طراحی و ارائه مدل پویای امنیت آب مبتنی بر تعاملات نظام اجتماعی – اکولوژیک

(حوزه آبخیز دشت نیشابور)

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از پویایی سیستم (SD) و مدل‌سازی عامل محور (ABM) که دو روش رایج برای بررسی سیستم‌های پیچیده هستند، مدل پویای امنیت آب برای حوزه آبخیز دشت نیشابور با استفاده از نرم افزار عامل محور NetLogo با هدف شناسایی و تحلیل تاثیر بخش‌های مختلف مصرف آب بر وضعیت امنیت آب در حوزه طراحی و ارائه گردید. نتایج نشان‌دهنده مؤثر بودن و قابل اعتماد بودن مدل امنیت آب ارائه شده در پژوهش حاضر می‌باشد. لذا می‌توان از آن برای پیش‌بینی وضعیت امنیت آب سال‌های آینده در حوزه آبخیز دشت نیشابور استفاده نمود و ضمن در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به منظور تغییر در پارامترهای قابل تغییر مدل و مشاهده تاثیر تغییر در هریک از آن‌ها بر وضعیت امنیت آب در حوزه، می‌توان بهترین سناریو و در راستای آن بهترین راهکار برای بهبود امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور را نیز تعیین نمود.

واژگان کلیدی: امنیت آب، پویایی سیستم، سیستم‌های پیچیده، مدل‌سازی عامل محور، نت لوگو

مقدمه

مفهوم امنیت آب در سال‌های اخیر هم در زمینه پژوهشی و هم در عمل محبوبیت روزافزونی یافته‌است. تنش‌هایی در بحث حمایت از مفهومی گسترده و جامع در مقابل یک قالب‌گیری عملیاتی محدود و تنگ‌نظرانه، چشم‌اندازهای کشورهای توسعه‌یافته در مقابل کشورهای درحال‌توسعه، قالب‌گیری علوم مهندسی/ طبیعی در مقابل علوم اجتماعی و راه‌حل‌های ترجیحی هم‌ارز که به چالش‌های امنیت آب می‌پردازند وجود دارد. لذا در این راستا، گری و سادوف امنیت آب را برخورداری از کمیت و کیفیت مورد نیاز برای ارائه سطح قابل قبولی از خدمات به منظور تامین سلامت، معیشت،

اکوسیستم و تولید و همچنین میزان ریسک منطقی ناشی از خطرات مربوط به آب برای مردم، محیط‌زیست و اقتصاد تعریف نموده‌اند (Ghorbani, 2018). بنابراین، ارزیابی‌های سنتی از کمبود آب، معمولاً با نیازهای سیاست‌گذاران و دست اندرکاران مرتبط با منابع آب سازگار نیست و به ابعاد انسانی مانند ظرفیت‌های اجتماعی و نهادی توجه کمی می شود. در کنار تغییرات آب و هوایی و رشد جمعیت، توزیع ناهمگن منابع آب، حکمرانی ضعیف و شکست طرح‌های سازمانی، نابرابری اقتصادی چشمگیر را مشخص می‌کند. ادغام فشارهای طبیعی و انسانی بر منابع آب (به عنوان مثال، افزایش جمعیت جهانی، تغییر آب و هوا و افزایش شهرنشینی)، یک نیاز اساسی برای درک جامع نظام‌های آب و انسان است (Gain et al., 2016). مطالعات توام نظام‌های انسانی - محیطی در حال ایجاد یک درک عمومی از تعامل و بازخورد بین فرآیندهای محیطی، فنی و اجتماعی است که می‌تواند عملکرد مدیریت آب را بهبود بخشد (Baldassarre et al., 2019). این مباحث مطالعه بازخورد دو طرفه بین نظام‌های انسانی و آب را در طیف گسترده‌ای از پدیده‌هایی که در نقاط مختلف جهان و در زمینه‌های مختلف پدیدار می شوند، دربرمی‌گیرد (Gober and Wheater, 2015).

تغییرات اقلیمی همراه با عوامل اجتماعی- اقتصادی نگرانی اصلی شورای بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) است. تجزیه و تحلیل سناریو اجتماعی – اقتصادی به عنوان یک ابزار مفید برای بررسی پیامدهای درازمدت تغییرات رفتار انسان با طبیعت و گزینه‌های پاسخ است (Kriegler et al., 2012). پیچیدگی و عدم قطعیت رفتار انسانی از یک سو و وجود عوامل مختلف موثر با شدت‌ها و شرایط متفاوت منطقه‌ای از سوی دیگر نیاز به تحلیل و مدل‌سازی توامان این عوامل را ضروری می‌سازد. در حقیقت به دلیل تاثیر دو جانبه انسان و محیط اطراف او بر یکدیگر، مستقل در نظر گرفتن هر یک از آن‌ها منجر به نتایجی دور از واقعیت خواهدشد (Yazdanparast et al., 2022 a).

از سوی دیگر راهبرد ساده‌سازی مسائل پیچیده برای قابل مدیریت ساختن آن‌ها و کاهش مشکلات چندعاملی به تک عاملی، موفقیت کوتاه مدت را به دنبال داشته اما در دراز مدت ناپایدار جلوه کرده‌است. آگاهی روزافزون از پیچیدگی مسائل محیط‌زیستی زمینه‌ساز شکل‌گیری رویکردهای مدیریتی جدید شده است؛ چنین رویکردهایی ارتباط میان انسان، فناوری و نظام‌های محیط زیست را مد نظر قرار داده‌اند که ارتباطی پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی بوده و از جمله خصیصه‌های آن واکنش‌های دور از انتظار به مداخله است؛ در واقع آنچه باید مدیریت شود "نظام‌های سازگار پیچیده (CAS) [1]" هستند. رویکردهای مدیریت سازگار در پی اهداف کوتاه مدت نیستند بلکه درصدد تاب‌آوری بلند مدت کل سیستم و واکنش منعطف به شگفتی‌ها و تغییرات دور از انتظار هستند (Ghorbani, 2018). درنتیجه

[1] Complex Adaptive Systems

راهکار نیل به این مقصود استفاده از مدل‌ها و ابزارهایی است که امروزه گسترش چشمگیری یافته‌اند. به عبارت دیگر از آنجا که مجموعه‌ای از عامل‌ها، ارتباطات بین آن‌ها و محیطی که در آن قرار دارند اجزای یک مدل را تشکیل می‌دهند (Ghorbani, 2018 ؛Pahl-Wostl, 2007; Gleick, 2003)، می‌توان از آن‌ها برای سازماندهی اطلاعات مرتبط با فرآیند تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی عوامل اثرگذار بر تصمیم و همچنین ارتباط آن‌ها استفاده کرد (Sadodin et al., 2017). در حقیقت این مدل‌ها ابزاری را ایجاد می‌کنند تا اهداف دیدگاه فرا رشته ای[1]دنبال شوند. کارشناسانی که به بررسی تعامل‌های انسان – محیط‌زیست می‌پردازند بر نیاز به تغییر اساسی در پارادایم‌ها و جایگزین کردن راهبردهای ماشینی‌نگری و شگردسالاری تاکید ورزیده اند، زیرا این نوع راهبردها با نادیده گرفتن پیچیدگی و معیار انسانی، در واکنش به چالش‌های اخیر ناکام مانده‌اند (Pahl-Wostl, 2007; Gleick, 2003؛ Ghorbani, 2018). لذا در این شرایط تجزیه و تحلیل سناریوی مبتنی بر مدل ریاضی می‌تواند یک ابزار مفید برای بررسی اثرات چندجانبه توسعه اقتصادی– اجتماعی و تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی و نقل و انتقالات آبی باشد (Majedul Islam et al., 2018).

با تمرکز بر ویژگی‌ها و قوانین تعامل بین اجزا برای کشف پیچیدگی در یک سیستم پیچیده، پویایی سیستم (SD)[2]و مدل‌سازی عامل محور (ABM)[3]دو روش رایج مورد استفاده هستند. پویایی سیستم (SD) یک روش بازخورد اطلاعاتی از بالا به پایین است که توسط پروفسور Forrester (1994) پیشنهاد شده است. ماهیت این روش ساختارهای بازخوردی با نظم بالا، چند حلقه ای و غیرخطی است. SD یک رویکرد به خوبی توسعه یافته برای تجسم، تجزیه و تحلیل و درک بازخوردهای پویا پیچیده است (Nasirzadeh, 2018). ابزارهای نمودارسازی، مانند نمودارهای انبار– جریان (SFDs)[4]، برای به تصویر کشیدن ساختار یک سیستم پیچیده استفاده می‌شوند (Ahmad et al., 2016). به منظور انجام یک تجزیه و تحلیل کمی، SFDs باید به کار گرفته شود. SFD ها می‌توانند ماهیت متغیرهای مختلف را تشخیص دهند و از معادلات انتگرال یا دیفرانسیل برای نمایش اطلاعات توصیف شده استفاده کنند.

فرآیند توسعه و شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم در شکل ۱ ارائه شده است. از این شکل، می‌توان مشاهده کرد که رویه اصلی یک مدل‌سازی پویایی سیستم، مرحله تجزیه و تحلیل سیستم، ایجاد

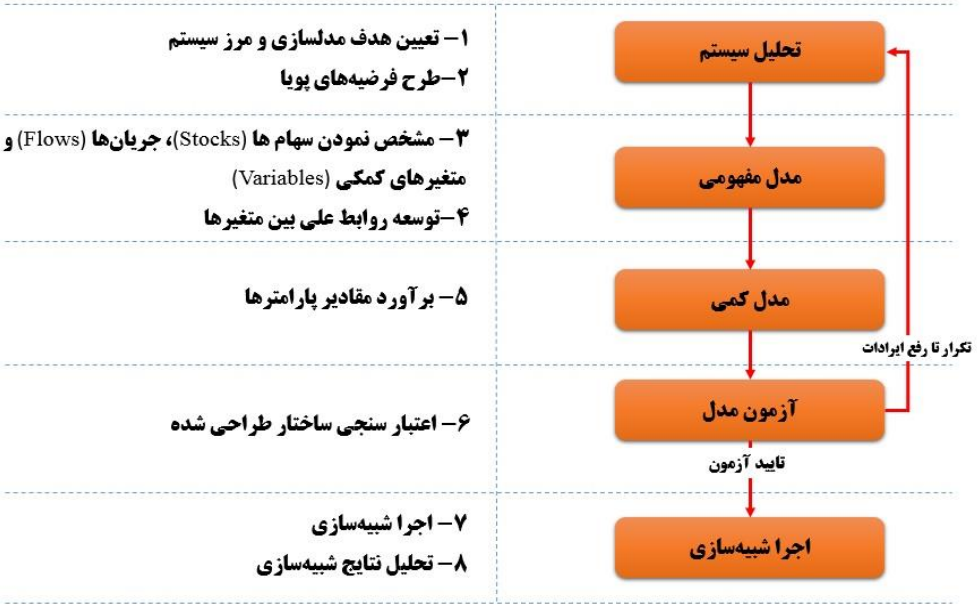
[1] Transdiciplinarity

[2] System Dynamic

[3] Agent Base Modeling

[4] Stock–Flow Diagrams

مرحله مدل مفهومی، استقرار مرحله مدل کمی، مرحله تایید مدل و شبیه‌سازی مدل است (Ding et al., 2018).



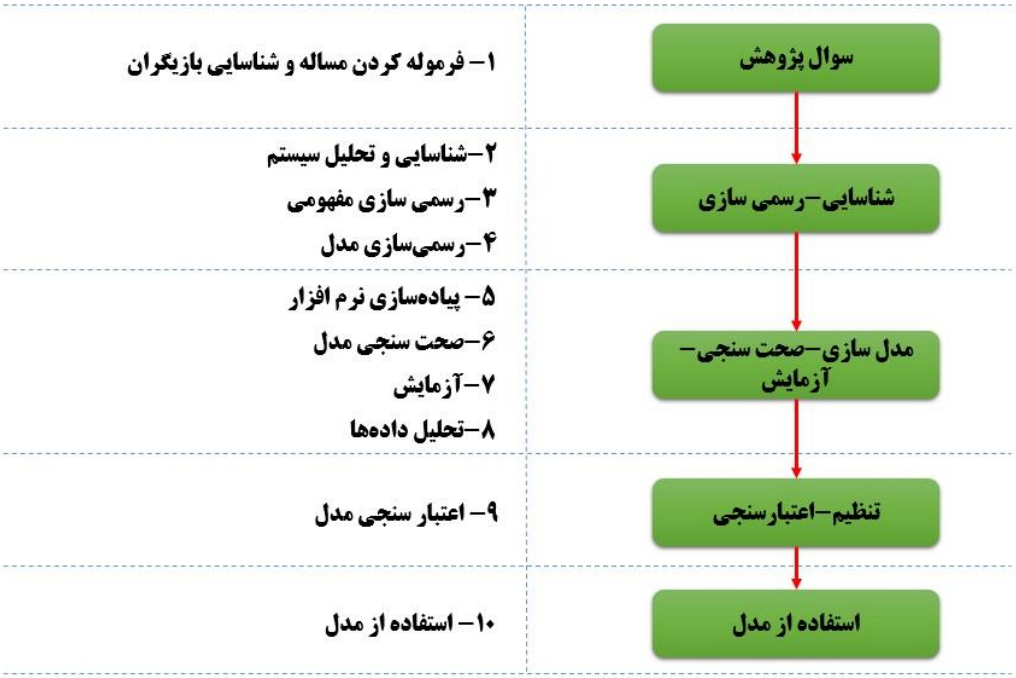
شکل ۱- مراحل مدل‌سازی پویایی سیستم (SD) (Ding et al., 2018).

مدل‌سازی عامل محور (ABM) یکی از راهکارهای موثر در شرح روابط و پیچیدگی‌های یک سیستم می‌باشد. مدل‌ها به تعریف، توضیح، درک و پیش‌بینی بهتر واقعیت کمک کرده و این کار را به شیوه‌ای ساختارمند انجام می‌دهند (Epstein, 2008). مدل‌های عامل بنیان از مجموعه‌ای از عوامل در یک بستر محیطی تشکیل شده اند. این عوامل دارای خصوصیاتی از جمله خودمختاری و تصمیم گیرندگی هستند. در این مدل‌ها محیط قابلیت تقویت یا محدودسازی عامل‌ها را داراست. هر عامل در عین حال که نقش منحصر به فردی دارد با دیگر عوامل و با محیط نیز در تعامل است که این تعاملات از یک سری قوانین پیروی می کنند. مدل‌های عامل بنیان بر این فلسفه استوارند که پدیده‌ها در سطح کلان از مجموعه تعاملات در سطح خرد ناشی شده است.

مدل‌سازی عامل‌محور یک رویکرد مدل‌سازی محاسباتی از پایین به بالا است. با استفاده از مدل‌سازی عامل محور، موجودیت‌های منفرد در یک CAS توسط عوامل گسسته‌ای نشان داده می‌شوند که به طور مستقل در یک فضای شبیه‌سازی شده برای تولید نتایج اضطراری و غیر شهودی در سطح جمعیت

تعامل دارند. فعل و انفعالات یا ارتباطات بین عوامل بر اساس مجموعه‌ای از "قوانین" از پیش تعریف شده انجام می‌شود. قوانین حاکم بر رفتار عوامل فردی بر نتایج/پیش‌بینی‌های مدل عامل محور تأثیرگذار است. بنابراین، لازم است که همه الگوریتم‌های مبتنی بر قانون در تمام مراحل توسعه مدل به‌طور محکم جفت شود (Nikoli´c, 2010).

این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است (Ding et al., 2018).



شکل۲–مراحل مدل‌سازی عامل‌محور (ABM)

بنابراین، ادغام SD با سایر ابزارهای مدل‌سازی موجود، مزایایی در برخورد با سیستم‌های آب پیچیده و نامشخص دارد. به عنوان مثال، Ahmad & Simonovic (2015) نشان دادند که جفت کردن SD با مدل‌های هیدرودینامیکی ابزارهای قدرتمندی برای درک ویژگی‌های دینامیکی خطرات سیل و تنوع مکانی آنها فراهم می‌کند، در نتیجه قابلیت‌های مدل‌سازی مدیریت ریسک سیل رودخانه را افزایش می‌دهد. Xi & Poh (2015) همچنین پیشنهاد کردند که یک روش ترکیبی SD و فرآیند سلسله

مراتبی تحلیلی به تصمیم گیرندگان کمک می‌کند تا اولویت‌های برنامه‌های توسعه مختلف برای سیستم منابع آب یکپارچه در سنگاپور را کمی کنند.

Xu et al. (2020) یک مدل یکپارچه را پیشنهاد کردند که یک مدل ریاضی دوهدفه را با روش SD ترکیب می‌کند تا تعادل بین ریسک افزایش آینده را متعادل کند. عدم تعادل عرضه و تقاضا و کفایت آب فعلی، در نتیجه یک دوره برنامه‌ریزی پایدار را شناسایی می‌کند. Li et al. (2018) همچنین استدلال کردند که یک رویکرد SD ترکیبی و بهینه‌سازی مرجع قوی برای تصمیم‌گیرندگان برای بهینه‌سازی تخصیص آب با وزن کردن هزینه سیستم آب، هدف توزیع آب و ریسک سیستم فراهم می‌کند. علاوه بر این، Bertone et al. (2019) نشان دادند که جفت کردن مدل‌سازی SD با شبکه‌های بیزی می‌تواند به مقابله با عدم قطعیت‌ها، داده‌های از دست رفته و رفتارهای غیرخطی برای مدیریت پایدار منابع آب در درازمدت تحت شرایط نامشخص کمک کند.

در سال‌های اخیر در حوزه‌های آبخیز بسیاری از کشورهای جهان، کاهش کمّی و افت کیفی منابع آب، افزایش تقاضا و توسعه صنعتی و کشاورزی و عدم اجماع مناسب میان تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان در تخصیص متعادل آب به مصارف مختلف، تامین آب را با چالش‌های بسیاری مواجه ساخته است (Sabaghian & Zarghami, 2018). ضرورت اصلاح رویکرد سازه‌ای حاکم بر مدیریت منابع آب و جایگزین کردن آن با مدیریت یکپارچه منابع آب به عنوان چاره نهایی وضعیت بحرانی مدیریت منابع آب در جهان در دو دهه اخیر بحث حکمرانی آب را به صورتی جدی مطرح ساخته است. به همین جهت و در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر در مدیریت یکپارچه منابع آب و جبران کاستی‌ها و کمبودهای مدیریت یک جانبه و از بالا به پایین رویکرد حکمرانی و امنیت آب مطرح شده است که در آن عناصر مختلف دارای روابط متقابل با یکدیگر هستند (Vahid & Ranjbar, 2018). در پژوهش Yazdanparast et.al, 2022a شاخص امنیت آب (WSI) با کمک چارچوب ارزیابی وضعیت امنیت آب در مقیاس حوزه آبخیز به منظور تجزیه و تحلیل جامع مسئله بحران آب و پیامدهای ناشی از این کم‌آبی در حوزه آبخیز دشت نیشابور تعیین گردید. نتایج نشان داد در بین ۵ معیار اصلی شناسایی شده جهت ارزیابی امنیت آب (در دسترس بودن آب، اقتصاد آب، خطرات آب، سلامت حوزه آبخیز و حکمرانی آب)، معیار اقتصاد آب در طول ۳ دوره آماری مورد مطالعه روند افزایشی داشته است. اما روند وضعیت امنیت آب به طور کلی در حوزه آبخیز دشت نیشابور طی ۱۰ سال روند کاهشی داشته و در وضعیت ضعیف قرار دارد.

بنابراین، رویارویی با مشکلات امنیت منابع آب نیازمند یک نگرش چندسطحی و همه‌جانبه است این نگرش همه‌جانبه سیاست‌های آب را یکی از اجزای مجموعه بزرگ‌تری می‌داند که در کنار اجزای

دیگری مانند فناوری استحصال، تاسیسات زیربنایی، صنایع مکمل، شبکه‌های توزیع و انتقال، بازار آب و حتی فرهنگ و نمادهای فرهنگی مصرف آب روی هم رژیم اجتماعی- فناوری آب را می‌سازد (Miremadi, 2017). از این‌رو هدف از پژوهش حاضر، طراحی و ارائه مدل پویای امنیت آب برای حوزه آبخیز دشت نیشابور در استان خراسان رضوی با استفاده از تلفیق پویایی سیستم (SD) و مدل‌سازی عامل محور (ABM) در محیط نرم افزار NetLogo به منظور شناسایی چگونگی تاثیر بخش‌های مختلف مصرف آب بر وضعیت امنیت آب در حوزه می‌باشد.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

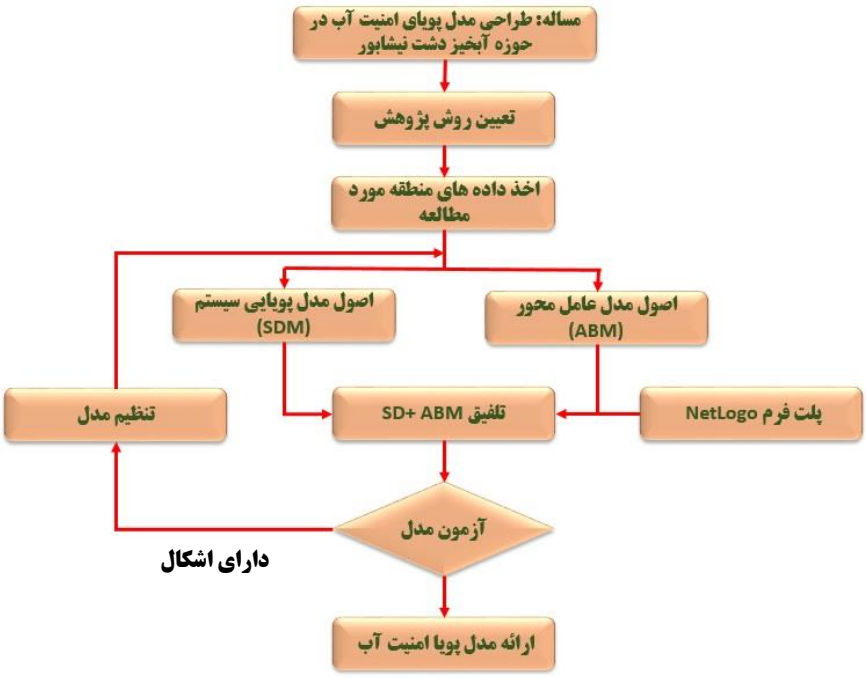
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوزه آبخیز دشت نیشابور است که به علت افت شدید آب‌های زیرزمینی در آن منطقه انتخاب گردیده است. دشت نیشابور در حدفاصل مدار ′۴۰ °۳۵ تا ′۵۰ °۳۶ و طول جغرافیایی ′۱۵ °۵۸ تا ′۱۵ °۵۹ قرارگرفته و از شهرستان‌های شمالی استان خراسان رضوی می‌باشد. وسعت کل این حوضه حدود ۷۳۰۰ کیلومتر مربع است که حدود ۴۳۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. از لحاظ اقلیمی دارای تابستان‌های خشک و گرم و زمستانی سرد و کوتاه است و میانگین بارش در این منطقه ۲۳۴ میلی‌متر در طی سال‌های گذشته بوده است. در نیشابور ۷۵۰رشته قنات وجود دارد که عمیق‌ترین آن قنات باغشن با عمق مادر چاه ۱۲۳۰متر می‌باشد. طولانی‌ترین قنات حصار سرخ در سمت سبزوار به طول ۱۱ کیلومتر و پرآب‌ترین قنات گلبو در بخش میان جلگه با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه می‌باشد (Moussavi, 2019).

ممنوعیت برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور و حساسیت‌های اجتماعی و اکولوژیکی موجود در این منطقه سبب شده تا بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی دشت نیشابور پایلوت اجرایی طرح کلان احیا و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی در استان انتخاب گردد. از طرف دیگر، در سال‌های اخیر توسعه کشاورزی همراه با افزایش جمعیت در این دشت سبب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فشار زیادی به این منابع شده است. به دلیل افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست زمین در قسمت‌هایی از دشت مشاهده می‌شود. نشست زمین وایجاد ترک‌ها باعث بروز مشکلاتی برای زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها و دیگر سازه‌های ساخته‌شده در نزدیکی این ترک‌ها شده است (Moussavi, 2019). ایجاد درز و شکاف‌های وسیع و عمیق در اراضی کشاورزی، تأسیسات شهری و روستایی، ساختمان‌ها و آسیب دیدن تأسیسات زیر بنائی نظیر راه‌ها، پل‌ها، خطوط راه آهن و

مسیرهای انتقال آب و حامل‌های انرژی و... از جمله مشکلات و چالش‌هایی است که منطقه با آن روبه روست (Yazdanparast et al., 2022 b).

طراحی و ارائه مدل پویای امنیت آب

همانطور که پیش‌تر بیان گردید، پویایی سیستم (SD) و مدل‌سازی عامل محور (ABM) دو روش رایج برای بررسی سیستم‌های پیچیده هستند. هر رویکرد مزایا و معایب خاص خود را دارد. به عنوان مثال، روش پویایی سیستم، به عنوان یک رویکرد از بالا به پایین، امکان ساخت و اعتبارسنجی راحت مدل را فراهم می‌کند. در مقابل، مدل‌سازی عامل محور، به عنوان یک رویکرد از پایین به بالا، امکان تعاملات پیچیده بین عوامل و فضای حالت ناهمگن را فراهم می‌کند. مدل‌سازی عامل محور را می‌توان با زبان‌های برنامه‌نویسی (مانند C، جاوا و پایتون) یا ابزارهای تخصصی مانند NetLogo، Swarm و Repast پیاده‌سازی کرد. به طور کلی، مدل‌سازی عامل محور یک فرآیند مدل‌سازی افزایشی را با شروع از یک مدل ساده به یک مدل پیچیده دنبال می‌کند. اما از آنجا که مدل‌های پویایی سیستم نمی‌تواند تغییرات محلی را در زمان واقعی منعکس کنند؛ و شبیه‌سازی چند عاملی (ABM) نیز نمی‌تواند اثر کلی را به موقع به واحدهای فردی بدهد، بنابراین این دو مدل نمی‌توانند شبیه‌سازی سیستم پیچیده را به تنهایی حل کنند (Kim & Juhn, 1997; Guan et al., 2011). لذا در پژوهش حاضر به منظور طراحی مدل پویای امنیت آب که نیازمند تلفیق شبیه‌سازی SD و ABM، می‌باشد؛ ابتدا مدل مفهومی امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور در مقاله جداگانه‌ای طراحی گردید (Yazdanparast et.al, 2023) و سپس بر مبنای آن، مدل پویای کمی امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور، با استفاده از نرم افزار NetLogo در این پژوهش طراحی و شبیه سازی گردید. شکل ۳، چارچوب دست‌یابی به مدل پویای امنیت آب را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مدل مفهومی دست‌یابی به مدل پویای امنیت آب

نرم افزار NetLogo، یک زبان برنامه‌نویسی چند عامله و محیط مدل‌سازی برای شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده است (Wilensky, 2001). این نرم افزار توسط دانشگاه نورث وسترن توسعه یافته و برای توسعه سیستم‌های پیچیده مناسب است.

روش تعیین پارامترها در نرم افزار NetLogo

ساختار اصلی مدل پویایی سیستم، بازخورد اطلاعاتی است، رفتار مدل عمدتاً توسط ساختار مدل تعیین می‌شود، بنابراین نسبت به تغییرات پارامتر حساسیت زیادی ندارد. در پژوهش حاضر، از روش‌های تخمین پارامتر زیر در فرآیند ساخت مدل استفاده شد:

(۱) روش تعیین مستقیم.
(۲) روش مقدار متوسط.
(۳) روش استنتاج منطقی.
(۴) روش رگرسیون خطی.

تعیین متغیرها در نرم افزار

متغیرهای مورد استفاده در مدل پویایی سیستم طراحی شده مطابق جدول۱ می‌باشند.

جدول ۱- متغیرهای مورد استفاده در مدل پویای امنیت آب حوزه آبخیز نیشابور

نام دسته	نام عامل		علامت اختصاری
	معادل فارسی	معادل انگلیسی	
انبار (Stock)	شاخص امنیت آب	Water Security Index	WSI
	آب زیرزمینی (منبع آب موجود)	Ground Water	GW
	تقاضا آب (مصرف آب)	Water Demand	WD
	تقاضا آب در بخش کشاورزی	Water Demand- Agriculture	WDA
	تقاضا آب در بخش صنعتی/تجاری	Water Demand- Industry	WDI
	تغییرات ذخیره آب زیرزمینی	Ground Water Storage Change	GWSC
	سرانه مصرف آب	Water Demand-Per Capita	WDP
	جمعیت	Population	POP
	امنیت آب	Water Security	WS
جریان (Flow)	ورودی آب زیرزمینی	Input- Ground Water	IGW
	خروجی آب زیرزمینی	Output- Ground Water	OGW
	ورودی به مخزن آب زیرزمینی	Input- Ground Water Storage	IGWS
	ورودی مصرف آب	Input- Water Demand	IWD
	ورودی مصرف آب کشاورزی	Input- Water Demand- Agriculture	IWDA
	ورودی مصرف آب صنعتی/تجاری	Input- Water Demand- Industry	IWDI

غیرقابل استناد

POPI	Population- Increase	افزایش جمعیت	متغیر (Variable)
POPD	Population- Decrease	کاهش جمعیت	
IWDP	Input- Water Demand- Per Capita	ورودی سرانه مصرف آب	
R	Rainfall	ارتفاع بارش	
RV	Rainfall Volume	حجم بارش	
ET	Evaporation and Evapotranspiration	تبخیر و تعرق	
I	Infiltration	نفوذ	
RU	Runoff	رواناب	
RF	Return Flow	آب برگشتی از مصارف	
O	Out Flow	خروج آب زیرزمینی به حوزه های مجاور	
CA	Catchment Area	مساحت حوزه	
WDE	Water Demand- Envoironment	تقاضا آب محیط زیست	
WDS	Water Demand-Services	تقاضا آب در بخش خدمات	
WURA	Water-Usage- Reduction- Agriculture	کاهش مصرف آب کشاورزی	
WERA	Water- Economic-Rate- Agriculture	نرخ بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی	
WERI	Water- Economic-Rate- Industry	نرخ بهره‌وری اقتصادی آب صنعتی/تجاری	
WDH	Water Demand-Health	تقاضا آب در بخش شرب و بهداشت	
CDA	Catchment- Danger- Area	مساحت اراضی مستعد خطر سیل	

غیر قابل استناد

PFH	Population in Flood Hazard	جمعیت ساکن در مناطق مستعد خطر سیل
MOR	Migration-Out-Rate	نرخ مهاجرت از حوزه
MIR	Migration-In-Rate	نرخ مهاجرت به حوزه
GR	Growth Rate	نرخ رشد جمعیت

مسیر شبیه سازی در نرم افزار

مدل پویای امنیت آب در حوزه آبخیز نیشابور، بر اساس پلت فرم شبیه‌سازی NetLogo ساخته شده و با مدل سیستم پویا و چند عاملی همراه است. مسیر اجرای شبیه‌سازی مدل در شکل ۴ نشان داده شده است. مراحل ساخت مدل چند عاملی در رابط اصلی NetLogo به سه بخش زیر تقسیم می‌شود (Han et al., 2017):

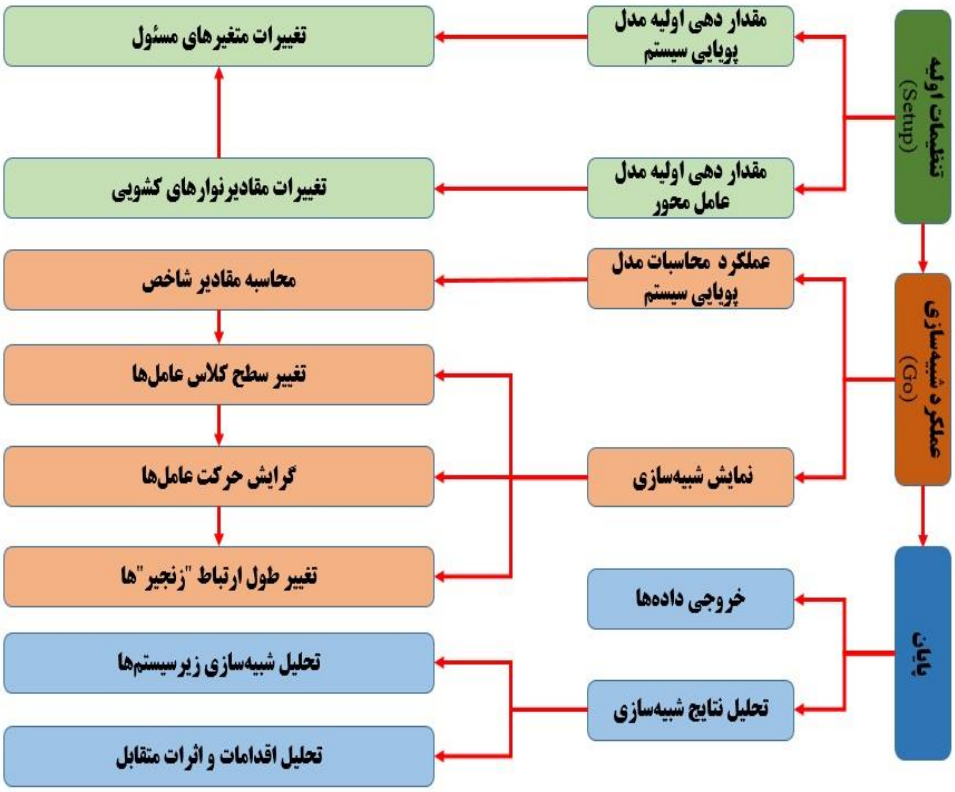
(۱) ساخت مدل در شبیه ساز پویایی سیستم در NetLogo.

(۲) ساخت کنترل تجربی

- (الف) کنترل پارامتر: نوارهای کشویی
- (ب) نظارت بر عملکرد شبیه سازی: نظارت بر داده ها
- (ج) خروجی گرافیکی: طراحی

(۳) تنظیمات تعاملی برای عوامل و شبیه‌سازی

عبدوفایل استناد



شکل ۴- مسیر اجرای شبیه‌سازی مدل در نرم افزار NetLogo

مطابق مراحل نشان داده شده در شکل ۴، عمده‌ترین مرحله در ایجاد مدل در شبیه‌ساز پویایی سیستم نرم افزار NetLogo، مراحل مرتبط با محاسبات شاخص‌ها و مقدار دهی پارامترهای مدل می‌باشد. در این راستا، به منظور محاسبه شاخص امنیت آب از رابطه ۱ (Davies & Simonovich, 2011; Fernandez & Selma, 2004; Bassi et al., 2010; Ravar et al., 2020) به صورت زیر استفاده شد.

$$WSI = WS / WD$$ رابطه ۱

به طوری که WSI میزان شاخص امنیت آب به صورت سالانه، WD مقادیر تقاضای آب به صورت سالانه و WS مقادیر منابع آب موجود سالانه می‌باشد. با توجه به اینکه در حوزه مورد مطالعه، منابع

آب سطحی بسیار ناچیز است، لذا در این پژوهش منبع آب موجود، فقط منابع زیرزمینی در نظر گرفته شده است، بنابراین WS مطابق رابطه ۲ و به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$WS = GW = RF + I - O$$ رابطه ۲

به طوری که RF آب برگشتی از مصارف به میلیون متر مکعب در سال، I مقادیر نفوذ به آب زیرزمینی به میلیون متر مکعب در سال و O مقادیر آب خروجی به زیرحوزه‌های مجاور می‌باشد.

مقدار RF مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (آب منطقه‌ای خراسان رضوی).

$$RF = (0.15\ (WDa + WDi)) + (0.7\ (WDh + WDs))$$ رابطه ۳

به طوری که WDA مقادیر تقاضا آب در بخش کشاورزی به میلیون متر مکعب در سال، WDI مقادیر تقاضا آب در بخش صنعت به میلیون متر مکعب در سال، WDS مقادیر تقاضا آب در بخش خدمات به میلیون متر مکعب در سال و WDH مقادیر تقاضا آب در بخش شرب و بهداشت است.

مقدار I از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Zare et al, 2019).

$$I = R * CA * IC$$ رابطه ۴

به طوری که R ارتفاع بارش به میلیون متر مکعب در سال، CA مساحت حوزه آبخیز و IC ضریب نفوذ می باشد.

مقدار WD نیز از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.

$$WD = WDA + WDI + WDS + WDH + WDE$$ رابطه ۵

غیرقابل استناد

به طوری که *WDA* مقادیر تقاضا آب در بخش کشاورزی به میلیون متر مکعب در سال، *WDI* مقادیر تقاضا آب در بخش صنعت به میلیون متر مکعب در سال، *WDS* مقادیر تقاضا آب در بخش خدمات به میلیون متر مکعب در سال، *WDH* مقادیر تقاضا آب در بخش شرب و بهداشت و *WDE* مقادیر تقاضا آب محیط زیست به میلیون متر مکعب در سال می‌باشد.

به منظور محاسبه شاخص جمعیتی، از روابط ۶ تا ۸ به شرح زیر استفاده گردید (Zare et al, 2019).

$$POP = POPI - POPD$$ رابطه ۶

به طوری که *POP* جمعیت حوزه، *POPI* عامل افزایش جمعیت که مطابق با رابطه ۷ محاسبه می‌شود. *POPD* نیز عامل کاهش جمعیت است که از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد.

$$POPI = ((INR/100) * POP) + MIR * POP$$ رابطه ۷

به طوری که *INR* نرخ رشد جمعیت و *MIR* نرخ مهاجرت به داخل حوزه می‌باشد.

$$POPI = (MOR * POP) + (PFH * 0.001)$$ رابطه ۸

به طوری که *MOR* نرخ مهاجرت از حوزه و *PFH* تعداد افراد ساکن در مناطق مستعد خطر سیلاب می‌باشد.

غیر قابل استناد

نتایج و بحث

مفروضات درنظرگرفته شده برای ساخت و اجرای مدل

فرض ۱: مقدار آب مورد تقاضا برابر با مقدار مصرف آب در حوزه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (Ravar et al., 2020).

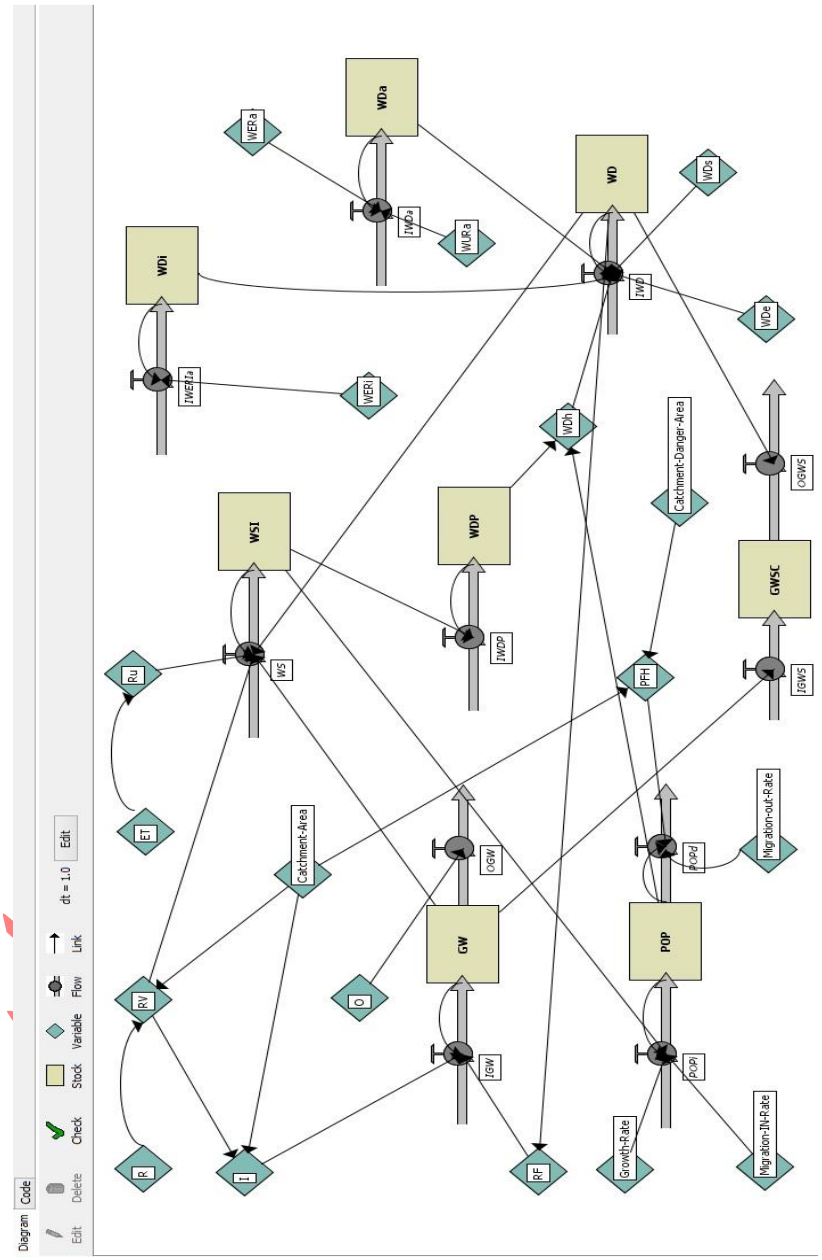
فرض ۲: با توجه به اینکه روند تغییرات و تامین منابع آب موجود در حوزه وابسته به شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی است (تحت کنترل عوامل محیطی) و تحت کنترل عوامل انسانی نیست، لذا روند تغییرات آن در طول دوره شبیه‌سازی ثابت درنظرگرفته شده است.

فرض ۳: مقدار آب برگشتی از مصارف مختلف در طول دوره شبیه‌سازی با فرض ۱۵ درصد آب برگشتی از مصارف کشاورزی و صنعت و ۷۰ درصد از مصارف شرب و خدمات محاسبه شده است (آب منطقه‌ای خراسان رضوی).

شکل ۵، مدل پویای طراحی شده در محیط نرم افزار NetLogo و شکل ۶ رابط گرافیکی کاربر (GUI) ایجاد شده در مدل‌ساز پویایی سیستم نرم افزار NetLogo به منظور اجرای مدل و نمایش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پویای امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور را نشان می‌دهد.

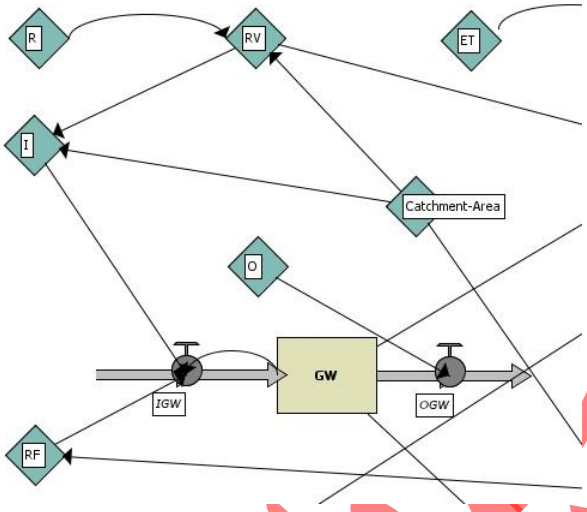
شکل‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب جزییات هر قسمت در مدل پویای ترسیم شده در نرم افزار NetLogo را به تفکیک نشان می‌دهد.

غیرقابل استناد



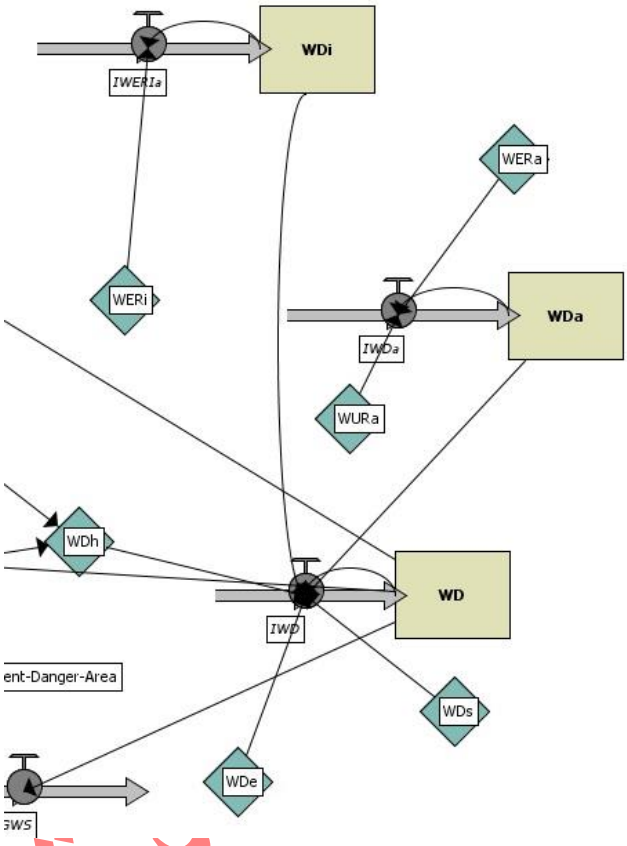
شکل ۵- مدل پویای امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور- طراحی شده در مدل‌ساز پویایی سیستم نرم افزار NetLogo

شکل ۶- رابط گرافیکی کاربر (GUI) ایجاد شده در مدل‌ساز پویایی سیستم نرم افزار NetLogo به منظور اجرای مدل و نمایش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پویای امنیت آب در حوزه آبخیز دشت نیشابور

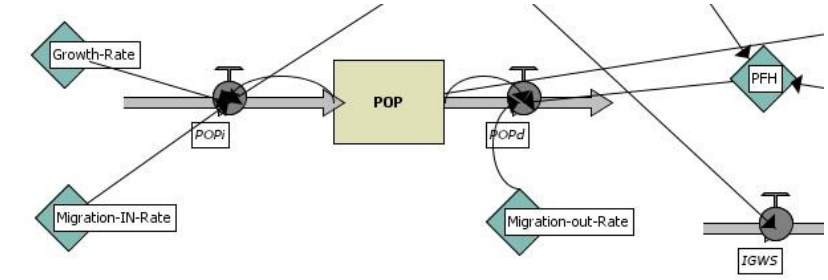


شکل ۷- زیر سیستم بیلان منابع آب موجود (آب قابل برنامه‌ریزی)

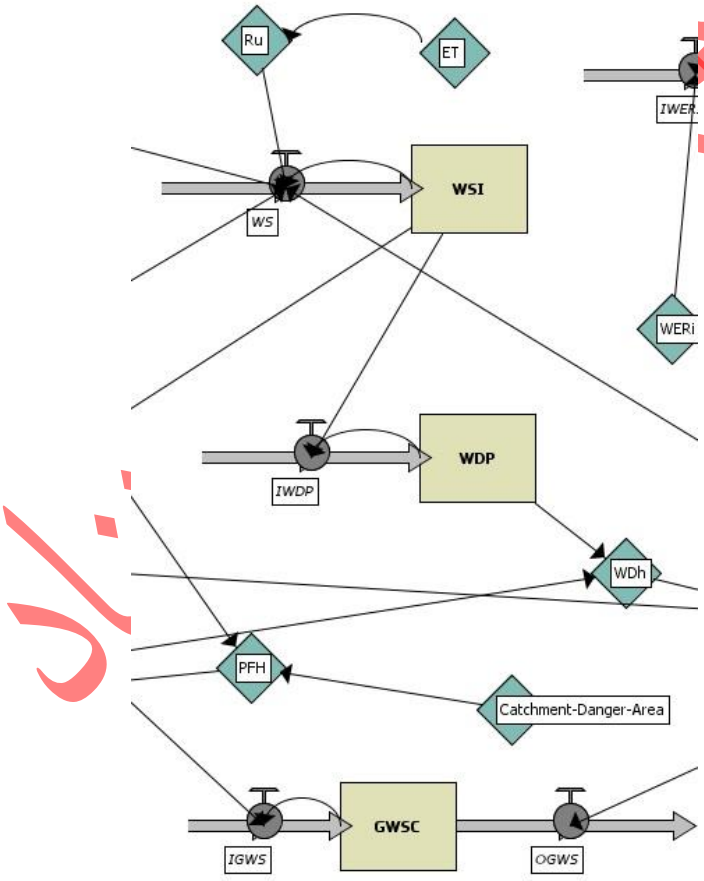
غیرقابل استناد



شکل ۸- زیر سیستم آب مورد تقاضا (مصرف آب)



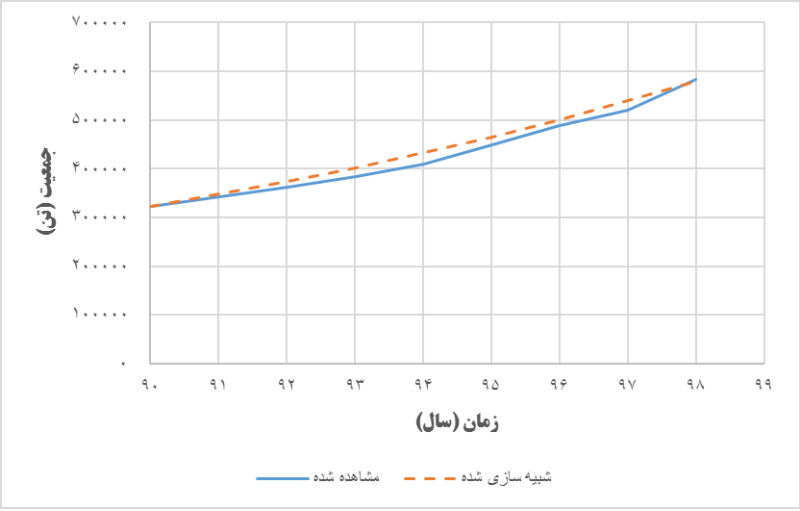
شکل ۹- زیر سیستم جمعیت



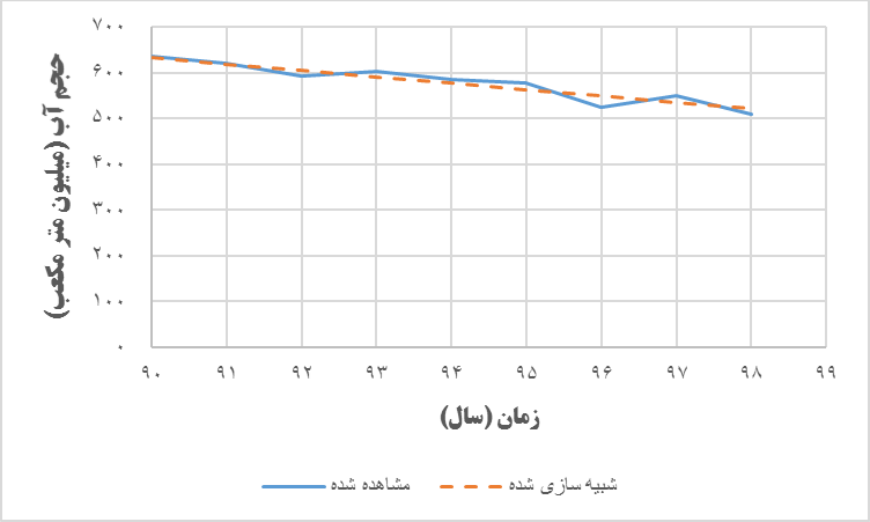
شکل ۱۰- زیر سیستم شاخص امنیت آب و تغییرات مخزن

اعتبار سنجی مدل

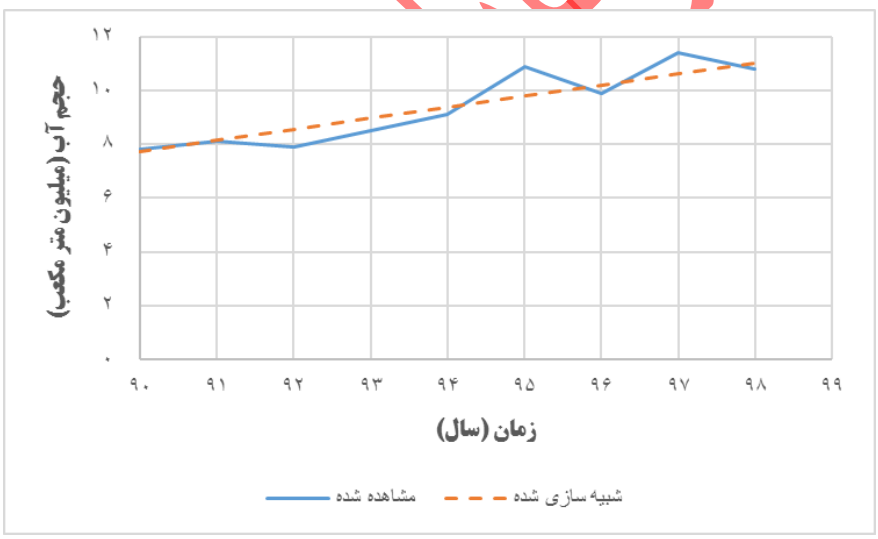
به منظور اعتبار سنجی مدل طراحی شده، درجه برازش بین داده‌های شبیه‌سازی سیستم و داده‌های واقعی تاریخی با بررسی تاریخی مدل آزمایش گردید. مشکلات موجود در مدل را می‌توان از طریق شبیه‌سازی سیستم خروجی و تحلیل خطای داده‌های تاریخی واقعی، آزمون همبستگی و غیره پیدا کرد. اگر مقدار انحراف بزرگتری وجود داشته باشد، باید به موقع تا آنجا که ممکن است، تصحیح شود. درنتیجه، انحراف داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های تاریخی کاهش می‌یابد و دقت، اعتبار و قابلیت اطمینان مدل بهبود می‌یابد. با توجه به استاندارد مدل‌سازی پویایی سیستم، خطای نسبی مقدار شبیه‌سازی و مقدار واقعی در ۱۰±٪ می‌تواند نشان‌دهنده مؤثر بودن و قابل اعتماد بودن مدل باشد (Han, 2010). در این راستا، پس از طراحی مدل بر مبنای روند ۲۰ ساله تغییرات پارامترهای تعریف شده در مدل، داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده سال‌های ۱۳۹۰–۱۳۹۸ برای عامل جمعیت، میزان برداشت در بخش‌های کشاورزی، صنعت، شرب و خدمات، حجم کل تقاضا آب و مقادیر بارش، به ترتیب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۷ ترسیم شده و اعتبارسنجی گردید. بنابراین همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است، انحراف داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های واقعی کمتر از ۱۰٪ است که نشان‌دهنده مؤثر بودن و قابل اعتماد بودن مدل امنیت آب ارائه شده در پژوهش حاضر می‌باشد.



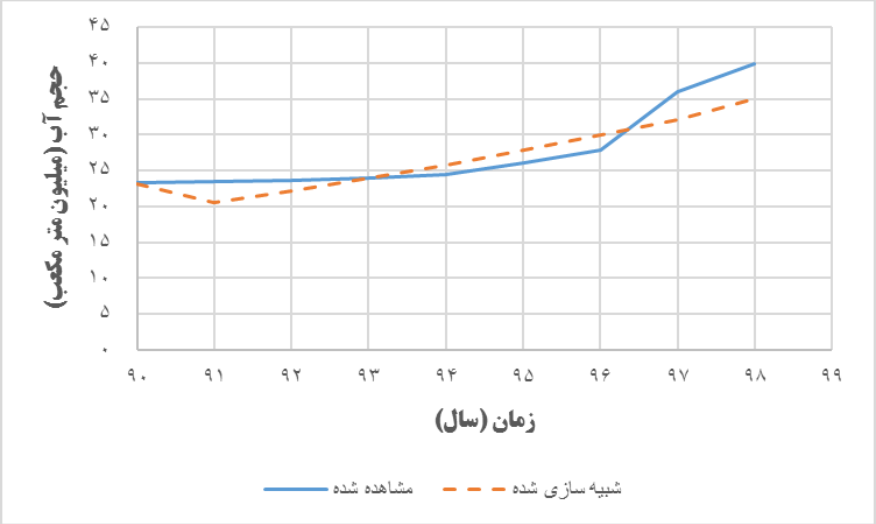
شکل ۱۱- اعتبار سنجی مقادیر جمعیت



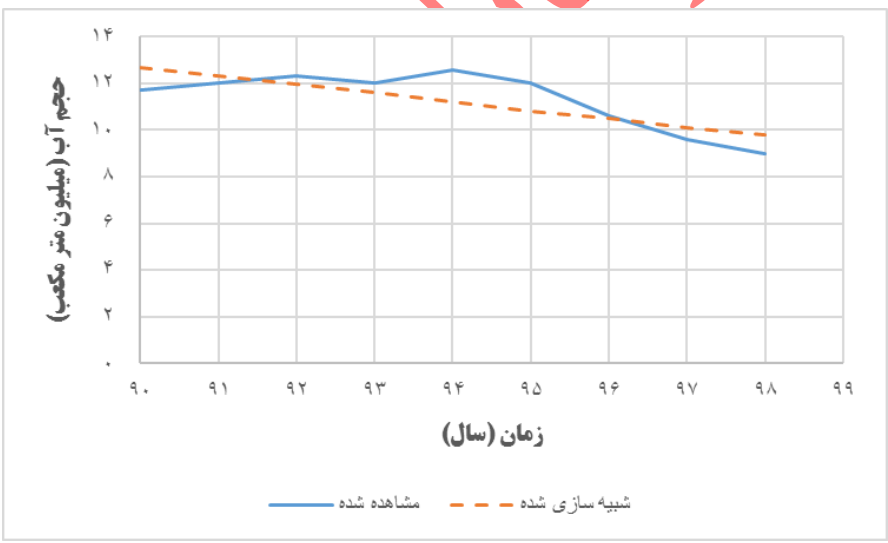
شکل ۱۲- اعتبار سنجی مقادیر برداشت آب در بخش کشاورزی



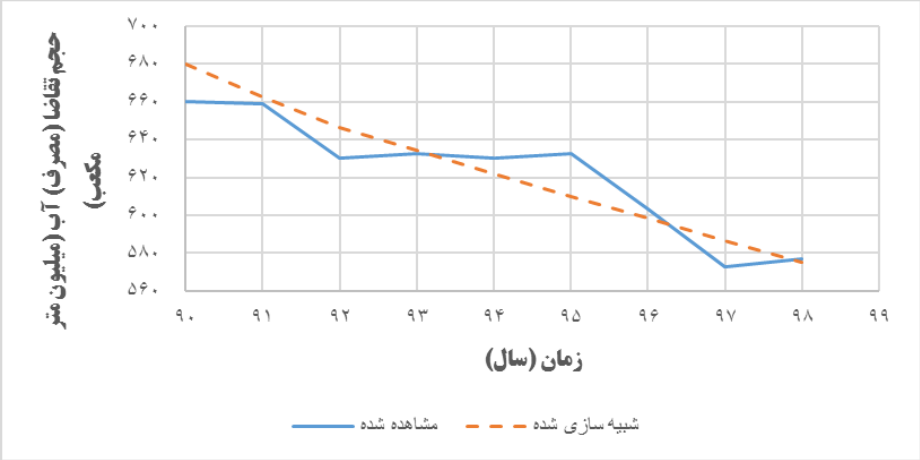
شکل ۱۳- اعتبار سنجی مقادیر برداشت آب در بخش صنعت



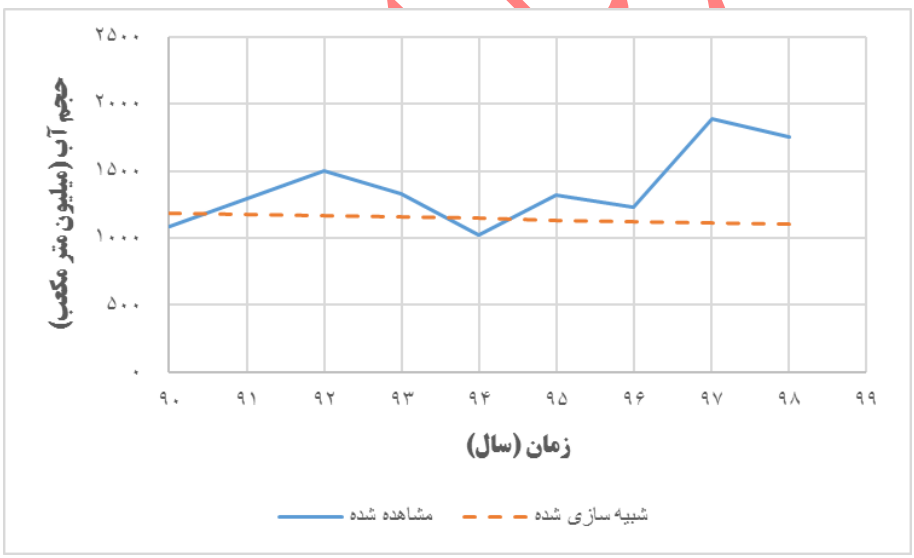
شکل ۱۴- اعتبار سنجی مقادیر برداشت آب در بخش شرب و بهداشت



شکل ۱۵- اعتبار سنجی مقادیر برداشت آب در بخش خدمات



شکل ۱۶- اعتبار سنجی مقادیر حجم آب مورد تقاضا



شکل ۱۷- اعتبار سنجی مقادیر بارش

با این حال، مدل‌های SD محدودیت‌های ذاتی در برخورد با عدم قطعیت‌ها و پویایی‌های مکانی در سیستم‌های منابع آب دارند، به‌ویژه تحت محرک‌های تأثیرات تغییرات اقلیمی، زیرا SD برای ترکیب دیدگاه‌های کیفی که این عدم قطعیت‌ها اغلب از آن ناشی می‌شوند، مناسب نیست (Kelly et al.,

(2013. برای مقابله با عدم قطعیت در تأثیرات تغییر اقلیم، چندین مدل‌ساز سناریوهای قابل قبولی را در طیف متفاوتی از مقادیر و همچنین انجام تجزیه و تحلیل حساسیت برای تولید طیف گسترده‌تری از نتایج مدل‌سازی معقول و آشکارسازی پارامترها یا اجزای مدل با بیشترین تأثیر بر روی نتایج ارائه دادند. برای مثال Gohari et al. (2017) سه سناریوی مختلف تغییر اقلیم را بر اساس صدک‌های احتمال ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ایجاد کردند، که اثربخشی و انعطاف‌پذیری سیاست‌های مختلف را مقایسه کرد و نشان داد که این سه محدوده سناریو به مقابله با عدم قطعیت در ارزیابی تغییر اقلیم کمک می‌کند. علاوه بر این، Kotir et al. (2016) تجزیه و تحلیل حساسیت را با خنثی کردن جداگانه ۱۰ درصد از متغیرهای کلیدی برای ارزیابی چگونگی تأثیر تغییرات در پارامترهای نامشخص بر رفتار مدل و به حداقل رساندن سیستماتیک تأثیر بالقوه عدم قطعیت ها در خروجی مدل انجام داد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در حال حاضر، مدیریت در مقیاس حوزه آبخیز، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از عملکرد چرخه‌های هیدرولوژیکی، عوامل اجتماعی–اقتصادی، و دیدگاه‌ها، نیازها، ارزش‌ها و نگرانی‌های مرتبط با استفاده از آب برای اهداف مختلف، به طور فزاینده‌ای چالش برانگیز شده است. به طور خاص، تعاملات پیچیده و بازخوردهای پویا بین نظام‌های اجتماعی–اقتصادی و محیطی درک پیامدهای بالقوه تصمیمات را دشوار می‌کند. اگرچه مدل‌های SD ابزار مدل‌سازی مؤثری برای طیف وسیعی از زیرسیستم‌ها ایجاد کرده‌اند، اما گسترش مرزهای سیستم برای زیرسیستم‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی پیچیدگی بیشتری نسبت به زمانی که هر سیستم به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود، ایجاد می‌کند. این پیچیدگی معمولاً توسط مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت و تعاملات متعدد بین عوامل زیر سیستم‌های مختلف هدایت می‌شود.

در دهه های اخیر با روند رو به افزایش جمعیت، آب به عنوان مهمترین چالش سیاسی برای کشورهای خشک جهان مطرح شده است. زیرا دسترسی به این ماده حیاتی، با کیفیت مناسب و در مکان و زمان مطلوب یکی از پایه های اصلی توسعه و پیشرفت هر کشوری است. با این حال، واقعیت این است که با وجود تفاوت در ماهیت و شدت مشکلات بخش آب از کشوری به کشور دیگر، جنبه مشترک بحران آب در بسیاری از کشورها ناشی از استفاده ناکارآمد و مدیریت ضعیف آب است. این واقعیت این امید را ایجاد می‌کند که با بهبود مدیریت آب می‌توان بر مشکلات موجود فائق آمد. اما این امر به راحتی امکان پذیر نیست و نیازمند تغییرات اساسی در شیوه کنونی توسعه، تخصیص و مدیریت منابع آب

غیر قابل استناد

است. در پژوهش حاضر، اصول اساسی، کاربردها و بحث روش‌شناختی رویکرد نظام‌های انسان–محیط‌زیست با تدوین مدل پویای امنیت آب و در نظر گرفتن پویایی‌های پیچیده (تعامل و بازخورد) بین سیستم‌های انسانی و محیطی در حوزه آبخیز نیشابور ایران ارائه شد. از این رو توسعه پایدار جستجوی مستمر با هدف مدیریت محدودیت‌های سیستم است و در این راستا ارزیابی مناسب از ظرفیت سازگاری محیط مادی و اجتماعی ضروری است و اقدامات پایدار مناسب باید کشف شود. مهارت‌های پایداری که به طور کامل با اصول نظام‌های اجتماعی – اکولوژیک مرتبط هستند و کلید سواد زیست محیطی در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: درک ظرفیت محیطی، اثرات بازگشت، اوج‌ها، تعادل، مدیریت تاب‌آوری، تعریف مشکل و نمایش سیستم. بر این اساس، اگر روابط پایدار انسان و محیط زیست هدف باشد، این قابلیت‌ها برای تمامی سطوح نظام‌های انسانی از سطح فردی تا نهادی و دولت‌ها و نظام‌های فراملی مطلوب و راهگشا خواهد بود.

بنابراین بر اساس نتایج می توان گفت به منظور اثربخشی بیشتر و دستیابی به نتایج مطلوب و در نهایت حفاظت و سالم‌سازی منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز دشت نیشابور که تنها منبع در دسترس ساکنان حوضه است و معیشت، سلامت و رفاه را برای آن‌ها فراهم می‌کند، استفاده ازمدل پویای ارائه شده در این پژوهش برای ساختاربندی مسائل پیچیده در این حوزه ضروری است. لذا به منظور تجزیه و تحلیل کامل و جامع تا حد امکان تعاملات و بازخوردها در سیستم مورد مطالعه، شناخت سطوح سلسله مراتبی، آگاهی محیطی و در نهایت یادگیری و تمرین بر اساس اجزای کلیدی و تعاملات شناسایی شده توسط این مدل پیشنهاد می‌شود.

در این راستا، در پژوهش حاضر با استفاده از پویایی سیستم (SD) و مدل‌سازی عامل محور (ABM) که دو روش رایج برای بررسی سیستم‌های پیچیده هستند، مدل پویای امنیت آب برای حوزه آبخیز دشت نیشابور طراحی و ارائه گردید. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده سال‌های ۱۳۹۰–۱۳۹۸ برای عامل جمعیت، میزان برداشت در بخش‌های کشاورزی، صنعت، شرب و خدمات، حجم کل تقاضا آب و مقادیر بارش نشان می‌دهد انحراف داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های واقعی کمتر از ۱۰٪ است و این موضوع نشان‌دهنده مؤثر بودن و قابل اعتماد بودن مدل امنیت آب ارائه شده در پژوهش حاضر می‌باشد. لذا می‌توان از آن برای پیش‌بینی وضعیت امنیت آب آینده در حوزه آبخیز دشت نیشابور استفاده نمود و ضمن در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به منظور تغییر در پارامترهای قابل تغییر مدل و مشاهده تاثیر تغییر در هریک از آن‌ها بر وضعیت امنیت آب در حوزه، می‌توان بهترین سناریو و در راستای آن بهترین راهکار برای بهبود امنیت آب در حوزه آبخیز دشت

نیشابور را نیز تعیین نمود. همچنین بهره‌گیری از مدل ارائه شده در این پژوهش جهت تعیین و تحلیل وضعیت امنیت آب در تمامی حوزه‌های آبخیز کشور پیشنهاد می‌گردد.

فهرست منابع

- Ahmad, S., Simonovic, S.P., 2004. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. J. Comput. Civ. Eng. 18 (4), 331–340. https://doi.org/ 10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:4(331).
- Ahmad, S.S., Simonovic, S.P., 2015. System dynamics and hydrodynamic modelling approaches for spatial and temporal analysis of flood risk. Int. J. River Basin Manag. 13 (4), 443–461. https://doi.org/10.1080/15715124.2015.1016954.
- Ahmad, S.; Tahar, R.M.; Muhammad-Sukki, F.; Munir, A.B.; Rahim, R.A. (2016). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 56, 29–37.
- Baldassarre, G.D., Sivapalan, M., Rusca, M., Cudennec, C., Garcia, M., Kreibich, H., Konar, M., Mondino, E., Mård, J., Pande, S., Sanderson, M.R., Tian, F., Viglione, A., Wei, J., Wei, Y., Yu, D.J., Srinivasan, V., Blöschl, G. (2019). Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressingthe Sustainable Development Goals. Water Resources Research, 55, 6327–6355.
- Bassi, A.M., Tan, Z., Goss, S., 2010. An integrated assessment of investments towards global water sustainability. Water 2 (4), 726–741.
- Bertone, E., Sahin, O., Richards, R., Roiko, A., 2019. Assessing the impacts of extreme weather events on potable water quality: the value to managers of a highly participatory, integrated modelling approach. H2Open J. 2 (1), 9–24. https:// doi.org/10.2166/h2oj.2019.024.
- Davies, E.G., Simonovic, S.P., 2011. Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. Adv. Water Resour. 34 (6), 684–700.
- Ding, Z.; Yi, G.; Tam, V.W.Y.; Huang, T. A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. Waste Manag. 2016, 51, 130–141.

- Ding Z, Gong W, Li S, Wu Z. System Dynamics versus Agent-Based Modeling: A Review of Complexity Simulation in Construction Waste Management. *Sustainability*. 2018; 10(7):2484. https://doi.org/10.3390/su10072484
- Epstein, J.M. (2008). Why model? Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 11(4), 12.
- Fern Jndez, J.M., Selma, M.A.E., 2004. The dynamics of water scarcity on irrigated landscapes: Mazarr n and Aguilas in south-eastern Spain. Syst. Dyn. Rev 20 (2), 117–137.
- Forrester, J.W. System dynamics, systems thinking, and soft, O.R. Syst. Dyn. Rev. 1994, 10, 245–256.
- Gain, A. K., Giupponi, C., & Wada, Y. (2016). Measuring global water security towards sustainable development goals. Environmental Research Letters, 11(12), 124015.
- Ghorbani, M. (2018). Water Governance in the Face of Global Change. University of Tehran press. 330 p. (In Farsi)
- Gleick, P. 2003. Global freshwater resources: Soft-path Solutions for the 21st Century. Science, 302: 1524-1528.
- Gober, P., & Wheater, H. S. (2014). Socio-hydrology and the science–policy interface: a case study of the Saskatchewan River basin. Hydrology and Earth System Sciences, 18(4), 1413-1422.
- Gohari, A., Mirchi, A., Madani, K., 2017. System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in Central Iran. Water Resour. Manag. 31 (5), 1413–1434. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1575-z.
- Han, M.X., 2010. Research of industrial pollutant emission reduction potential inLiao River Basin. China Popul. Resour. Environ. 20 (8), 75–79.
- Han, T., Zhang, C., Sun, Y., Hu, X. 2017. Study on environment-economy-society relationship model of Liaohe River Basin based on multi-agent simulation, Ecological Modelling, 359: 135-145, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.016.
- Kotir, J., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources

management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana, *Science of The Total Environment*; 573, 444-457,https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.081.

- Kriegler, E., O'Neill, B.C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R.J., Moss, R.H., Wilbanks, T. 2012. The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways. Glob. Environ. Change 22: 807–822.
- Li, R.H., Guo, P., Li, J.B., 2018. Regional water use structure optimization under multiple uncertainties based on water resources vulnerability analysis. Water Resour. Manag. 32 (5), 1827–1847. https://doi.org/10.1007/s11269-018-1906-8.
- Majedul Islam, M.M., Shahid Iqbal, M., Leemans, R., Hofstra., N. 2018. Modelling the impact of future socio-economic and climate change scenarios on river microbial water quality. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 221: 283-292.
- Moussavi, H. (2018). The Role of Social Capital in increasing of Local Stakeholders' Adaptive Capacity Faced with Groundwater Level Decrease. M.Sc. Thesis., University of Tehran (In Farsi)
- Nasirzadeh, F.; Khanzadi, M.; Mir, M. A hybrid simulation framework for modelling construction projects using agent-based modelling and system dynamics: an application to model construction workers' safety behavior. Int. *Journal of Constr. Manag*. 2018, 18, 132–143.
- Nikoli´c, I. Co-Evolutionary Method for Modelling Large Scale Socio-Technical Systems Evolution. Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, The Netherlands, 2010.
- Pahl-Wostl, C. 2007. The implications of complexity for integrated resource management. *Journal of Environmental Modelling & Software*, 22, 561_569.
- Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Hamid Gozini, Samannaz Jafari. 2020. System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran, *Journal of Ecological Indicators*, Volume 108 . https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105682.
- Sadoddin, A., Shahabi, M., & Bai, M. (2017). Integrated Watershed Assessment and Management Principles Approaches for Modeling and

Decision Making. Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural resources. 170 p. (In Farsi)

- Scholl, H.J. Agent Based and System Dynamics Modeling: A Call for Cross Study and Joint Research. In Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-34: IEEE Computer Society), Maui, HI, USA, 6 January 2001; pp. 3003–3010.
- Zare, F., Elsawah, S., Bagheri, A., Nabavi, E., Jakeman, A.J. (2019). Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques. Journal of Environmental Management, 246: 27-41. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.033.
- Xi, X., Poh, K.L., 2015. A novel integrated decision support tool for sustainable water resources management in Singapore: synergies between system dynamics and analytic hierarchy process. Water Resour. Manag. 29 (4), 1329–1350. https:// doi.org/10.1007/s11269-014-0876-8.
- Xu, Z., Yao, L., Chen, X., 2020. Urban water supply system optimization and planning: Biobjective optimization and system dynamics methods. Comput. Ind. Eng. 142 https:// doi.org/10.1016/j.cie.2020.106373.
- Yazdanparast, M., Ghorbani, M., Salajegheh, A., & Kerachian, R. (2022 a). Analysis and Assessment of Water Security Index (WSI) in Neyshabour Plain Watershed. *Journal of Rural Research*, doi: 10.22059/jrur.2022.340867.1730 (In Farsi)
- Yazdanparast M, Ghorbani M, Salajeghe A, Kerachian R. (2022 b). Analysis of Water Security Concept in Neyshabour Plain Watershed by Using Human-Environment System (HES) Interaction Framework. *Journal of Rainwater Catchment Systems*. 10 (1) :13-26 URL: http://jircsa.ir/article-1-452-fa.html (In Farsi)
- Yazdanparast, M., Ghorbani, M., Salajegheh, A. Kerachian, R. (2023) Development of a Water Security Conceptual Model by Combining Human-Environmental System (HES) and System Dynamic Approach. Water Resour Manage. https://doi.org/10.1007/s11269-023-03449-5

Designing and Development of a Dynamic Water Security Model Based on Social-Ecological System Interactions (Neyshabur Plain watershed)

ABSTRACT

In the present study, using System Dynamics (SD) and Agent-Based Modeling (ABM), which are two common methods for investigating complex systems, the dynamic model of water security for the Neyshabur Plain watershed using the agent-based software NetLogo with the aim of identifying and analyzing the impact of different water consumption sectors on the state of water security in the watershed was designed and presented. The results show the effectiveness and reliability of the water security model presented in the present study. Therefore, it can be used to predict the water security situation in the future years in the Neishabur Plain and while considering different scenarios in order to change the modifiable parameters of the model, and observing the impact of each of them on the water security situation in the basin, the best scenario and in line with that the best solution to improve water security in the Neyshabur Plain watershed can be determined.

Keywords: Water security, System dynamics, Complex systems, Agent-based modeling, NetLogo

Extended Abstract

Objectives

Facing the problems of governance of water resources requires a multi-level and all-round approach. This all-round approach considers water policies as one of the components of a larger complex, which, along with other components such as extraction technology, infrastructure facilities, complementary industries, distribution and transmission networks, water market and even culture and the cultural symbols of water consumption together make up the socio-technological regime of water. Therefore, the aim of the current research is to design and present a dynamic model of water security for the Neyshabur Plain in Khorasan Razavi province using the integration of system dynamics (SD) and agent-based modeling (ABM) in the NetLogo software in order to identify the impact of different water consumption sectors on the water security situation in the watershed.

Methods

System dynamics (SD) and agent-based modeling (ABM) are two common methods for investigating complex systems. Each approach has its own advantages and disadvantages. So, these two models cannot solve the complex system simulation alone. Therefore, the dynamic model of water security in the Neishabur Plain watershed is built based on the NetLogo simulation platform and is associated with a dynamic and multi-factor system model.

Results

After designing the model based on the 20-year trend of changes in the parameters defined in the model, the observed and simulated data of the years 2011-2019 for the population factor, the amount of harvest in the agricultural, industrial, drinking and service sectors, the total volume of water demand and precipitation values were presented and validated. The results showed that the deviation of simulated data and real data is less than 10%, which indicates the effectiveness and reliability of the water security model presented in the present study.

Discussion

Modelers in developing conceptual models, calibrating and validating a complex water resources system faced difficulties including differences between scales and complexity. As a result, the review showed that most of the reviewed studies rarely considered the four subsystems, especially for systems that include cultural or political subsystems, because cultural or political variables cannot be easily conceptualized in both qualitative and quantitative aspects. A high level of uncertainty and dynamic complexities are inherent in water resource management systems due to nonlinear aspects, feedbacks, and delays, which pose challenges to decision makers. In addition, water resource systems have spatial and temporal characteristics, and therefore patterns in time and space must be examined together to understand the dynamic behavior of the system as a whole. In this regard, in the present study, using system dynamics (SD) and agent-based modeling (ABM), which are two common methods for investigating complex systems, a dynamic model of water security was designed and presented for the Neyshabur Plain watershed. The results of comparing the observed and simulated data of 2011-2019 for the population factor, the amount of harvesting in agriculture, industry, drinking and services sectors, the total volume of water demand and rainfall values show that the deviation of simulated data and real data is less than 10 % and this shows the effectiveness and reliability of the water security model presented in the present study. Therefore, it can be used to predict the future water security situation in the Neyshabour Plain watershed, and while considering different scenarios in order to change the modifiable parameters of the model, and observing the impact of the change in each of them on the water security situation in the basin, it is possible to determined the best scenario and, in line with that, the best solution for improving water security in the Neyshabur Plain watershed.