استفاده از روش پویایی سیستم در پیش‌بینی رفتار و تعیین بهره‌برداری مجاز از آب‌خوان دشت تبریز

حمیدرضا ناصری، روح‌اله آدینه‌وند*؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین
عبدالرحیم صلوی‌تبار؛ شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس

چکیده

دشت تبریز با وسعت ۸۶۹ کیلومترمربع بخشی از حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه است. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی رفتار آب‌خوان دشت تبریز در برابر تنش‌های مختلف و تعیین حد تراز مجاز بهره‌برداری از آب‌خوان است. برای رسیدن به هدف مذکور از شبیه‌سازی به‌روش سیستم پویا بهره گرفته شد. در این راستا اطلاعات مورد نیاز شامل داده‌های مربوط به منابع آب زیرزمینی (چاه، چشمه، قنات)، منابع و مصارف پس از رفع نواقص و تجزیه و تحلیل به نرم‌افزار VENSIM PLE+ معرفی و مدلی شبیه‌سازی پویا توسعه داده شد. سپس با تعریف محدودهٔ مجاز افت و خیز سطح ایستابی و تخصیص میزان آب استحصالی تحت این شرایط، تراز مجاز سطح آب و میزان بهره‌برداری مطمئن از آب‌خوان مشخص شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در دورهٔ شش‌ساله مدل‌سازی، حداکثر میزان برداشت ماهانه و سالانه از آب‌خوان بدون تحمیل خسارتی به آن به‌ترتیب ۱۲/۷۰ و ۱۵۲/۴۵ میلیون مترمکعب است. متوسط حداقل و حداکثر مجاز تراز سطح ایستابی طی این دوره نیز به‌ترتیب ۱۳۱۶/۶۲ و ۱۳۲۲/۳۴ متر است.

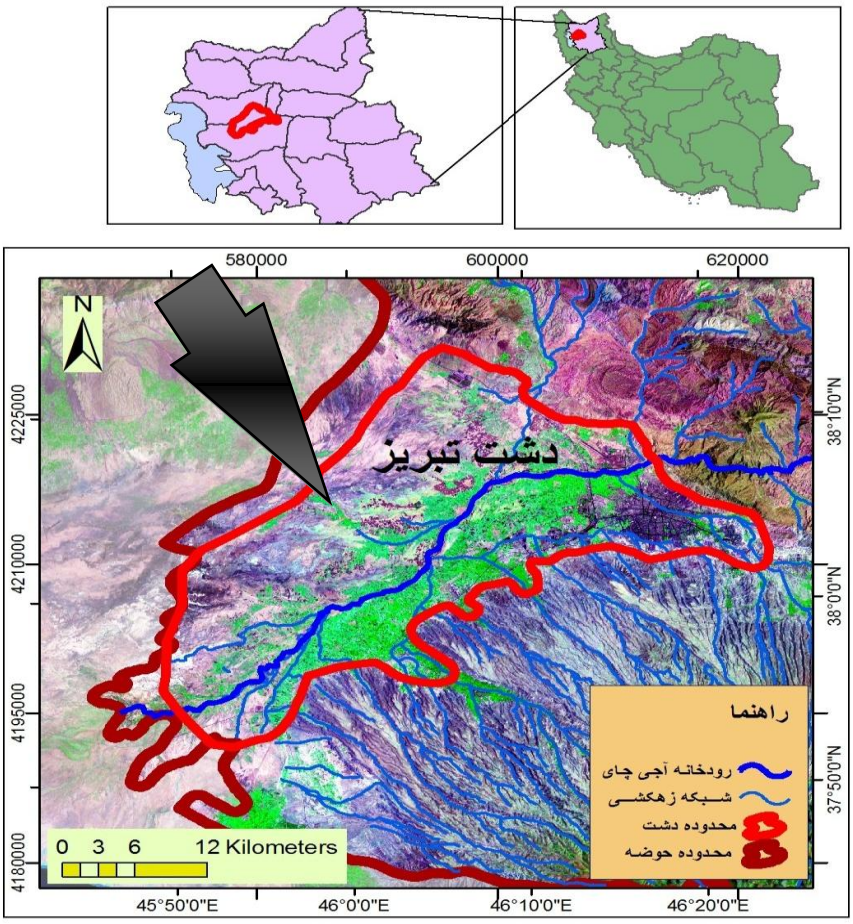
مقدمه

دشت تبریز بخشی از حوضهٔ آب‌ریز دریاچهٔ ارومیه است که در حد فاصل ′۵۵ °۴۵ تا ′۲۲ °۴۶ طول شرقی و ′۴۵ °۳۷ تا ′۲۸ °۳۸ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مطابق با اقلیم نمای آمبرژه دشت تبریز اقلیم-خشک سرد دارد. میانگین درازمدت بارندگی سالانه (دورهٔ ۵۴ ساله) منطقه حدود ۲۹۰ میلی‌متر است [۳].

طبیعت پیچیده منابع آب نیازمند روش‌های جدیدی است که دیدگاه‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در قالبی به‌هم پیوسته گردآوری کند که همان مفهوم مدیریت جامع منابع آب است [۴]. روش شناخت پدیده‌ها، بررسی مدل‌های ساده شده‌ای از آن‌هاست. مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد سیاست‌های آبی موجود و یا پیشنهاد یک سیاست جدید و نیز سیاست‌های بهره‌برداری استفاده می‌شوند [۷]. پویایی سیستم یک روش شیءگرا برای مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب است. این سیستم از مکانیک نیوتنی منشأ می‌گیرد و بر مبنای تئوری غیرخطی بودن اجزا استوار است [۱۳]، که خود مزیتی برای شبیه‌سازی منابع آب است. فارستر پویایی سیستم را به‌منظور درک بهتر مسایل استراتژی در سیستم‌های پویای پیچیده تدوین کرده است [۹] و استرمن نیز مبانی آن را شرح داده است [۱۳].

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، روش پویایی سیستم، بهره‌برداری مجاز، دشت تبریز، نرم‌افزار VENSIM
دریافت ۹۰/۱۲/۱۰ پذیرش ۹۲/۱۱/۱
***نویسنده مسئول** geoadinehvand@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت تبریز

سرعت زیاد در مدل‌سازی، آسانی ساختار، اصلاح مدل، توانایی انجام تحلیل و ارتباط مؤثر با مدل و افزایش اطمینان در روند مدل‌سازی به‌دلیل مشارکت کاربر در آن است که از جمله برتری‌های شبیه‌سازی به‌روش پویایی سیستم نسبت به‌دیگر روش‌های شبیه‌سازی است. ارتباط مؤثر با نتایج مدل، سهولت ایجاد تغییرات در مدل و قابلیت حساسیت این روش مدل‌سازی را از بقیه روش‌های رایج مدل‌سازی منابع آب جذاب‌تر می‌کند. کاربرد پویایی سیستم در مدیریت منابع آب به شاخه‌های متعددی از قبیل برنامه‌ریزی حوضه آب‌ریز و آنالیز ناحیه‌ای، مدیریت آب شهری، مدیریت سیلاب و مدل‌هایی برای آبیاری تقسیم می‌شود [۱۵].

در زمینهٔ استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم در منابع آب تحقیقات زیادی صورت گرفته است. لابادیه در سال ۱۹۹۰ بستهٔ نرم‌افزاری برنامه‌ریزی پویا را بسط داد [۱۰]. این بسته که CSUDP نام داشت به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده و در طراحی‌ها و کاربردهای مدیریتی منابع آب استفاده شده است. سیمونوویچ و احمد در سال ۲۰۰۵ کاربردی عملی شبیه‌سازی سیستم پویا برای برآورد اثربخشی فرآیندهای مدیریت اضطراری سیل را ارائه دادند. هر فرآیند شامل انتخاب شیوه هشدار سیل، هم‌آهنگی هشدار، زمان دستور تخلیه، انسجام اجتماع و شرایط بالادست سیلاب بود [۱۲]. ناصری و همکاران مدل شبیه‌سازی پویا برای بررسی تأثیر احداث سد شهر چای بر روی آب‌خوان پایین دست را ارائه دادند [۸]. عاشوری با استفاده از روش پویایی سیستم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

مدلی را برای مدیریت منابع آب دشت خوی توسعه داد [۹]. وی اثر انتقال آب از رودخانه قطورچای به سد مخزنی غازان را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که این انتقال آب اثرات مخربی روی آبخوان دشت خوی خواهد داشت. پایمزد و همکاران برنامه‌ریزی غیرخطی و سیستم‌های پویا در تخصیص آب کشاورزی برای حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان به‌منظور برآورد نیاز بخش کشاورزی و با در نظر گرفتن آب قابل دسترس را به‌کار بردند [۱]. نتایج این تحقیق توان قابل قبول بهینه‌سازی به‌روش پویایی سیستم را نشان داد. صلوی‌تبار و همکاران یک مدل شبیه‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی را برای مدیریت منابع آب حوضه آبریز رودخانه هراز با استفاده از تکنیک پویایی سیستم توسعه دادند [۵]. رشید و هایز با ارائهٔ روشی ساده بر پایهٔ برنامه‌ریزی پویا مسئلهٔ مدیریت فاضلاب را بررسی کردند. آن‌ها در این روش دو مدل پویای سیستم جمع‌آوری و انتقال فاضلاب را ارائه دادند [۱۱].

آبخوان دشت به‌علت عوامل تأثیرگذار و تغییردهندهٔ کیفیت، احداث تأسیسات آبی متنوع آبرسانی شهری و کشاورزی، تصفیه‌خانه و همچنین چاه‌های آب با ساختمان غیراصولی، پیچیدگی در رفتار و بالطبع پیچیدگی در پیش‌بینی رفتار دارد [۳]. حفر غیراصولی چاه، برداشت بی‌رویه از آبخوان و همچنین کاهش بارش و افزایش تبخیر در سال‌های اخیر باعث شده است که از میزان آب‌های با کیفیت خوب کاسته شود. مدیریت منابع آب به‌صورت جامع و یکپارچه در دشت تبریز تاکنون انجام نشده است و بنا بر این سیاست‌ها و اقداماتی که برای بهبود شرایط برخی از بخش‌های مصرف‌کننده یا متقاضی آب (کشاورزی، شهری، صنعتی، محیط زیست و اکوسیستم‌ها) بدون در نظر گرفتن این موضوع تدوین می‌شود، می‌تواند باعث اثرات سوء بر دیگر متقاضیان آب شود. از این رو تهیه مدل بهره‌برداری برای مدیریت یکپارچه منابع آب این آبخوان برای رفع مشکلات موجود ضروری است. در این تحقیق ضمن ارزیابی پارامترهای مختلف تأثیرگذار در منابع آب دشت تبریز، مدل یکپارچه ذخیره و جریان به‌روش پویایی سیستم برای آن توسعه داده است و همچنین با تعریف حد مجاز نوسانات سطح آب زیرزمینی، موقعیت تراز سطح آب در حالت فعلی و میزان بهره‌برداری مطمئن از آبخوان بررسی شده است. در پایان نیز سناریوهای مدیریتی مختلف از قبیل توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب، افزایش بازده کشاورزی و اثرات آن‌ها بر آبخوان دشت تبریز بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدرولوژی، هواشناسی، کشاورزی، پژوهش‌های منابع و مصارف آب در دشت تبریز، مورد نیاز است. داده‌های مربوط شامل اطلاعات مربوط به مؤلفه‌های بیلان، تراز و عمق آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌ها، قنات‌ها، ایستگاه‌های هیدرومتری و منابع و مصارف آب از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی و داده‌های هواشناسی مانند دما، بارش، تبخیر از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

فرایند مدل‌سازی با نرم‌افزار VENSIM PLE+ انجام گرفته است. این نرم‌افزار با داشتن محیط گرافیکی مناسب و کاربردوست، مجموعه‌ای از ابزارهای قدرتمند برای وارد کردن و مدیریت این داده‌ها را فراهم می‌کند. VENSIM ابزار مدل‌سازی گرافیکی است که مفهوم‌سازی، مستندسازی، شبیه‌سازی، آنالیز و بهینه‌سازی مدل‌های سیستم دینامیک را امکان پذیر می‌کند [۱۴].

در این پژوهش، مدلی مدیریتی جامع با استفاده از ابزار سیستم پویا و نرم‌افزار VENSIM PLE+ به‌منظور شبیه‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی و تعیین حد نوسانات بهینه تراز سطح ایستابی آبخوان دشت تبریز تهیه شده است. پس از شبیه‌سازی، مدل واسنجی و اعتبارسنجی شد و با انواع شاخص‌های آماری بررسی شد. در ادامه پس از تعیین حد مجاز برای نوسانات سطح آب زیرزمینی، اثرات اجرای سناریوهای مختلف مدیریتی بر روی آبخوان بررسی شد.

بحث و بررسی

طراحی مدل

اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل، تمامی داده‌های منابع آب زیرزمینی (چاه، چشمه، قنات)، منابع و مصارف پس از گردآوری، تجزیه و تحلیل اولیه، رفع نواقص و تولید سری‌های درازمدت با گام‌های ماهانه به‌مدت شش سال آبی (۸۰-۸۱ الی ۸۵-۸۶) در فرمت مناسب به مدل معرفی شد. اطلاعات دیگر مورد نیاز از قبیل ورودی-خروجی زیرزمینی، زه‌کش و نفوذ بستر رودخانه پس از رسم نقشه‌های هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در گام‌های زمانی ماهانه برای دورهٔ مدل‌سازی (۸۰-۸۱ تا ۸۵-۸۶) محاسبه شد. میزان تبخیر از سطح آبخوان پس از رسم نقشه‌های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی و با استفاده از منحنی وایت و در گام‌های زمانی ماهانه محاسبه شد. برای محاسبه رواناب، میزان نفوذ مستقیم بارش به آبخوان و دیگر متغیرهای مدل پویایی، معادلات مربوط در محیط نرم‌افزار VENSIM PLE+ نوشته شد و به‌صورت گام‌های ماهانه به مدل معرفی شد.

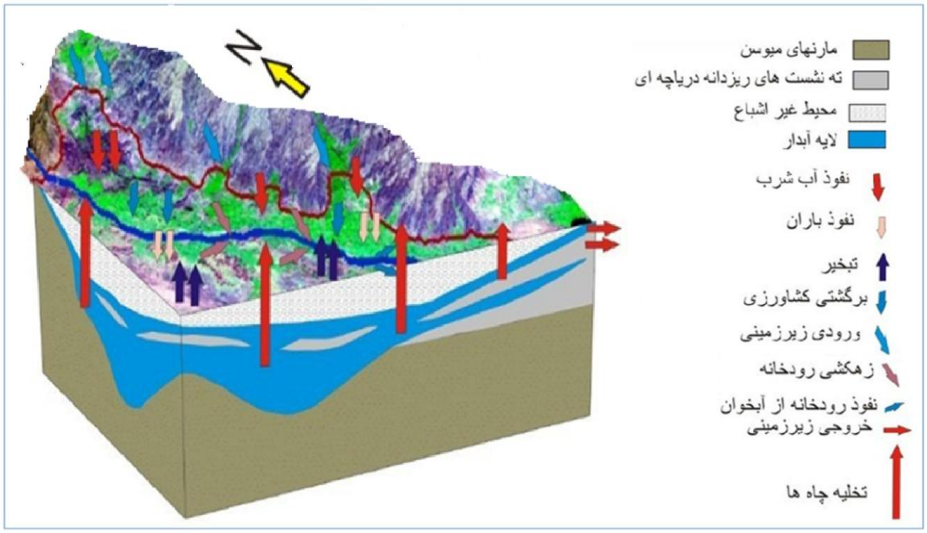
در فرایند شبیه‌سازی دشت تبریز به‌روش پویایی سیستم، در ابتدا مدل مفهومی آبخوان تهیه شد (شکل۲). سپس متغیرها و مفاهیم کلیدی، دورهٔ زمانی مدل و تعریف دینامیکی مسئله مشخص شد. در ادامه همهٔ مؤلفه‌های ورودی و خروجی به مخزن آبخوان و همچنین منابع آب سطحی موجود در منطقه شناسایی شد و با توجه به ارتباط آن‌ها با هم در محیط نرم‌افزار VENSIM PLE+ کدنویسی شد. برای هر یک از این مؤلفه‌ها بر اساس استاندارد برنامه، خصوصیات جریان، ذخیره، متغیر یا معین داده شد. پس از تعیین ارتباط میان متغیرها، نمودار علت و معلول بین متغیرها برای نشان دادن هم‌بستگی بین آن‌ها و فرایندهای بازخوردی رسم شد. این نمودارها برای ایجاد ارتباط بین نتایج حاصل از مدل‌سازی به‌کار می‌روند.

مؤلفه‌هایی که به‌صورت سری زمانی هستند از قبیل بارش، تبخیر و آب برگشتی از طریق فراخوانی به‌کمک فایل اکسلی و با گام‌های زمانی ماهانه به نرم‌افزار معرفی شد. برای مؤلفه‌های باقی‌مانده روابط مربوط در داخل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

نرم‌افزار نوشته شد. در پایان با توجه به ارتباط تمامی اجزاء با هم، مدل برای شبیه‌سازی رفتار آب‌خوان در شرایط فعلی اجرا شد.

کل مدل پویایی سیستم و روابط متغیرهای آن برای منابع آبی دشت تبریز در قالب نمودار ذخیره و جریان در شکل ۳ نشان داده شده است. باید توجه داشت که در این مدل ابتدا آب برای نیازهای شرب و صنعت تأمین می‌شود و سپس تا حد توان سیستم و با در نظر گرفتن اصل توسعهٔ پایدار نیاز مصارف کشاورزی تأمین می‌شود.



شکل ۲. مدل مفهومی شماتیک آب‌خوان دشت تبریز

واسنجی مدل

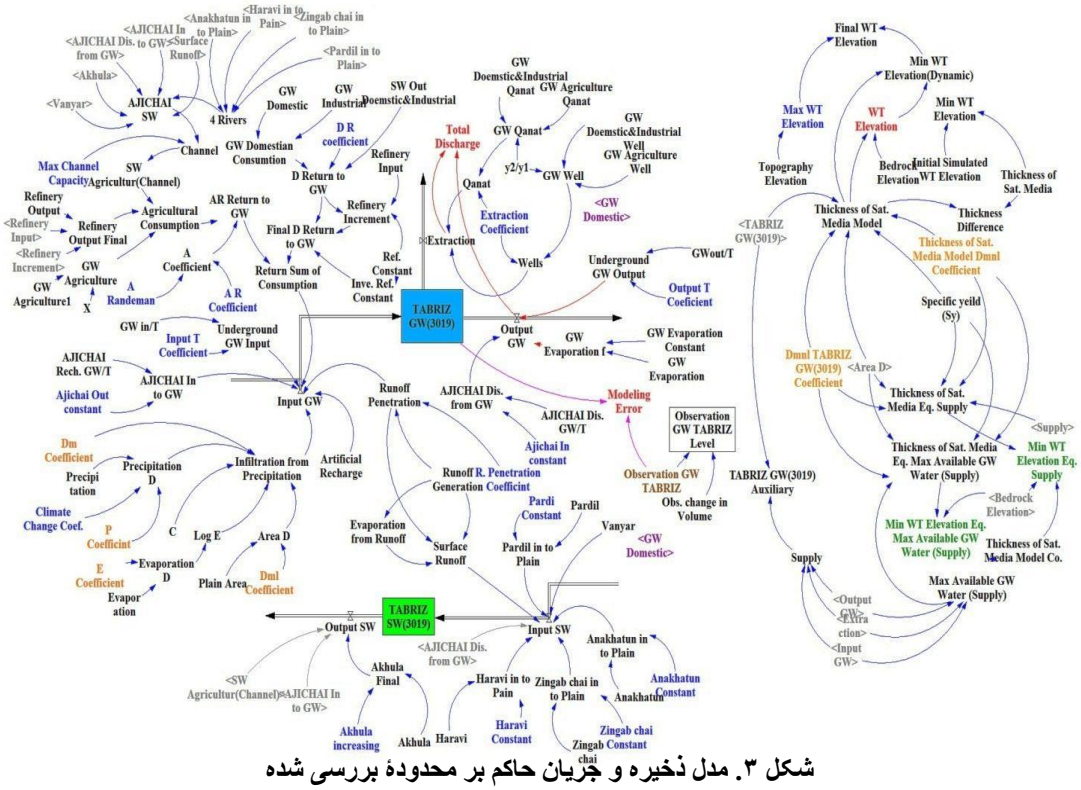
در مرحلهٔ واسنجی (برای دورهٔ زمانی شبیه‌سازی‌سازی یعنی از سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵-۱۳۸۶)، نتایج حاصل از مدل با مقادیر مشاهده شده با توجه به پارامترهای تغذیه، تخلیه و ویژگی‌های هیدرولیکی و هیدرودینامیکی آب‌خوان مقایسه و حجم ذخیره آب‌خوان آبرفتی دشت بررسی شد. مبنای مقایسهٔ سری زمانی آبنمود معرف آب‌خوان با گام‌های ماهانه بود که به‌عنوان مقادیر مشاهده‌هایی با حجم محاسباتی با مدل مقایسه شد. به‌منظور مقایسهٔ مقادیر به‌دست آمده از مدل و مقادیر مشاهده‌ای، از شاخص‌های آماری نظیر خطای میانگین[۱] (ME)، خطای میانگین مطلق[۲] (MAE)، درصد خطای میانگین مطلق[۳] (MAPE) و ریشهٔ دوم میانگین مربعات خطا[۴] (RMSE)، استفاده شد (شکل ۴). به‌منظور مقایسهٔ ماهانه رفتار مدل با مقادیر مشاهده‌ای نیز از منحنی درصد خطا استفاده شد که پس از واسنجی در محدودهٔ ۱± متغیر است (شکل ۴). بنا بر این مدل تهیه شده را می‌توان به‌عنوان نمایندهٔ سیستم واقعی در طبیعت در نظر گرفت.

زیرساختارهای مدل پویایی سیستم

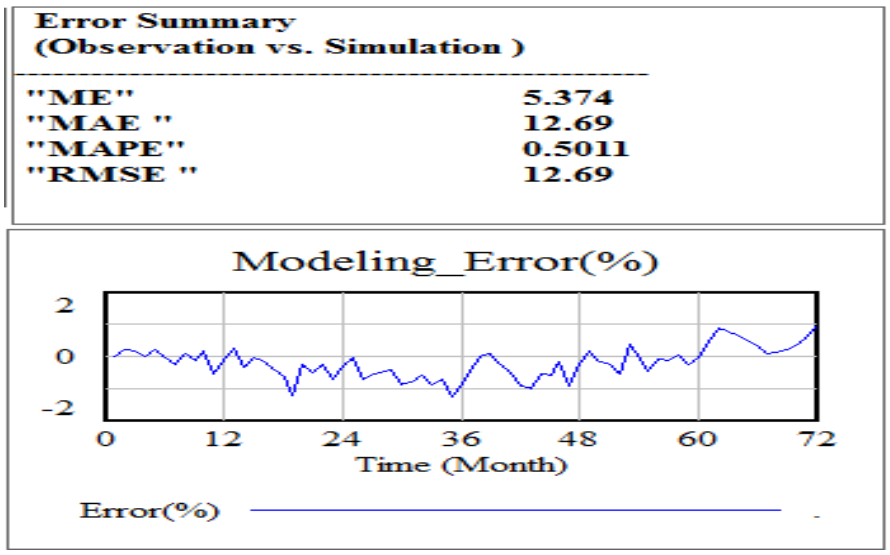
چهار پارامتر در مدل پویایی سیستم آب‌خوان دشت تبریز در نظر گرفته شده است: تعیین حد مجاز سطح ایستابی برای آب‌خوان دشت تبریز، بازده کشاورزی، تعیین نیاز شرب و صنعت و تعیین نیاز کشاورزی.

۱. Mean Error ۲. Mean Absolute Error ۳. Mean Absolute Percent Error
۴. Root Mean Square Error

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ۳. مدل ذخیره و جریان حاکم بر محدودهٔ بررسی شده



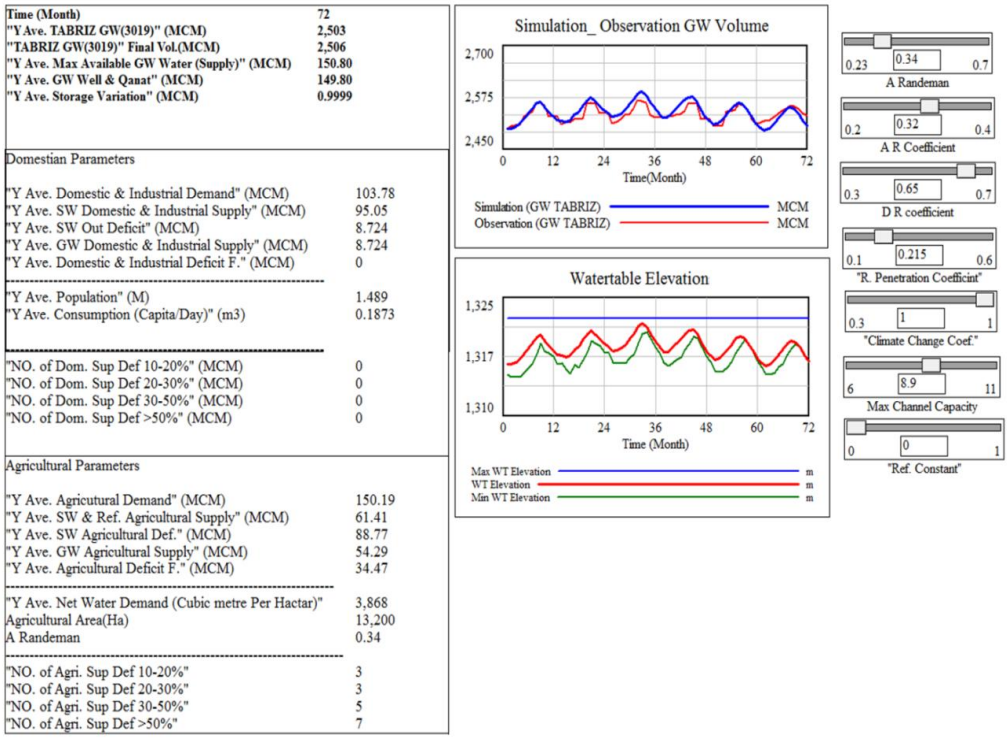
شکل ۴. مقادیر انواع خطاها در پایان دورهٔ واسنجی

مسئلهٔ تأمین نیاز مصارف شرب، صنعت و کشاورزی با رعایت اولویت تأمین نیاز شرب و صنعت نسبت به تأمین نیاز کشاورزی و همچنین مسئلهٔ رشد جمعیت و صنعت در طول دورهٔ پیش‌بینی که سبب ایجاد نیاز شرب و صنعت بیش‌تری می‌شود، در مدل لحاظ شده است.

شکل ۵ اطلاعات مربوط به ذخیرهٔ آب‌خوان، تراز سطح آب زیرزمینی و پارامترهای شرب، صنعت و کشاورزی در شرایط فعلی بهره‌برداری از منابع آب دشت تبریز را نشان می‌دهد. میانگین ذخیرهٔ آب‌خوان در طی دورهٔ مدل‌سازی ۲۵۰۳ میلیون مترمکعب، حداکثر آب قابل برداشت به‌صورت مطمئن ۱۵۲/۴۵ میلیون

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

مترمکعب در سال و میزان نیاز شرب و صنعت ۱۰۳/۷۸ میلیون مترمکعب در سال است که از این مقدار ۹۵/۰۵ میلیون مترمکعب آن را آب‌های خارج از محدودهٔ بیلان تأمین می‌کند و ۸/۷۲ میلیون مترمکعب دیگر آن به‌صورت کمبود از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به شکل ۵ میزان مصرف سرانه مصرف آب شرب هر نفر در روز ۰/۱۹ مترمکعب و جمعیت متوسط محدودهٔ [۲] در دورهٔ مدل‌سازی نیز ۱/۴۸۹ میلیون نفر است. سطح زیر کشت محصولات کشاورزی ۱۳۲۰۰ هکتار است [۲]. آب خالص مورد نیاز هر هکتار نیز ۳۸۶۸ مترمکعب است. بازده کشاورزی کل نیز ۳۴ درصد است [۲] که بدین‌ترتیب نیاز کشاورزی به‌طور متوسط سالانه ۱۵۰/۱۹ میلیون مترمکعب در سال است که ۶۱/۴۱ میلیون مترمکعب آن از آب سطحی و آب تصفیه شده فاضلاب تأمین می‌شود. مقدار ۵۴/۲۹ میلیون مترمکعب آن نیز از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. بنا بر این به‌طور متوسط ۳۴/۴۷ میلیون مترمکعب در سال برای کشاورزی کمبود آب وجود دارد. میزان کمبود طی یک دورهٔ شبیه‌سازی ۶ ساله، ۱۸ ماه است که بدین‌ترتیب در طی دوره ۷۲ ماه شبیه‌سازی ۲۵ درصد مواقع کمبود آب برای نیاز کشاورزی وجود دارد.



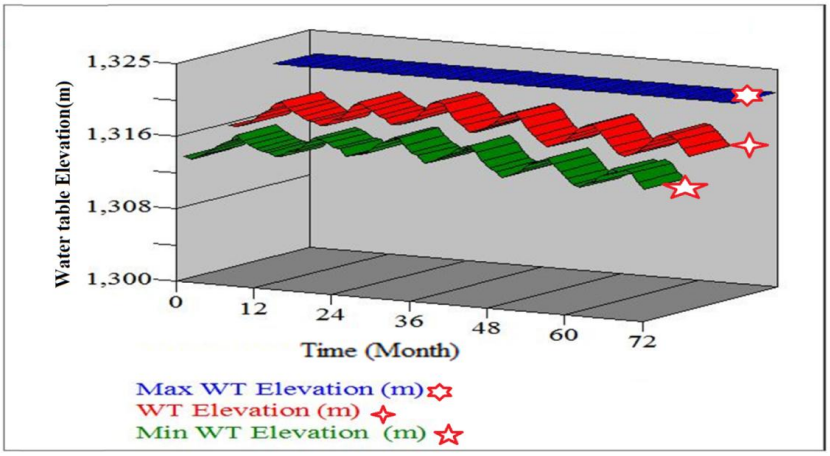
شکل ۵. شرایط کنونی آبخوان دشت تبریز و پارامترهای شرب، صنعت و کشاورزی تحت سیاست بهره‌برداری فعلی

تعیین تراز مجاز سطح ایستابی آبخوان

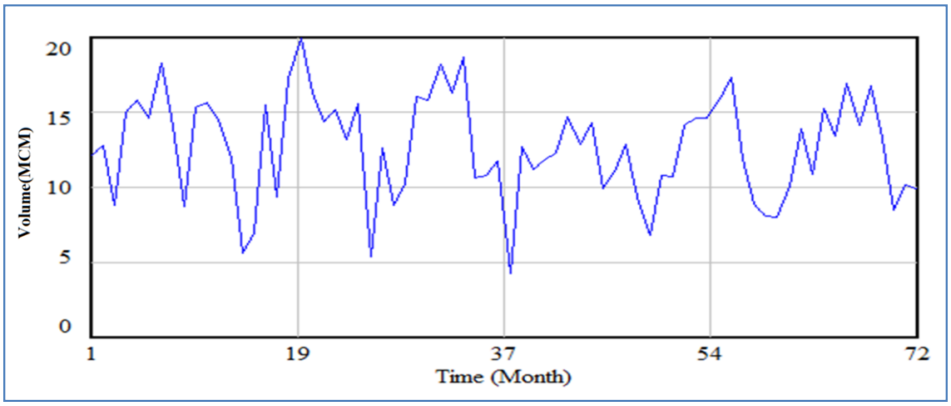
تراز سطح ایستابی مجاز ترازی است که برداشت از آبخوان حداکثر باشد ولی آسیبی جبران ناپذیر به آن وارد نشود. این تراز نباید به حدی بالا باشد که زمین زه‌دار و غیرقابل استفاده شود. از طرف دیگر تراز سطح آب به حدی پایین نباشد که امکان جبران افت فراهم نشود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

پس از واسنجی مدل و صحت ساختار، تراز مجاز سطح آب در آبخوان بررسی شد. این حد برابر با مقدار آب تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است که با نرم‌افزار محاسبه شد. از سوی دیگر سطح آب زیرزمینی نباید آنقدر بالا بیاید که زمین زه‌دار شود. این حد با توجه به جنس و بافت رسوبات بخش غیراشباع آبخوان دو متری زیر سطح زمین در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که این مقدار ثابت نیست، بلکه بستگی به جنس خاک و بافت آن در دشت‌های مختلف و حتی در مناطق مختلف یک دشت متفاوت است. بنا بر این دو تراز سطح آب زیرزمینی به‌عنوان حد مجاز تغییرات سطح آب در آبخوان به مدل معرفی شد (شکل ٦). با توجه با این دو محدودیت میزان مجاز آب قابل برداشت از آبخوان با گام‌های زمانی ماهانه محاسبه شد (شکل ٧).



شکل ٦. حداکثر و حداقل تراز مجاز سطح ایستابی و تراز سطح ایستابی فعلی



شکل ٧. مقادیر بهره‌برداری مطمئن از آبخوان دشت تبریز در دورهٔ مدل‌سازی

تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به‌حداقل مقدار مجاز آن در عمق بیش‌تری قرار دارد. بنا بر این از نظر محدودیت اول (حداکثر مجاز تراز سطح آب) مشکلات کم‌تری وجود دارد. میانگین تراز سطح ایستابی فعلی ١٣١٨/٧۴ متر است. حداقل مجاز تراز سطح ایستابی آبخوان طی دورهٔ مدل‌سازی به‌طور متوسط ١٣١٧/٣٥ متر از سطح دریا است. میانگین مقدار مجاز آب قابل برداشت طی دورهٔ مدل‌سازی به‌طور ماهانه و سالانه به‌ترتیب ١٢/٧٠ و ١٥٢/٤٥ میلیون مترمکعب برآورد شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

حداکثر مجاز تراز سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۱۳۲۲/۳۴ متر است. حداکثر مجاز بالا آمدن سطح آب در آبخوان از تراز میانگین فعلی نیز از ۱/۹۰ متر تا ۵/۰۶ متر در ماه‌های مختلف در تغییر است. حد متوسط مجاز برای بالا آمدن سطح آب در طی دورهٔ شش ساله مدل‌سازی نیز ۳/۶۹ متر است. حداکثر مجاز افت سطح آب در آبخوان از تراز میانگین فعلی نیز از ۰/۰۶ متر تا ۲/۳۱ متر در ماه‌های مختلف در تغییر است. حد متوسط مجاز برای بالا آمدن سطح آب در طی دورهٔ شش ساله مدل‌سازی نیز ۱/۳۰ متر است.

ارزیابی و طراحی سیاست‌ها و سناریوهای مختلف

با استفاده از مدل ساخته شده به‌روش پویایی سیستم می‌توان اثرات سیاست‌ها و سناریوهای مختلف مدیریتی بر روی آبخوان را شبیه‌سازی کرد و پیامدهای آن را بررسی کرد. همچنین می‌توان میزان حساسیت رفتار آبخوان را به وجود و حذف، افزایش یا کاهش، تغییر ناگهانی در رفتار برخی متغیرها بررسی کرد [۴].

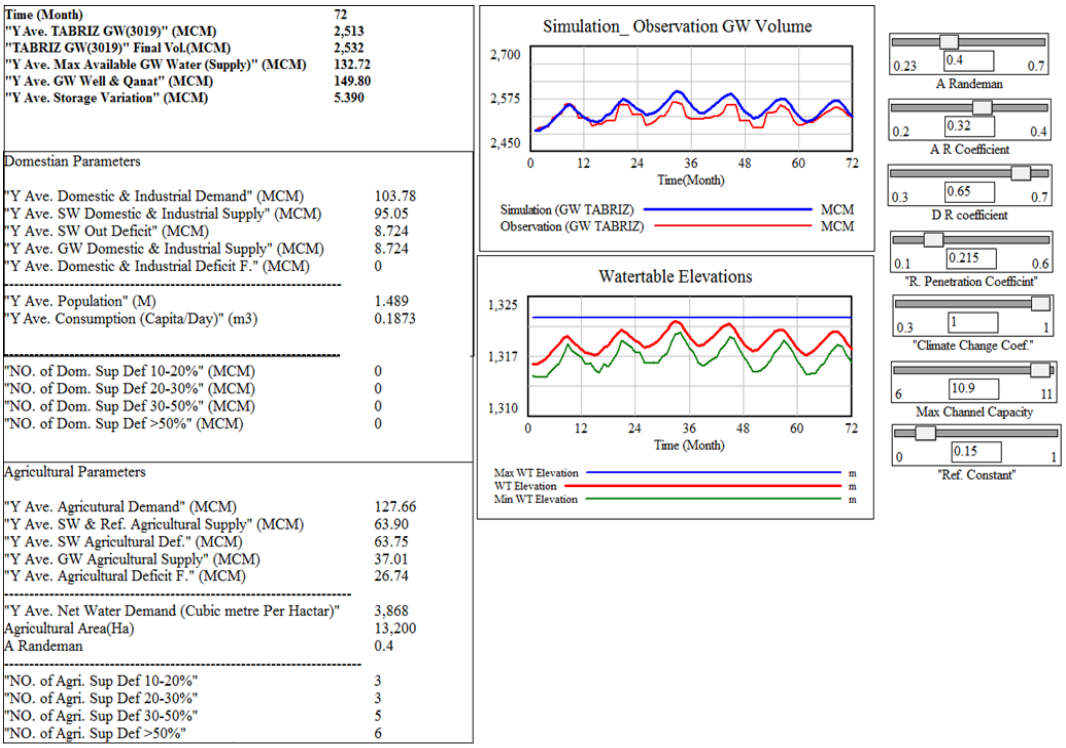
در این تحقیق تلفیقی از سناریوهای مختلف مدیریتی بر روی مدل پویایی سیستم آبخوان دشت تبریز اعمال شده و نتایج حاصل از اجرای آن‌ها در میزان نوسانات ذخیره آب زیرزمینی بررسی شده است. سناریوهای اجرا شده شامل: تلفیقی از سناریوهای افزایش بازده آبیاری، طرح جمع‌آوری فاضلاب و تغییر در تخصیص آب سطحی بوده است که در صورت عدم تغییر در وضعیت بارندگی و کاهش میزان بارندگی بررسی شده است. در این ارتباط پنج سناریوی مختلف تعریف و اثرات آن‌ها بر روی آبخوان دشت تبریز شبیه‌سازی شده است (جدول ۱).

جدول ۱. سناریوهای اعمال شده به مدل پویایی دشت تبریز در راستای سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آبی موجود

سناریو	شرح سناریو
حالت ۱	افزایش ۱۶% بازده کشاورزی، افزایش ۱۵% ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب) و افزایش تخصیص از آب سطحی به‌میزان دو مترمکعب در ثانیه ظرفیت شبکهٔ آبیاری.
حالت ۲	افزایش ۱۶% بازده کشاورزی، افزایش ۴۰% ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب) و افزایش تخصیص از آب سطحی با افزایش دو مترمکعب در ثانیه ظرفیت شبکهٔ آبیاری.
حالت ۳	افزایش ۱۶% بازده کشاورزی، افزایش ۴۵% ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب) و افزایش تخصیص از آب سطحی با افزایش دو مترمکعب در ثانیه ظرفیت شبکه آبیاری.
حالت ۴	افزایش ۱۶% بازده کشاورزی، افزایش تخصیص از آب سطحی با افزایش دو مترمکعب در ثانیه ظرفیت شبکهٔ آبیاری، افزایش ۴۵% ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب) و تغذیهٔ مصنوعی آبخوان به‌طور سالانه ۸/۵ میلیون مترمکعب.
حالت ۵	افزایش ۱۶% بازده کشاورزی، افزایش تخصیص از آب سطحی با افزایش دو مترمکعب در ثانیه ظرفیت شبکهٔ آبیاری، افزایش ۴۵% ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب) و تغذیهٔ مصنوعی آبخوان به‌طور سالانه ۸/۵ میلیون مترمکعب و کاهش ۵۰ درصدی نزولات جوی.

با اجرای سناریو در حالت اول (شکل ۸)، ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۵/۳۹ میلیون مترمکعب در سال افزایش می‌یابد. حجم ذخیره آبخوان در پایان دورهٔ مدل‌سازی در این حالت ۲۵۳۲ میلیون مترمکعب می‌شود. سطح آب زیرزمینی نیز در ابتدا افزایش زیادی می‌یابد ولی بعد از آن تقریباً در حالت ثابت باقی می‌ماند و همچنان در محدودهٔ مجاز تغییر می‌کند. کمبود آب برای کشاورزی نسبت به شرایط فعلی نیز به ۲۶/۷۴ میلیون مترمکعب می‌رسد و در مجموع درصد کمبود آب برای کشاورزی به حدود ۲۳/۶ کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



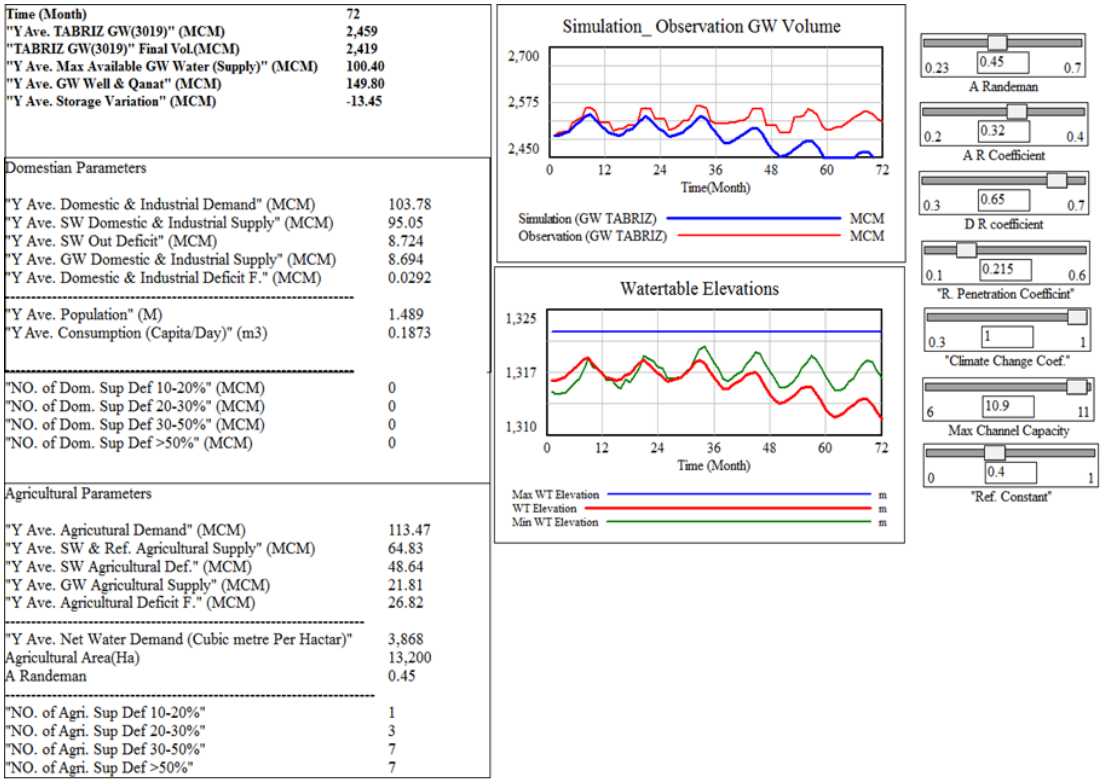
شکل ۸. سناریوی افزایش تخصیص از آب سطحی، افزایش بازده کشاورزی و توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب و اثرات حاصل از اجرای آن بر روی ذخیره آبخوان و پارامترهای نیاز کشاورزی

با اجرای سناریو در حالت دوم (شکل ۹)، ذخیره آبخوان نسبت به حد مجاز، ۱۳/۴۵ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. متوسط حجم ذخیره آبخوان در این شرایط نیز ۲۴۵۹ میلیون مترمکعب است. سطح آب زیرزمینی یک روند نزولی شدید خواهد داشت و در ۲۴ ماههٔ اول دوره مدل‌سازی پایین‌تر از حد مجاز نوسانات مجاز سطح آب زیرزمینی قرار می‌گیرد. نیاز کشاورزی کم می‌شود و به طبع آن کمبود آب برای کشاورزی نیز کم‌تر می‌شود.

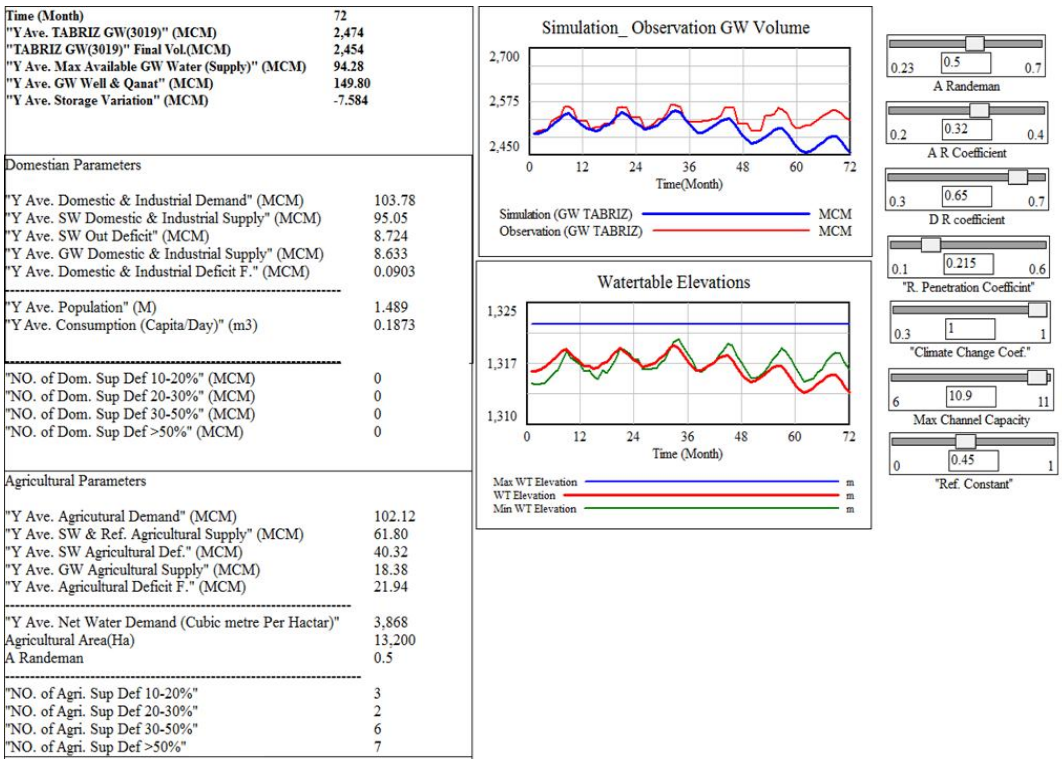
در حالت سوم ذخیره آبخوان به میزان ۷/۵۸ میلیون مترمکعب از حالت مجاز خود کم‌تر می‌شود و در پایان دورهٔ شبیه‌سازی به ۲۴۵۴ میلیون مترمکعب می‌رسد. تراز آب زیرزمینی نیز از ابتدای دوره تا پایان سه سال اول شبیه‌سازی در محدودهٔ مجاز است ولی پس از آن افت زیاد می‌شود و به پایین‌تر از تراز مجاز خود می‌رسد. نیاز کشاورزی تحت این سناریو ۱۱۳/۴۷ میلیون مترمکعب در سال است و درصد کمبود تأمین آب مورد نیاز کشاورزی نیز نسبت به شرایط فعلی به ۲۵/۰ درصد می‌رسد (شکل ۱۰).

در حالت چهام متوسط حجم ذخیره آبخوان به ۲۵۰۰ میلیون مترمکعب می‌رسد که هنوز ۱/۲۹ میلیون مترمکعب از حالت مجاز آن بالاتر است. همچنین با اجرای این سناریو نیاز کشاورزی به ۱۰۲/۱۲ میلیون مترمکعب در سال کاهش می‌یابد و کمبود آن به ۱۹/۷۸ میلیون مترمکعب می‌رسد. درصد کمبود تأمین آب کشاورزی در این حالت به ۲۲/۲ درصد در سال کاهش می‌یابد (شکل ۱۱)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

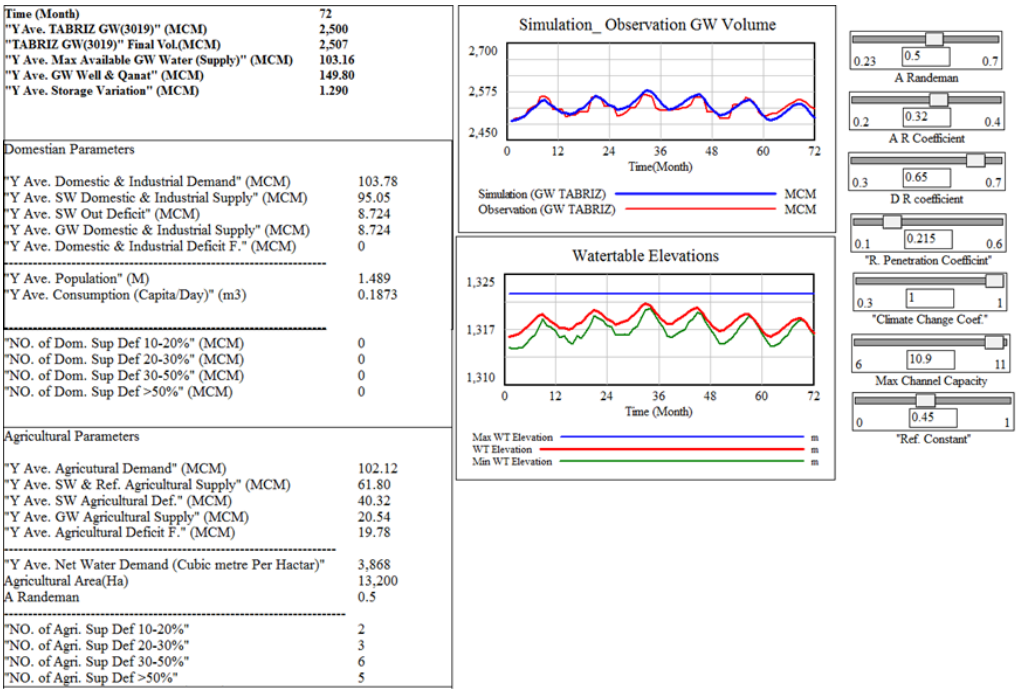


شکل ۹. سناریوی افزایش تخصیص از آب سطحی، افزایش بازده کشاورزی و توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب و اثرات حاصل از اجرای آن بر روی ذخیره آبخوان و پارامترهای نیاز کشاورزی

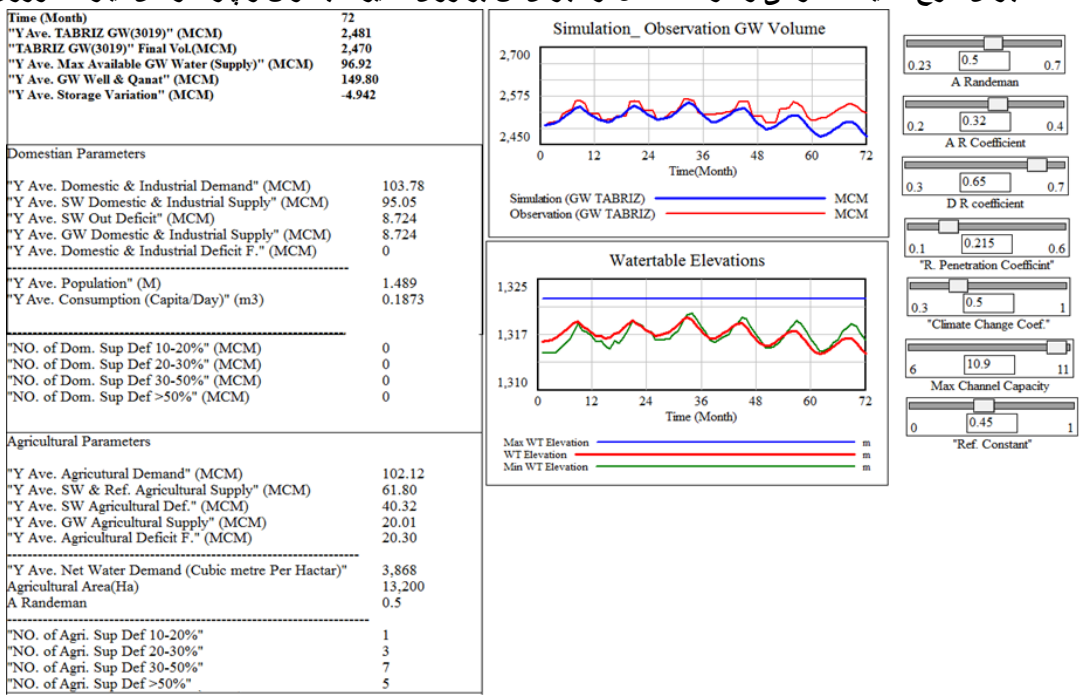


شکل ۱۰. سناریوی افزایش تخصیص از آب سطحی، افزایش بازده کشاورزی و توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب و اثرات حاصل از اجرای آن بر روی ذخیره آبخوان و پارامترهای نیاز کشاورزی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ۱۱. سناریوی افزایش تخصیص از آب سطحی، افزایش بازده کشاورزی، توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب و اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی و اثرات حاصل از اجرای آن بر روی ذخیرهٔ آبخوان و پارامترهای نیاز کشاورزی



شکل ۱۲. سناریوی افزایش تخصیص از آب سطحی، افزایش بازده کشاورزی، توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب، اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی و اعمال ضریب تغییرات اقلیمی و اثرات حاصل از اجرای آن بر روی ذخیره آبخوان و پارامترهای نیاز کشاورزی

به‌منظور بررسی تأثیر کاهش ریزش‌های جوی، بر روی تغییرات ذخیره آبخوان، ضریب ۵۰ درصدی کاهش میزان نزولات جوی در مدل لحاظ شد (حالت پنجم) و مدل تحت این شرایط اجرا شد (شکل ۱۲). در این حالت متوسط ذخیرهٔ آبخوان ۲۴۸۱ میلیون مترمکعب در سال و حجم ذخیرهٔ آن در پایان دورهٔ مدل‌سازی به ۲۴۷۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

میلیون مترمکعب می‌رسد. حداکثر آب قابل برداشت به‌صورت مجاز در این حالت ۹۶/۹۲ میلیون مترمکعب و میزان ذخیرهٔ مخزن ۴/۹۴ میلیون مترمکعب کم‌تر از حد مجاز خود است. نیاز کشاورزی در این حالت نیز مشابه حالت قبل است ولی میزان کمبود و درصد آن تغییر می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به پیچیدگی‌های موجود در شبیه‌سازی تلفیقی منابع آب و ارائهٔ ساده و قابل فهم نتایج از روی‌کرد سیستم پویا استفاده شد. نتایج نشان داد که طراحی سیستماتیک انجام شده به‌کمک مدل پویا علاوه بر مدل‌سازی عوامل پویای حاکم بر مساله، قادر است به‌عنوان سیستمی تصمیم‌یار امکان بررسی وضعیت آب‌خوان تحت شرایط مختلف عوامل تغذیه و تخلیه‌ای به‌کار آید. بیلان آب‌خوان دشت تبریز در حال حاضر منفی است. بنا بر این در برداشت از آب‌خوان محدودیت وجود دارد. در این تحقیق میزان آب قابل تجدید به‌عنوان حد مجاز برداشت برای جبران بیلان منفی آب‌خوان تعریف شده است. چون آب‌خوان به‌صورت پویا شبیه‌سازی شده است، سطح ایستابی به‌طور پویا همزمان با تغییر میزان آب ورودی و خروجی، تغییر می‌کند و مدل شبیه‌سازی شده مقدار آب قابل استحصال از آب‌خوان را در طی گام‌های زمانی دل‌خواه به‌دست می‌دهد. هم‌چنین به‌طور همزمان نوسانات سطح ایستابی در آب‌خوان به‌صورت گرافیکی نمایش داده می‌شود. برای دورهٔ مدل‌سازی حداکثر میزان برداشت از آب‌خوان بدون تحمیل هیچ خسارتی به آن و نبود محدودیت افت سطح آب زیرزمینی، از ۲۶/۴۰ تا ۹/۷ میلیون مترمکعب در ماه در نوسان است. حداقل مجاز تراز سطح ایستابی آب‌خوان طی این دوره نیز به‌طور متوسط ۱۳۱۷/۳۵ متر است. اجرای سناریوی افزایش بازده کشاورزی، توسعهٔ شبکه جمع‌آوری فاضلاب و افزایش تخصیص از آب سطحی به‌ترتیب سبب افزایش، کاهش و افزایش ذخیره آب‌خوان می‌شود که تأثیر توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب در تغییر ذخیره آب‌خوان با توجه به میزان قابل توجه آن از دومورد دیگر بیش‌تر است.

با توجه به نوسانات شدید آب‌دهی رودخانه، افزایش تخصیص از آن در مصرف کشاورزی تأثیر چندانی در تغییرات ذخیره آب‌خوان و سطح آب زیرزمینی ندارد.

افزایش جمعیت با افزایش تقاضای آب و افزایش میزان فاضلاب تولیدی همراه است. از طرفی با توسعه صنعت توجه به‌سمت تصفیه فاضلاب معطوف می‌شود و ظرفیت تصفیه‌خانه افزایش می‌یابد. با افزایش ۴۵ درصدی ظرفیت تصفیه‌خانه (توسعهٔ شبکهٔ جمع‌آوری فاضلاب) نسبت به شرایط فعلی، برای جلوگیری از کاهش ذخیره آب‌خوان باید روی‌کرد افزایش تخصیص از آب سطحی به‌میزان دو مترمکعب در ثانیه و افزایش ۱۶ درصدی بازده کشاورزی و اجرای طرح تغذیه مصنوعی را در پیش گرفت. در صورت وقوع پدیده خشکسالی و کاهش نزولات جوی به‌میزان بیش از ۵۰ درصد فعلی، اعمال سیاست افزایش ۱۶ درصدی بازده کشاورزی و افزایش دو مترمکعب بر ثانیه تخصیص از آب سطحی، قادر به جلوگیری از کاهش ذخیره و افت سطح آب در آب‌خوان نخواهد بود و ذخیرهٔ آب‌خوان کاهش خواهد یافت. بنا بر این در این حالت باید بازده آبیاری افزایش یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

منابع

۱. ش. پایمزد، س. مرید، م. مقدسی، *برنامه‌ریزی غیرخطی و سیستم‌های پویا در تخصیص آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده رود)*، مجلهٔ آبیاری و زهکشی ایران (۱۳۸۹).

۲. شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، *گزارش نیازهای آبی دشت تبریز* (۱۳۹۰).

۳. شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، *گزارش هیدروژئولوژی دشت تبریز* (۱۳۸۸).

۴. ع. صدیقی،ع. کبیری جهان‌آبادی، د. عرب، *مدل‌سازی دنیای پیچیده در حال تغییر با استفاده از نگرش پویایی سیستم‌ها*، مؤسسهٔ پژوهشی مهندسی راهبرد دانش پویا (۱۳۸۷).

۵. ع. صلوی‌تبار، ر. بندری، خ. حسنی، م. احتیاط، *شبیه‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی*؛ مطالعهٔ موردی:حوضهٔ آب‌ریز رودخانهٔ هراز، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران (۱۳۹۰).

۶. م. عاشوری، *شبیه‌سازی مدیریت منابع آب دشت خوی به‌روش سیستم پویا و با استفاده از نرم‌افزار Vensim*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۹).

۷. س. گلیان، ا. ابریشمچی، م. تجریشی، *تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضهٔ آب‌ریز با روش پویایی سیستم*، مجله آب و فاضلاب (۱۳۸۶).

۸. ح. ر. ناصری، س. احمدی، ع. صلوی‌تبار، *مدل‌سازی بهره‌برداری از منابع آب پایاب سد شهرچای ارومیه با استفاده از نرم‌افزار و Vensim*، نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران (۱۳۸۹).

9. J . W. Forrester, "Urban Dynamics, Cambridge", Massachusetts, M. I. T. Press, (1969).

10. W. J. Labadie, "Optimal Operation of Multi-Reservoir Systems: State of the Art Review", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 130 (2004) 93-111.

11. M. M. Rashid, F. D. Hayes, "Dynamic Programming Methodology for Prioritizing Sewerage Projects", Journal of Water Resources Planning and Management, 137 (2011) 193-204.

12. P. S. Simonovic, "Managing Water Resources, Methods and Tools for a Systems Approach", UNESCO Publication, Paris, (2009).

13. J. D. Sterman, "Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world", McGrow-Hill, Boston, (2000).

14. Ventana systems Inc., "Ventana Simulation Environment, Vensim; Users Guid, Version 5", (2007).

15. I. Winz, G. Brierley, S. Throwsdale, "The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources management", Journal of Water Resource Manage, 23 (2008) 1301-1323.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]