبخوان‌ها؛
- جلوگیری از برداشت‌های بی‌رویه با مسدودکردن چاه‌های غیرمجاز و ساماندهی و کنترل برداشت از چاه‌های مجاز؛
- احداث و بهره‌برداری از تأسیسات دفع فاضلاب و برنامه‌ریزی برای استفاده مجدد از آن‌ها و تأمین ۱۰ درصد آب بخش کشاورزی با استفاده از سیستم‌های نوین بازچرخانی آب؛
- توسعه سیستم‌های آبیاری به منظور حداقل ارتقای ۱۰ درصدی بهره‌وری آب در اراضی زراعی و باغات البرز؛
- کاهش ۱۰ درصدی ضایعات کشاورزی با توجه به برآورد تلفات ۱۲ درصدی مرحله تولید، ۲۵ درصدی برداشت و ۱۰ درصدی تلفات مصرف در ایران؛



شکل ۳- نمودار مقایسه سناریوها و سیاست ترکیبی در افق شبیه‌سازی ۲۰ ساله

of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. Ain Shams Engineering Journal.

13. Rao Y. S. and Prasad Y. S. 2020. Groundwater flow modeling-A tool for water resources management in the khondalite and sandstone formations. Groundwater for Sustainable Development. 11: 100454.
14. Samadi-Foroushani M. Keyhanpour M. J. Musavi-Jahromi S. H. and Ebrahimi H. 2022. Integrated Water Resources Management Based on Water Governance and Water-food-energy Nexus through System Dynamics and Social Network Analyzing Approaches. Water Resources Management. 1-21.
15. Senent-Aparicio J. Pérez-Sánchez J. García-Aróstegui J.L. Bielsa-Artero A. and Domingo-Pinillos J.C. 2015. Evaluating groundwater management sustainability under limited data availability in semiarid zones. Water. 7(8): 4305-4322.
16. Sterman J. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. 2000.
17. Wen C. Dong W. Zhang Q. He N. and Li T. 2022. A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: A case study in Daqing City, China. Science of The Total Environment. 806: 150497.

سیاسگزاری

از همکاری همه مشارکت‌کنندگان پژوهش در شرکت آب منطقه‌ای البرز سپاسگزاریم.

منابع

۱. پایگاه اطلاع‌رسانی وزارت نیرو، ۱۳۹۵. گزارش قائم‌مقام وزارت نیرو در نخستین همایش بین‌المللی بهداشت محیط و توسعه پایدار.
۲. صمدی فروشانی م.، کیهان‌پور م. و موسوی جهرمی ح. ۱۴۰۱. تحلیل ساختار حکمرانی آب ایران مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی: کاربردی از رویکرد تحلیل شبکه‌های اجتماعی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۳): ۵۶۳-۵۷۹.
۳. مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۶. سامانه ارائه آمار و گزارش‌های پایه منابع آب.
۴. مطالعات آمایش استان البرز بخش تحلیل حوزه‌ها و زیرحوزه‌های آبریز. ۱۳۹۵. سازمان برنامه و بودجه.
5. Akhtar M. K. 2011. A system dynamics based integrated assessment modelling of global-regional climate change: a model for analyzing the behaviour of the social-energy-economy-climate system.
6. California Department of Water Resources. 2015. Groundwater Sustainability Program, Draft Strategic Plan.
7. Das. 2020. Challenges of sustainable groundwater management for largescale irrigation under changing climate in Lower Ganga River basin in India. Groundwater for Sustainable Development. 11: 100449.
8. Gohari A. Mirchi A. and Madani K. 2017. System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in central Iran. Water Resources Management. 31(5): 1413-1434.
9. Hoff H. 2011. Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference: the water, energy and food security nexus. Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Bonn.
10. International Groundwater Resources Assessment Center (IGRAC). IGRAC 2014.
11. Jia X. O'Connor D. Hou D. Jin Y. Li G. Zheng C. and Luo J. 2019. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. Science of The Total Environment. 672: 551-562.
12. Keyhanpour M. J. Jahromi S. H. M. and Ebrahimi H. 2020. System dynamics model