

مدل سازی منابع آب در حوضه آبریز با استفاده از روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)

علی میثاقی^۱، کامران داوری^۲، بیژن قهرمان^۳ و سید مجید هاشمی نیا^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی کشاورزی- آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

L_misaghi@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استاد دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- مربی دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۲۰

چکیده

در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه آبریز، اندرکنش اجزای درونی هر سیستم و نیز اندرکنش سیستم‌های مختلف با یکدیگر باید به طور فراگیر در نظر گرفته شوند. تحقیق حاضر در حوضه آبریز نیشابور و با تأکید بر حل مسأله روند افت سالیانه تراز آبخوان در این دشت انجام گرفته است. به منظور کنترل تراز آبخوان، گام‌های مدل‌سازی توسعه داده شدند و ریشه‌های مسأله در فرآیند شکل‌گیری نمودار ذخیره- جریان مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نرم افزار Vensim اثر هر یک از متغیرها، روی مسأله شبیه‌سازی شده و اعتبار مدل به روش‌های مختلفی چون تحلیل حساسیت، آزمون‌های آماری و غیره مورد سنجش قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که مدل تطابق خوبی با واقعیت داشته و رفتار مدل مطابق با رفتار سیستم در واقعیت است. به طوری که بر اساس آزمون‌های آماری انجام شده بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر برآورد شده افت و خیز سطح آبخوان توسط مدل، میزان ضریب تعیین برابر $0/8$ و میزان ریشه میانگین مربعات خطا برابر $0/21$ گردید. همچنین آزمون‌های مختلف دیگری انجام گردید که نتایج آن‌ها، صحه‌ای بر تأیید مدل شبیه‌سازی شده می‌باشند. در نهایت سیاست‌هایی مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا شد.

کلید واژه ها: توسعه پایدار، پویایی سیستم، Vensim، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی، حوضه آبریز.

Modeling Water Resources in Using the dynamic system method Case study: Nishabur watershed

A. misaghi¹, K. Davari², B. Ghahraman³, S. M. Hashemi Nia⁴

1- Former M.s. Student, Agricultural Engineering, Irrigation and Drainage, Agricultural Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Associate Professor, Agricultural Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

3- Professor, Agricultural Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

4- M.Sc. Member of Agricultural Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

Received: 10 Dec. 2012

Accepted: 22 Oct. 2013

Abstract

In The comprehensive management of water resources in the basin level, the interaction of components within the system and the interaction of different systems should be considered comprehensively. This Study levels has been done in the basin of neyshabour, with an emphasis on problem solving of process decline annual in groundwater in this plain. To control the level of the aquifer, the modeling steps were developed and roots of problem examined in the formation process of flow- storage diagram. By using Vensim software, effect of each variable on the simulated problem and validity of the model were examined via different methods such as sensitivity analysis, statistical tests, etc. Results of tests show that

the model has a good accordance with reality and behavior of model has accordance with reality. According to The statistical tests between the observed values and estimated values of rise and fall aquifer level via model, the coefficient of determination equal to 0.8 and root of the mean square error was 0.21. Different tests were also carried out that results confirmed the simulated model. Finally, policies was implemented based on the proposed scenarios by model.

Keyword: Sustainable development, System dynamics, Vensim, Water resources management, Modeling, Basin

مقدمه

Vensim اثر هر یک از متغیرها روی مسأله شبیه سازی شده و در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل، راهکارهایی برای حل مسأله موجود ارائه دادند (۳). سیمونویچ و همکاران^۱ از روش تحلیل پویایی سیستم برای ارزیابی دراز مدت منابع آبی و تحلیل سیاست‌های اعمالی در حوضه رودخانه نیل در مصر استفاده کردند (۱۳). احمد و سیمونویچ^۲ با استفاده از روش پویایی سیستم، بهره برداری از یک مخزن را برای سال پرآبی و چند سیلاب رخ داده بررسی و رفتار مخزن را در برابر سیلاب بررسی کردند (۶). سیمونویچ مدلی برای تحلیل بیان آب در مقیاس جهانی در ارتباط با پنج بخش صنعت، جمعیت، کشاورزی، منابع تجدید ناپذیر و آلودگی ارائه کردند که Worldwater نام داشت (۱۱). سیمونویچ با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها توانستند روابط بین کمیت و کیفیت آب در کشور کانادا را در رابطه با متغیرهای اصلی اجتماعی-اقتصادی شبیه‌سازی نمایند (۱۲). اورز^۳ برنامه‌ای را برای تخصیص بهینه آب در حوزه آبریز سان جوان در کشور مکزیک با رویکرد پویایی سیستم‌ها ارائه کرد (۷). لیو و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۵ تحقیقی را در رابطه با مدیریت پایدار آب آبیاری در حوزه آبریز رودخانه زرد با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها انجام دادند که در آن به مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در پایین دست رودخانه زرد پرداختند و سیاست‌هایی نیز در این مورد ارائه دادند (۱۰). بنابراین پایش کلیه محرک‌های بیرونی بخش آب برای مدیریت کارای منابع آب امری الزامی است. هدف از این تحقیق این است که با شبیه سازی سیستم عرضه و تقاضای آب در حوضه آبریز نیشابور متکی به روش پویایی سیستم‌ها که روشی مبتنی بر تفکر سیستمیک است، راهکارهایی در جهت بهبود وضعیت منابع آبی منطقه و نیز تا حدی کمک به خروج از وضعیت بحرانی کنونی اتخاذ نماید. نکته قابل توجه این است که تاکنون تحقیقی به این صورت با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها و با در نظر گرفتن کلیه منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی و تمامی مصارف مربوط به آن و همچنین روابط و بازخورهای بین مصارف و منابع مذکور انجام نگرفته است و تحقیقات صورت گرفته تاکنون صرفاً بخشی از حوضه‌های آبریز و یا بخشی از منابع و مصارف را در نظر گرفته اند.

تاکنون روش‌های مختلفی از جمله برنامه‌ریزی خطی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بکار رفته است، اما یک امتیاز بزرگ برای مدل‌های پویایی سیستم‌ها این است که در آن مدل سیستم به صورت جعبه سفید (به معنای آن که روابط علی بین اجزاء توضیح داده می شود) تهیه می‌شود، در مقابل مدل‌های ریاضی که معمولاً جعبه سیاهی (روابط ریاضی و آماری بین متغیرها بدون توضیح ساختار رفتاری) از مسأله را ارائه می‌دهند. بعضی از دانشمندان علوم مهندسی که دارای تفکر ریاضی بودند، با اعتقاد به کمبود مدل‌های ریاضی جهت تولید شاخص‌ها و ارزیابی پروژه‌ها به جهت تعیین پایداری و کارایی سیستم‌ها، پیشنهاد کردند که مطالعات برای تولید مدل‌هایی جهت انتخاب بهترین جواب در فرآیندهای تصمیم‌گیری توسعه یابد (۸). در اکثر مطالعات توسعه پایدار، تنها به یکی از اجزای مدیریت جهت نیاز به حصول پایداری در سیستم پرداخته اند (۹)، اما در نگرش بهم‌پیوسته که محصول پارادایم کل نگر می باشد، بر مقوله‌ای به نام اثر بخشی استراتژی‌ها، قوانین و برنامه ریزی‌ها در سیستم‌ها در دراز مدت توجه می‌نماید. پویایی شناسی سیستم، دیدگاه و مجموعه‌ای از ابزارهای مفهومی است که ما را قادر به فهم ساختار و پویایی سیستم‌های پیچیده می‌کند (۴). این نوع سیستم‌ها به طبقه‌ای از سیستم‌ها تعلق دارند که سیستم‌های دارای بازخوردهای غیر خطی و چند حلقه‌ای نامیده می‌شوند (۲).

در حوضه آبریز نیشابور با توجه به افت شدید سطح آب آبخوان طی سال‌های اخیر و بحران آبی شکل گرفته، اگر تدبیری اندیشیده نشود فاجعه‌ای عمیق اتفاق خواهد افتاد، لذا نیاز شدید به یک مدل پویا از منابع آب در این حوضه آبریز احساس می‌شود که یکی از راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار در این دشت این است که مقدار مصارف آب کمتر از آب تجدیدپذیر واقعی در حوضه باشد. از این منظر در این تحقیق به بررسی مسائل بیرونی و درونی بخش آب که دخیل بر منابع آبی دشت نیشابور می‌باشند، و نیز ارائه راهکارهایی اثربخش پرداخته شده است.

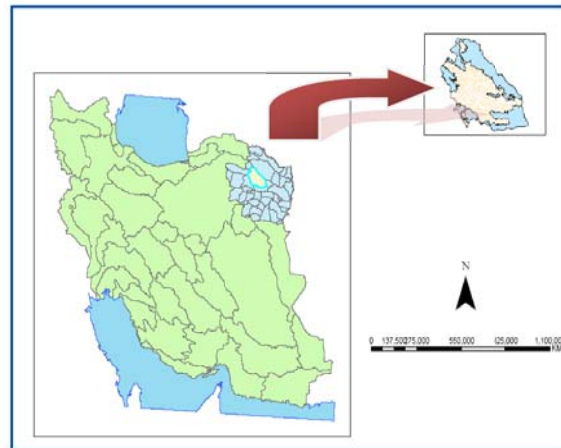
حسینی با استخراج کلیه فرآیندهای دخیل در سیستم منابع آب دشت مشهد همانند فرآیندهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی با توجه به پارادایم پایداری سیستمیک زیستوم، به بررسی روندها و تحلیل مشکلات و شناسایی مسائل کلیدی در سیستم منابع آب دشت مشهد با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها پرداخت (۱). قشقایی و همکاران طی تحقیقی ریشه‌های مسأله بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در جنوب دشت تهران را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از نرم افزار

1- Simonovic et al.

2 - Ahmad and Simonovic

3 - Ewers

4- Lue et al.



شکل ۱- موقعیت حوضه نیشابور در استان خراسان رضوی و کشور ایران

جدول ۱- مجموع تخلیه از آب های زیرزمینی در دشت نیشابور

سال	مجموع تخلیه سالیانه از چاه، چشمه و قنات (میلیون متر مکعب)
۱۳۴۷	۳۰۴
۱۳۶۰	۵۱۳
۱۳۶۵	۷۷۴
۱۳۷۲	۸۸۵
۱۳۷۸	۸۳۷/۶
۱۳۸۱	۸۰۶/۸

پویایی سیستم

پویایی سیستم‌ها^۱ روشی برای مطالعه و مدیریت سیستم‌های پیچیده و دارای بازخورد است. شبیه‌سازی^۲ سیستم معمولاً منجر به درک جدیدی از ساختار و رفتار سیستم می‌شود که در دور بعدی امکان تهیه مدل‌های کامل‌تری را فراهم می‌سازد. همچنین مدل‌های پویایی سیستم‌ها امکان وارد کردن متغیرهای کیفی و کمی را به طور همزمان در سیستم فراهم می‌کند. این امتیاز مهمی است که در مدل‌های ریاضی پیاده‌سازی آن بسیار مشکل است (۸). بازخورد یکی از مفاهیم اصلی پویایی شناسی سیستم به شمار می‌رود. انباشت‌ها و جریان‌ها به همراه بازخورد دو مفهوم اصلی در تئوری سیستم‌های پویا به شمار می‌آیند (۹). برای درک بهتر از رفتار سیستم لازم است روابط بین متغیرهای سیستم تدوین شده و با استفاده از کامپیوتر، مقدار متغیر در طول زمان شبیه‌سازی شود. یکی از نرم افزارهای معتبر و مرسوم برای مدل سازی پویایی سیستم نرم افزار Vensim^۳ است که برای کمک به درک فرآیندهای پیچیده و پویایی سیستم طراحی شده است. در محیط گرافیکی این ابزار می‌توان به آسانی مولفه‌های فیزیکی یا مفهومی مدل را تعریف نموده و روابط بین اجزا را مشخص کرد.

مواد و روش‌ها

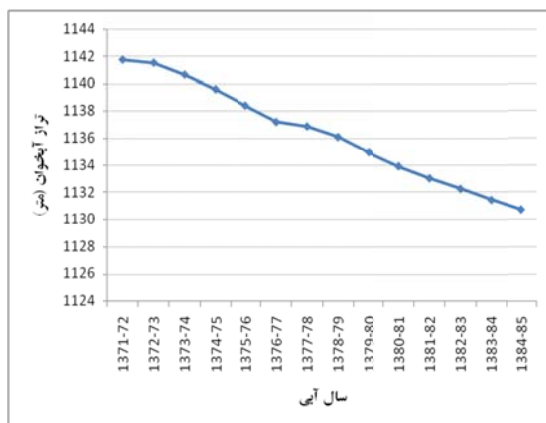
موقعیت منطقه مورد مطالعه و وضعیت عمومی و فیزیکی منطقه

حوضه آبریز نیشابور جزئی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران بوده و در سمت غرب آن قرار می‌گیرد. موقعیت حوضه آبریز نیشابور نسبت به حوضه‌های آبریز کشور در شکل (۱) نشان داده شده است. وسعت این محدوده ۷۲۹۳ کیلومترمربع می‌باشد. از مساحت کل محدوده مطالعاتی نیشابور، ۳۸۹۱/۵ کیلومتر مربع آن دشت و ۳۴۰۱/۵ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. بررسی‌های زمین شناسی نشان می‌دهد که دشت نیشابور حوضه فرو افتاده‌ای است که از رسوبات آبرفتی حمل شده از ارتفاعات شمالی انباشته شده و آبخوان نسبتاً غنی را در خود جای داده است. تغییرات ضریب ذخیره در حدود کمتر از ۱۰ درصد تعیین شده است که به طور میانگین با توجه به تغییرات لیتولوژیکی سفره در محدوده مخروط افکنه‌های شمالی ۱۳ درصد، در محدوده مرکزی دشت ۶ درصد و در سایر مناطق ۸/۵ درصد برآورد گردیده است (۳). همچنین در جدول (۱) مجموع تخلیه از آب‌های زیرزمینی در این دشت آورده شده است.

1- System Dynamics

2- Simulation

3-The Ventana Simulation Environment



شکل ۲- روند افت تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت نیشابور

است: ۱- مدل منابع آب های سطحی ۲- مدل منابع آب های زیرزمینی ۳- مدل مصارف مختلف.

توسعه مدل

مدل سازی زیرسیستم منابع آب های سطحی

الف- مدل سازی روابط فیزیکی متغیرهای تغذیه بیلان آب های سطحی حوضه آبریز

با داشتن مساحت کوهستانی حوضه آبریز و با ضرب آن در متوسط بارش سالیانه در کوهستان، میزان حجم بارش روی کوهستان به دست آمد. با محاسبه میزان رواناب کل حوضه و اعمال ضریب رواناب کوهستان، حجم رواناب کوهستان نیز به دست آمد. حجم رواناب تولیدی در دشت نیز به همین صورت محاسبه گردید.

ب- مدل سازی روابط فیزیکی متغیرهای تخلیه بیلان

آب های سطحی حوضه آبریز

عوامل تخلیه منابع آب های سطحی در یک حوضه آبریز عبارتند از رواناب خروجی از حوضه و مقدار آب بهره برداری شده از منابع آب های سطحی (نحوه مدل سازی در شکل ۳ نشان داده شده است).

مدل سازی زیرسیستم منابع آب های زیرزمینی

الف- مدل سازی روابط فیزیکی متغیرهای تغذیه آبخوان دشت

متغیرهای تغذیه آبخوان دشت عبارتند از: میزان نفوذ از بارش سالیانه به آبخوان دشت، میزان نفوذ از رواناب سطحی سالیانه ورودی به دشت، میزان ورودی آب زیرزمینی به آبخوان دشت و میزان آب برگشتی به آبخوان از برداشت سالیانه در دشت.

در واقع این نرم افزار، به عنوان یک زبان شبیه سازی، نرم افزاری قدرتمند و کنشگر با محیط است که امکان توسعه مدل های شبیه سازی را فراهم می سازد. در یک سیر تاریخی پس از ارایه نرم افزارهایی چون Stella, Dynamo، و ...، Vensim به منظور افزایش سرعت ساخت و توسعه مدل ها و همچنین افزایش کیفیت مدل های ساخته شده، ایجاد شد. لذا در این تحقیق برای شبیه سازی مدل سیستم منابع و مصارف آب در حوضه آبریز نیشابور از نرم افزار Vensim استفاده گردید.

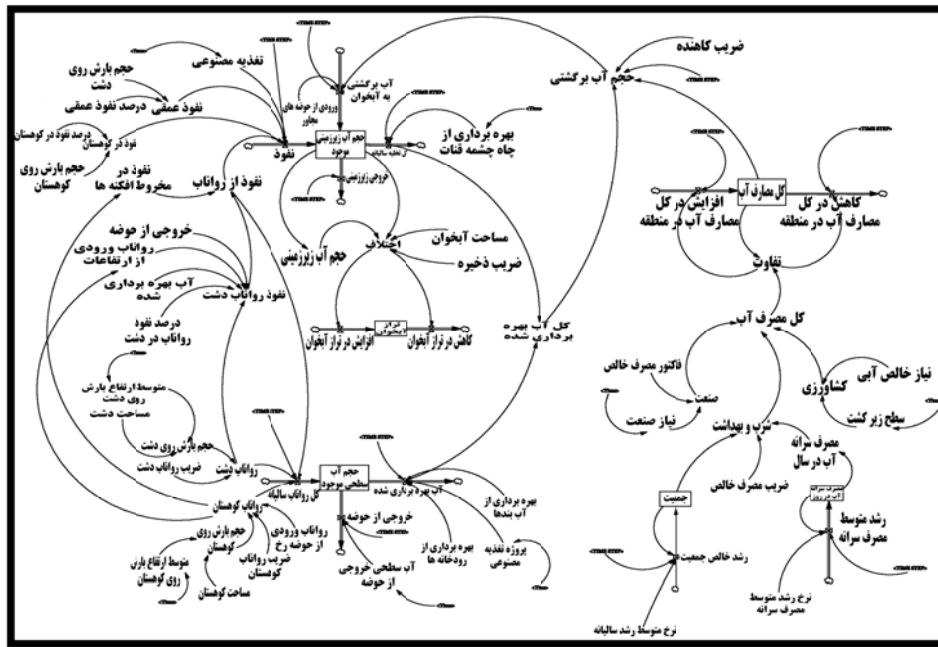
هیدروگراف واحد تراز آب زیرزمینی دشت

نمودار تراز آب آبخوان در دشت نیشابور یکی از مهمترین اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق می باشد که تغییرات آن طی سال های ۱۳۷۱ الی ۱۳۸۴ در شکل (۲) نشان داده شده است (۵).

هیدروگراف واحد تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در دشت نیشابور، پس از ساختن مدل سیستم منابع و مصارف آب در محیط نرم افزار Vensim و واسنجی و اعتبارسنجی آن توسط آزمون های مختلف و تأیید مدل ساخته شده مبنی بر نزدیک بودن آن با داده های مشاهده ای به دست آمد.

مدل سازی^۱

بر اساس روش مورد نظر یعنی پویایی سیستم ها، مدل سازی مکانیزم های حاکم در سیستم منابع و مصارف آب به صورت تکوینی و گام به گام انجام گرفت. بدین صورت که سه زیرسیستم جهت مدل سازی در نظر گرفته شد و مدل سازی مبتنی بر رفتار "مرجع اصلی" که همان "افت و خیز تراز آبخوان" می باشد، صورت گرفت. این مدل از سه مدل به صورت زیر تشکیل شده



شکل ۳- شمایی کلی از مدل منابع و مصارف آب در حوضه آبریز نیشابور

صحت‌سنجی مدل

به طور واضح هیچ مدلی وجود ندارد که کاملاً مورد اطمینان باشد. زیرا هر مدلی نواقصی نسبت به سیستم واقعی خواهد داشت. برای این منظور، آزمون‌های مختلفی همچون مقایسه رفتار خروجی مدل با رفتار مشاهده شده مسأله، آزمون‌های آماری و غیره وجود دارد. در آزمون‌های آماری ابتدا اقدام به ترسیم داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی نموده، سپس با استفاده از ابزارهای آماری ضریب تبیین و میانگین مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا، به بررسی رفتار مدل با واقعیت پرداخته می‌شود.

تحلیل حساسیت

می‌توان اثر متغیرهایی که دارای عدم قطعیت هستند را بر روی تغییرات متغیرهای مرجع مورد بررسی قرار داده و اثر بازخوردی هر کدام از آنها را بر روی متغیرهای مرجع مشاهده نمود. پس از کامل شدن مدل منابع و مصارف آب در حوضه آبریز، آزمون مدل، برای اطمینان از عملکرد صحیح مدل نیز انجام پذیرفت.

سناریوسازی

سناریوهای محیطی اعمال شده در مدل

برای این که تأثیر شرایط موجود و اعمال سیاست‌ها در طولانی-مدت و در طی سال‌های آتی در سیستم مورد نظر مشخص شود، مدل برای سال‌های ۱۳۷۱ الی ۱۴۰۹ اجرا شد. لذا در این تحقیق با فرض تغییراتی در شرایط محیطی، سه سناریوی محیطی تحت شرایط تکرار سری تاریخی در نظر گرفته شده، ترسالی و خشکسالی در نظر گرفته شد.

ب- مدل سازی روابط فیزیکی متغیرهای تخلیه آب زیرزمینی

متغیرهای تخلیه آب زیرزمینی عبارتند از: تبخیر و تعرق، حجم آب زیرزمینی خروجی، حجم زهکشی آبخوان و حجم بهره برداری سالیانه.

مدل‌سازی زیرسیستم مصارف مختلف

مصارف مختلف در دشت عبارتند از: مصارف کشاورزی، مصارف شرب و بهداشتی و مصارف صنعتی.

فرض‌های لحاظ شده در مدل

- ۱- کاهش منابع آب زیرزمینی به واسطه برداشت از آن بر اساس میزان تقاضای در نظر گرفته شده می‌باشد و از برداشت‌های احتمالی غیر مجاز و سایر موارد چشم پوشی شده است. ۲- از وارد کردن متغیرهای کیفی در مدل عرضه و تقاضای آب چشم پوشی شد. ۳- مسائل و فعالیت‌های اقتصادی در مدل نیز لحاظ نشده است، زیرا هدف فقط مدل سازی آن چیزی بود که در سیستم واقعی عرضه و تقاضای آب در حوضه آبریز نیشابور رخ می‌دهد و در حال حاضر نیز هیچ‌گونه سیاست اقتصادی برای تقاضای آب در منطقه وجود ندارد. ۴- دوره سری زمانی شرایط گذشته در مدل‌سازی به مدت ۱۴ سال، یعنی از سال آبی ۷۲-۱۳۷۱ تا سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ فرض گردیده است. ۵- اثر میزان تراز آب زیرزمینی و نیز مقدار بارش بر میزان آب ورودی به دشت و خروجی از آن در نظر گرفته نشده است، یعنی مقدار آب زیرزمینی ورودی سالیانه به دشت و خروجی از آن به صورت ثابت در مدل در نظر گرفته شده است. ۶- اثر کاهش سطح آبخوان به علت پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در مدل لحاظ نشده و لذا مساحت آبخوان ثابت فرض شده است.

جدول ۲- مقادیر اولیه متغیرهای حالت در مدل منابع و مصارف آب در حوضه آبریز نیشابور در سال پایه شبیه‌سازی (۱۳۷۱)

مقدار اولیه	متغیر
۲۵/۲۱۹	حجم آب سطحی موجود (میلیون مترمکعب)
۳۴۲۷۱/۷۵	حجم آب زیرزمینی موجود (میلیون مترمکعب)
۸۷۸/۲۳۷	کل آب بهره‌برداری شده (میلیون مترمکعب)
۴۱۰/۹۱۸	کل مصارف آب (میلیون مترمکعب)
۳۷۱۰۲۰	جمعیت (نفر)
۱۹۵	مصرف سرانه آب در روز (لیتر در شبانه روز)

جدول ۳- مقادیر ثابت در مدل منابع و مصارف آب حوضه آبریز نیشابور

مقدار اولیه	متغیر
۰/۰۵۷	ضریب رواناب دشت
۰/۳۱۳۸	ضریب رواناب کوهستان
۰/۵	درصد نفوذ رواناب در دشت
۰/۰۳۶	درصد نفوذ در کوهستان
۰/۱۴۳	درصد نفوذ عمقی
۰/۰۱۰۵	نرخ متوسط رشد سالانه
۰/۰۰۶	نرخ رشد متوسط مصرف سرانه
۰/۱۵	ضریب مصرف خالص

سیاست های اتخاذ شده در مدل

در این تحقیق پارامترهای برون زای در نظر گرفته شده در این بخش شامل میزان آب بهره برداری شده (سطحی و زیرزمینی) و نیز مصارف کشاورزی با رویکرد نیل به توسعه پایدار منابع آب، اثر خود را بر مدل وارد می‌نماید. لازم به ذکر است که برای نیل به این هدف، از یکی از شاخص‌های سنجش پایداری منابع آب به نام نسبت "آب مصرفی به آب تجدید پذیر واقعی" بهره گرفته شد. همچنین برای هر یک از سناریوهای محیطی پنج سیاست در نظر گرفته شد. با توجه به پارامترهای بیان شده، در نهایت ۱۵ بسته سیاستی جهت اعمال در مدل تولید گردید.

نتایج و بحث

پس از اتمام هر سه زیر مدول در نظر گرفته شده برای مدل-سازی منابع و مصارف آب در حوضه آبریز، شکل (۳) شمایی کامل از مدل منابع و مصارف مختلف در حوضه آبریز نیشابور می‌باشد.

مقادیر اولیه متغیرهای حالت در مدل منابع و مصارف آب حوضه آبریز نیشابور

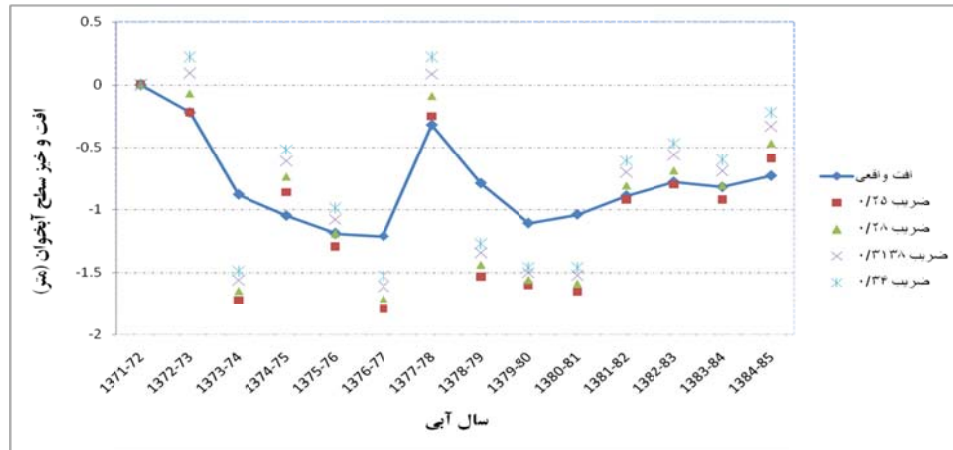
مقادیر اولیه متغیرهای حالت در مدل در سال شبیه سازی شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

برای به دست آوردن مقدار متغیر حجم آب سطحی موجود در سال اول شبیه سازی، با داشتن مقدار کل رواناب و کسر مقادیر آب سطحی بهره برداری شده و میزان رواناب خروجی از ایستگاه حسین آباد جنگل در سال پایه، این مقدار برابر با ۲۵/۲۱۹ میلیون

متر مکعب برآورد شد. با داشتن مقدار حجم آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۷ و در نظر گرفتن اثر تغییرات حجم آب زیرزمینی در سال‌های قبل از ۱۳۸۷ در حجم آب زیرزمینی، در سال پایه میزان حجم آب زیرزمینی برابر با ۳۴۲۷۱/۷۵ میلیون متر مکعب به دست آمد. برای تولید متغیر کل آب بهره برداری شده در مدل، با جمع مقادیر آب های بهره برداری شده از آب های سطحی و زیرزمینی، مقدار ۸۷۸/۲۳۷ میلیون متر مکعب به دست آمد. برای تولید متغیر کل مصارف آب با داشتن مصارف کشاورزی و با اختیار داشتن مصارف شرب و بهداشت و صنعت و با جمع آنها در سال پایه، مقدار این متغیر در سال پایه برابر ۴۱۰/۹۱۸ میلیون متر مکعب برآورد شد. با نرخ متوسط رشد سالانه جمعیت در حوضه آبریز نیشابور و با داشتن آمار جمعیت در سال ۱۳۷۵ از مرکز آمار ایران، مقدار متغیر جمعیت در سال اول شبیه‌سازی برابر ۳۷۱۰۲۰ نفر محاسبه شد. متغیر مصرف سرانه آب در روز نیز با توجه به نرخ رشد متوسط مصرف سرانه و میزان متوسط مصرف سرانه در سال ۱۳۷۷، برابر ۱۹۵ لیتر در روز در سال پایه محاسبه گردید.

مقادیر ثابت در مدل منابع و مصارف آب در حوضه آبریز نیشابور

تمامی ضرایب به دست آمده در جدول (۳)، بر اساس واسنجی مدل طی تکرارهای مختلف و صحت سنجی آن با آزمون های مختلف مبنی بر مقایسه نتایج به دست آمده از مدل شبیه سازی شده با آمار مشاهده ای موجود در واقعیت به دست آمده است.



شکل ۴- نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیر ضریب رواناب کوهستان

جدول ۴- آزمون‌های آماری برای مقایسه افت و خیز تراز آبخوان بین مقادیر مشاهده‌ای و نتایج مدل با تأخیر نفوذهای مختلف

حالت‌های مختلف	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	متوسط قدرمطلق خطا	ریشه میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطای نسبی
۱- یک سال تأخیر برای نفوذ عمقی	۰/۸۸۵	۰/۷۸۴	۰/۲۰۵	۰/۲۵۲	۰/۳۲۱
۲- بدون تأخیر برای نفوذها	۰/۸۱۱	۰/۶۵۸	۰/۷۹۴	۰/۸۸۶	۱/۱۲۶
۳- یک سال تأخیر برای نفوذ کل	۰/۵۶۵	۰/۳۲	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۶۱۱
۴- یک سال تأخیر برای نفوذ عمقی و رواناب	۰/۶۱۸	۰/۳۸۱	۰/۳۵	۰/۴۳۴	۰/۵۵۲
۵- یک سال تأخیر برای نفوذ عمقی و نیم‌سال برای نفوذ رواناب	۰/۶۰۴	۰/۳۶۵	۰/۵۰۸	۰/۷۲۴	۰/۹۲

جدول ۵- نتایج آزمون‌های آماری تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیر ضریب رواناب کوهستان

مقدار	ضریب تعیین	متوسط قدرمطلق خطا	ریشه میانگین مربعات خطا
۰/۲۵	۰/۸۳	۰/۲۲	۰/۲۹
۰/۲۸	۰/۸۸	۰/۱۸	۰/۲۴
۰/۳۱۳۸	۰/۸	۰/۱۶	۰/۲۱
۰/۳۴	۰/۷۸	۰/۱۷	۰/۲۳

یک سال تأخیر فقط برای نفوذ عمقی (نفوذ حاصل از بارش) می باشد که در ادامه همین حالت برای شبیه‌سازی مد نظر قرار گرفت.

تحلیل حساسیت

انجام تحلیل حساسیت نشان داد که متغیرهای ضریب رواناب کوهستان، درصد نفوذ رواناب در دشت و ضریب رواناب دشت به ترتیب دارای حساسیت بالایی می باشند و متغیرهای درصد نفوذ در کوهستان، نفوذ در مخروط افکنه ها و ضریب نفوذ عمقی به ترتیب دارای درجه حساسیت متوسط بوده و متغیرهای مصرف خالص شرب و بهداشت و فاکتور مصرف خالص صنعت به ترتیب دارای حساسیت کمی می‌باشند. لازم به ذکر است که آزمون‌های آماری بین مقادیر مختلف هر یک از متغیرها نیز انجام شده و بهترین مقدار برای هر

صحت سنجی مدل

آزمون‌های تأخیر

لازم به ذکر است که هر یک از متغیرهای نفوذ به آبخوان که قبلاً ذکر شد، می توانند با کمی تأخیر در مدل در نظر گرفته شوند، بدین منظور با اجرای مدل تحت شرایط مختلف تأخیر، بهترین شرایط با تطابق آن ها با افت و خیز واقعی آبخوان تحت آزمون‌های آماری مختلف انتخاب گردید. در ادامه نتایج آزمون‌های آماری حاصل از تأخیرهای متفاوت- برای متغیرهای نفوذ موجود در مدل در جدول (۴) نشان داده شده است.

نتایج موجود در جدول فوق نشان می دهد که بهترین حالت برای در نظر گرفتن تأخیر در نفوذها در مدل ساخته شده، لحاظ کردن

مقدار ۰/۳۱۳۸، این مقدار برای ضریب رواناب کوهستان در مدل در نظر گرفته شد.

سناریوها و سیاست های اتخاذی

سناریو اول (تحت شرایط معمول بارش)

مراحل شبیه سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی اول در جدول شماره (۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هرکدام از مراحل به مدت پنج سال و از سال ۱۳۸۴ الی ۱۴۰۹ می باشد.

نتایج حاصل از اعمال این سناریو با سیاست های اجرا شده در آن، در شکل (۶) به نمایش در آمده است.

متغیر دارای عدم قطعیت به دست آورده شد. نمودار تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیر ضریب رواناب کوهستان به عنوان نمونه در شکل (۴) نشان داده شده است.

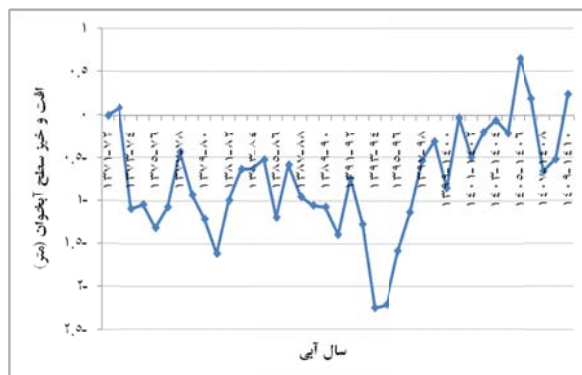
همان طور که از شکل پیداست هرچه ضریب رواناب کوهستان بیشتر می شود، میزان افت تراز سطح آبخوان کمتر از میزان واقعی برآورد و هرچه میزان آن کمتر شود، میزان افت بیشتر از حد واقعی برآورد

می گردد که این نشان دهنده تأثیر مستقیم میزان رواناب کوهستان بر آب های زیرزمینی می باشد.

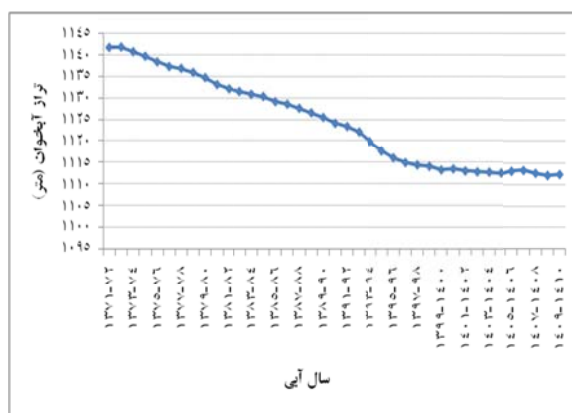
طبق جدول (۵)، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به مقدار ۰/۲۸ برای متغیر و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا متعلق به مقدار ۰/۳۱۳۸ می باشد. اما به دلیل متوسط قدرمطلق خطا کمتر برای

جدول ۶- مراحل شبیه سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی اول

وضعیت/ مرحله	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
ادامه وضع موجود	صورت می گیرد	-	-	-	-
توقف توسعه کنونی	-	توقف رشد افزایشی آب بهره برداری شده و نیز مصارف کشاورزی	-	-	-
بهره برداری از آب های زیرزمینی	-	-	کاهش ۲۵ درصدی	کاهش ۳۰ درصدی	کاهش ۳۰ درصدی
سطح زیرکشت و بالطبع مصارف کشاورزی	-	-	کاهش ۱۰ درصدی	کاهش ۲۰ درصدی	کاهش ۴۰ درصدی
میزان تخصیص آب در واحد سطح (مترمکعب در هکتار)	-	-	از ۳۶۰۰ به ۳۶۰۰	از ۳۶۰۰ به ۳۲۰۰	-
بهره برداری از آب های سطحی	-	-	افزایش ۳۰ درصدی	-	-
نسبت مصرف به آب تجدیدپذیر واقعی	-	۲/۲	۱	۰/۷	۰/۵



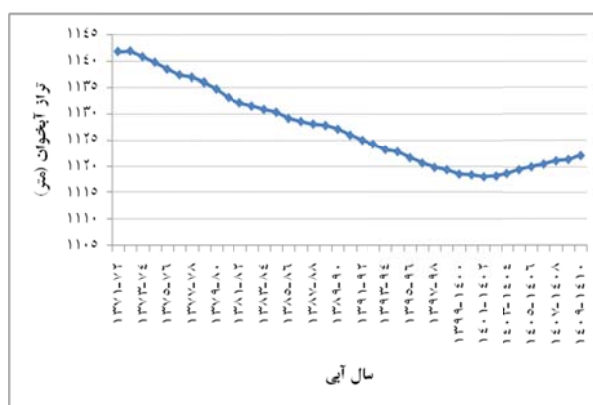
شکل ۶- الف) تراز آبخوان شبیه سازی شده دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی اول



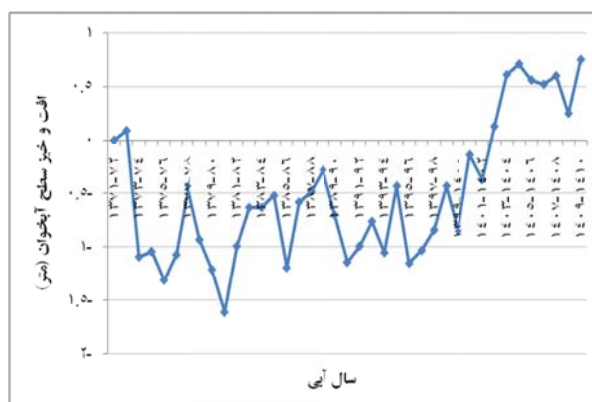
شکل ۶- ب) افت و خیز شبیه سازی شده آبخوان دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی اول

جدول ۷- مراحل شبیه سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی دوم

وضعیت/ مرحله	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
ادامه وضع موجود	صورت می گیرد	-	-	-	-
توقف توسعه کنونی	-	توقف رشد افزایشی آب بهره برداری شده و نیز مصارف کشاورزی	-	-	-
بهره برداری از آب های زیرزمینی سطح زیرکشت و بالطبع مصارف کشاورزی	-	-	کاهش ۱۳ درصدی	کاهش ۳۰ درصدی	کاهش ۲۵ درصدی
میزان تخصیص آب در واحد سطح (مترمکعب در هکتار)	-	-	کاهش ۱۰ درصدی	کاهش ۲۰ درصدی	کاهش ۳۵ درصدی
بهره برداری از آب های سطحی	-	-	-	از ۴۳۲۹/۳۶ به ۳۲۰۰	-
نسبت مصرف به آب تجدیدپذیر واقعی	-	۱/۶۳	افزایش ۳۰ درصدی	-	-
	-		۱	۰/۸	۰/۴



شکل ۷- الف) تراز آبخوان شبیه سازی شده دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی دوم



شکل ۷- ب) افت و خیز سطح آبخوان شبیه‌سازی شده دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی دوم

تحلیل سناریوی اول

نتایج حاصل از سناریوی اول نشان می‌دهد که اگر شرایط عادی بارش همانند سری تاریخی در نظر گرفته شده در مدل تا سال ۱۴۰۹ تکرار شود، و کاهش مصارف کشاورزی به حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب در سال و کاهش آب زیرزمینی بهره برداری شده به حدود ۲۸۰ میلیون متر مکعب در سال باشد، تنها می‌توان تراز آبخوان را طی سال‌های اخیر کنترل نموده و ثابت نگه داشت که با ادامه سیاست‌های موجود در سال‌های بعدی روند رو به افزایش سطح آبخوان وجود خواهد داشت. علت این موضوع این است که با بررسی دوره ۳۰ ساله بارش روی منطقه، متوجه خواهیم شد که دوره زمانی بارش در نظر گرفته شده در مدل (۸۴-۱۳۷۱) جزء سال‌های خشکسالی محسوب می‌شود.

سناریو دوم (تحت شرایط دوره ترسالی)

مراحل شبیه‌سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی دوم در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج حاصل از اعمال این سناریو با سیاست‌های اجرا شده در آن، در شکل (۷) به تصویر در آمده است.

تحلیل سناریوی دوم

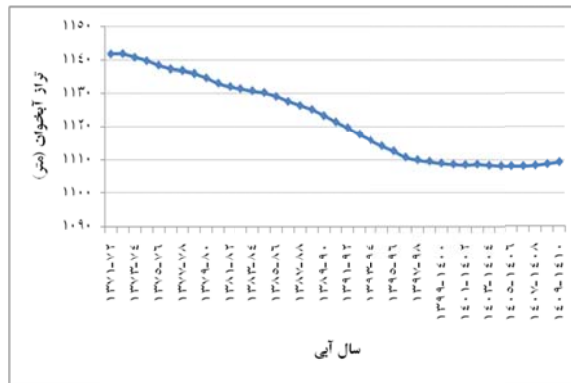
نتایج این سناریو نشان می‌دهد که اگر طی سال‌های ۱۳۸۴ الی ۱۴۰۹ شرایط ترسالی بارش وجود داشته باشد، با اعمال سیاست‌های بیان شده، به طوری که مصارف کشاورزی به حدود ۲۲۰ میلیون متر مکعب در سال و آب زیرزمینی بهره برداری شده به حدود ۳۵۰ میلیون متر مکعب در سال کاهش یابد، در سال‌های انتهایی دوره شبیه‌سازی افزایش چشمگیر سطح آبخوان وجود خواهد داشت، ضمن این که یکی از نمایه‌های توسعه پایدار منابع آب در دشت یعنی نسبت آب مصرفی به آب تجدید پذیر واقعی برابر ۰/۴ نیز خواهد شد.

سناریو سوم (تحت شرایط دوره خشکسالی)

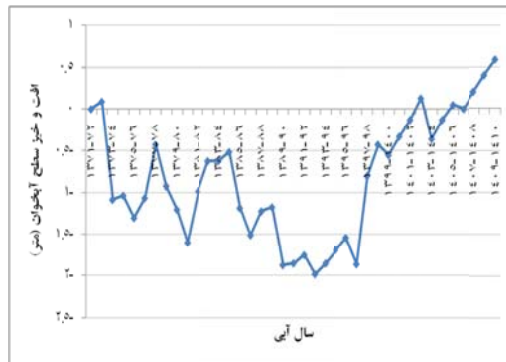
مراحل شبیه‌سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی سوم در جدول (۸) نشان داده شده است. نتایج حاصل از اعمال این سناریو با سیاست‌های اجرا شده در آن، در شکل (۸) به تصویر در آمده است.

جدول ۸- مراحل شبیه‌سازی مدل تحت سناریوی مدیریتی سوم

وضعیت/ مرحله	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
ادامه وضع موجود	صورت می‌گیرد	-	-	-	-
توقف توسعه کنونی	-	توقف رشد افزایشی آب بهره برداری شده و نیز مصارف کشاورزی	-	-	-
بهره برداری از آب‌های زیرزمینی	-	-	کاهش ۱۳ درصدی	کاهش ۳۰ درصدی	کاهش ۲۵ درصدی
سطح زیرکشت و بالطبع مصارف کشاورزی	-	-	کاهش ۱۰ درصدی	کاهش ۲۰ درصدی	کاهش ۳۵ درصدی
میزان تخصیص آب در واحد سطح (مترمکعب در هکتار)	-	-	-	از ۴۳۲۹/۳۶ به ۳۲۰۰	-
بهره برداری از آب‌های سطحی	-	-	افزایش ۳۰ درصدی	-	-
نسبت مصرف به آب تجدیدپذیر واقعی	-	۱/۶۳	۱	۰/۸	۰/۴



شکل ۸- الف) تراز آبخوان شبیه سازی شده دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی سوم



شکل ۸- ب) افت و خیز سطح آبخوان شبیه سازی شده دشت نیشابور تحت سناریوی مدیریتی سوم

گیرند. و دیگر این که روش بیان شده مختص به حوضه آبریز نیشابور نبوده و می‌توان با کمی تغییرات در حوضه‌های آبریز دیگر نیز مورد استفاده قرار داد.

همچنین نتایج حاصل از سناریوها در حوزه آبریز نیشابور نشان داد که حتی اگر میزان آب زیرزمینی بهره برداری شده و به تبع آن مصارف کشاورزی ثابت بمانند، باز هم افت تراز آبخوان دشت وجود خواهد داشت که علت آن بیشتر بودن آب مصرفی نسبت به آب تجدید پذیر واقعی تحت شرایط محیطی مختلف می باشد، لذا در حال حاضر بایستی توسط اجرای سیاست‌هایی به کاهش مصارف کشاورزی و نیز آب زیرزمینی استحصال شده توجه نمود. در صورتی که هر یک از شرایط محیطی طی سال‌های آینده تکرار شود، اگر آب زیرزمینی بهره برداری شده و نیز مصارف کشاورزی به حدود مقادیر تعیین شده نزدیک شوند، می‌توان شاهد بالا آمدن سطح آب آبخوان بود و از افت بیشتر آن جلوگیری نمود، ضمن آن که هدف توسعه پایدار منابع آب در منطقه نیز محقق خواهد شد. به عنوان راهکارهای مدیریتی با تغییر یک یا چند عامل می توان وضعیت کنونی را برای چندین سال آینده بهبود بخشید، به نحوی که مانع از رخ دادن این قبیل مشکلات باشد، می توان با اعمال سیاست های مختلف در مدل، شرایطی که در آینده رخ می دهد را

تحلیل سناریوی سوم

سناریوی سوم با در نظر گرفتن شرایط خشکسالی طی دوره شبیه سازی نشان داد که با کاهش مصارف کشاورزی به حدود ۱۳۰ میلیون متر مکعب در سال و کاهش آب زیرزمینی بهره برداری شده به حدود ۲۸۰ میلیون متر مکعب در سال، در انتهای دوره شبیه سازی افزایش سطح آبخوان را شاهد خواهیم بود، ضمن این که در راستای نیل به توسعه پایدار منابع آب در دشت حرکت خواهیم نمود.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از آزمون های مختلف نشان داد که مدل شبیه سازی شده رفتار و نتایج قابل قبولی را با واقعیت ارائه داد. از مزایای دیگر مدل این است که کلیه منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی و تمامی مصارف مربوط به آن و همچنین روابط و بازخورهای بین مصارف و منابع مذکور در حوزه آبریز لحاظ گردیده است. در این تحقیق متغیرهای بسیار زیادی به صورت سری زمانی با استفاده از شبیه‌سازی در حوضه مذکور، از جمله میزان تغذیه سالانه به آبخوان و یا میزان حجم آب برگشتی و غیره به دست آمدند که می‌توانند در دیگر تحقیقات مورد استفاده قرار

افت سالیانه کمتری در تراز آبخوان خواهیم بود. با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب در دشت نیشابور، و با در نظر گرفتن مبحث تجارت مجازی، توصیه می‌گردد که تغییر الگوی کشت از دائمی به فصلی صورت پذیرد تا شاهد بهبود منابع آب زیرزمینی در منطقه باشیم. از محدودیتهای مدل می‌توان به نبود یک زیر سیستم اقتصادی و نیز تبیین و ارزیابی مکانیزمهای اجتماعی اشاره نمود. همچنین برآورد دقیق از میزان آب ورودی و خروجی از آبخوان و نیز توسعه مدل با وارد کردن متغیرهای کیفی در صورت در اختیار داشتن آمار و اطلاعات دقیق بایستی مد نظر قرار گیرد.

پیش بینی، راهکارهای بالقوه را بررسی و در مورد نحوه اعمال سیاست های اثربخش تصمیم گیری نمود. توجه به موارد زیر می‌تواند به بهبود مدل تهیه شده و نیز رفع بحران آب موجود در دشت نیشابور کمک نماید.

کاهش شدید مصارف کشاورزی توسط روش های مختلف از جمله کاهش میزان آب تخصیص یافته به هر هکتار مثلاً توسط افزایش سطح زمین های آیش و یا افزایش سطح زیرکشت گلخانه ها و یا افزایش راندمان در دشت توصیه می‌گردد. تغییر نیاز آبی دشت به واسطه تغییر الگوی کشت، با تغییر الگوی کشت در دشت به محصول گندم به واسطه نیاز آبی پایین آن صرفنظر از مسائل اقتصادی، شاهد

منابع

- ۱- حسینی، س.ا. ۱۳۸۸. استفاده از رویکرد پویایی سیستم ها در استخراج استراتژیهای توسعه پایدار منابع آب (مطالعه موردی توسعه منابع آب دشت مشهد). پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- ۲- قدوسی، ح. ۱۳۸۲. دینامیک های رشد جمعیت در کلان شهرها (نمونه موردی تهران). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مدیریت (MBA). دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مدیریت و اقتصاد.
- ۳- قشقای، م، طوفان تبریزی، ن. و ح. حسینی صفا. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت تهران با استفاده از پویایی سیستم. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۴- میرزایی دریانی، ش.، اصلی زاده، ا.، سلوک دار، ع. ر.، شاهقلیان، ک و ع.ر.، زنده بافنده. ۱۳۸۷. پویایی شناسی سیستم. چاپ دوم. انتشارات ترمه.
- ۵- گزارش ممنوعیت دشت نیشابور، شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ۱۳۸۴.
- 6- Ahmad, S and S. P Simonovic. 2000. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14: 190-198.
- 7- Ewers, M., E. 2005. Combining hydrology and economics in a systems dynamics approach: Modeling water resources for the Sanjuan Basin. University of New Mexico, Departments of Economics, 505: 310-335.
- 8- Fiorillo, F., A. Palestirini, P. Polidori, and C. Socci. 2007. Modeling water policies with sustainability constraints: A dynamic accounting analysis. *Ecological Economics*, 63: 392-402.
- 9- Gupta, D. A. 2008. Implication of environmental flows in river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33: 298-303.
- 10- Luo, Y., Cui, Y., Shahbaz Khan., Zhang, Z and X. Zhu. 2005. Sustainable irrigation water management in the lower yellow river basin : A system dynamics approach. *Intenational Commission On Irrigation And Drainage*, 52: 1- 6.
- 11- Simonovic, S.P. 2002. World water dynamics: Global modeling of water resources *Journal of Environmental Management*, 66: 249-267.
- 12- Simonovic, S., P. 2003. Canada water, A tool for modeling canadian water resources, presentation at The Canadian Commission For UNESCO (CCU) Annual General Meeting, March 1-3, Ottawa.
- 13- Simonovic, S., Fahmy, H and A. Shorbagy. 1997. The use of object – oriented modeling for water resources planning in Egypt. *Water Resources Management*, 11: 243-261.