

## Dynamic Modeling of the Groundwater System in Hamedan – Bahar Aquifer

EHSAN ASADABADI<sup>1</sup>, ALI ASADI<sup>1\*</sup>, KHALIL KALANTARI<sup>1</sup>

1. Department of Management and Agricultural Development, Faculty of Economics and Agriculture Development, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Feb. 5, 2019- Revised: Apr. 7, 2019- Accepted: June. 15, 2019)

### ABSTRACT

The growing number of areas facing to water scarcity necessitates adaptive water management strategies beyond traditional water supply and demand management methods, which are becoming increasingly difficult in many regions. Water reallocation offers a flexible water management approach to mitigate water scarcity under changing socio-economic, climatic, and environmental conditions. This study develops a complex system dynamic model (SD) reflecting interactions between water resources, Environmental water demand and socio-economy using SD software package “Vensim PLE”. Four alternative socio-economic growth patterns and three alternative schemes are designed to simulate those impacts. The results reveal that the developed SD model reflect the dynamic behavior of the system in the studied area efficiently. In the meanwhile, by comparing the different scenarios, it can be found that a higher growth pattern with desirable scenario supply socio-economic growth and environmental water requirements. It should be explained that the maximum growth pattern allows policy makers to revive the aquifer balance by controlling demand and adopting methods such as increasing artificial aquifer feeding and purifying treatment of urban and industrial wastewater.

**Keywords:** Aquifer Balance, Drought, Growth Patterns, Improper Development

## مدل سازی پویای نظام آب های زیرزمینی در آبخوان همدان - بهار

احسان اسدآبادی<sup>۱</sup>، علی اسدی<sup>۱\*</sup>، خلیل کلانتری<sup>۱</sup>

۱. گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۲۵)

### چکیده

رشد روزافزون مناطق مواجه با محدودیت منابع آب، اتخاذ راهبردهای مدیریت سازگارانهی آب را در ورای روش های سنتی مدیریت عرضه و تقاضا، مُبدل به امری الزامی نموده است. تخصیص آب به عنوان یک روش مدیریتی مُنعطف، از این امکان برخوردار است که در هنگامه ی تغییرات اقتصادی - اجتماعی، اقلیمی و شرایط محیط زیستی، به عنوان ممری جهت مقابله با محدودیت منابع آب، عمل نماید. در تحقیق حاضر با بهره گیری از سیستم های پویا، مدلی طراحی گردید (با بهره گیری از نرم افزار Vensim PLE) که هدف آن بررسی تعاملات مابین منابع آب زیرزمینی، حق آبه های محیط زیستی و فعالیت های اقتصادی - اجتماعی، در آبخوان همدان - بهار می باشد. براین اساس در تحقیق حاضر سه سناریو و چهار الگوی رشد مرتبط با فعالیت های اقتصادی - اجتماعی طراحی گردیدند. نتایج بیانگر این مطلب است که مدل توسعه یافته بگونه ای کارآمد، رفتار نظام در منطقه ی مورد مطالعه را بازتاب می دهد. از سویی با مقایسه ی سناریوهای مختلف می توان دریافت که الگوی رشد بیشینه به همراه سناریو مطلوب، رشد اقتصادی و نیازهای محیط زیستی منطقه را تأمین می نماید. لازم به توضیح است که الگوی رشد بیشینه این امکان را در اختیار سیاست گذاران قرار می دهد که با کنترل تقاضا و اتخاذ شیوه های چون افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان و رشد تصفیه ی پساب های شهری و صنعتی تعادل آبخوان را احیاء نمایند.

**واژه های کلیدی:** تعادل آبخوان، خشکسالی، الگوهای رشد، توسعه نامناسب

### مقدمه

خلأ بین توان تأمین آب و شدت تقاضا و رقابت رو به رشد بین بخش های مختلف اقتصادی بحران آفرین است. هنگامی که این عدم تعادل با مجموعه راهکارهای مدیریتی قابل مهار نباشند، پیامدهای عیدیه ای را می تواند در سطوح مختلف محلی، منطقه ای و بین المللی ایجاد نماید که ساختار توسعه انسانی، محیطی، منطقه ای و جهانی را تحت الشعاع قرار دهد (Zwarteveen and Boelens, 2014; Gerlak and Mukhtarov, 2015). لازم به ذکر است که بخش عمده ای از عدم تعادل در منابع آب، ناشی از چرخه ی آب شناسی و محدودیت های طبیعی و فیزیکی آن است و بخش دیگر، تأثیرگذاری فعالیت ها و اقدامات بشری بر روی منابع آب می باشد که این فعالیت ها و اقدامات بشری با بهره گیری بی رویه، غیراصولی و نامناسب از فناوری ها در عرصه ی استحصال منابع آب و بدون حضور نگرش سیستمی، پیامدهای منفی و مخربی را بر منابع محدود آبی تحمیل نموده است (Hoekstra, Marston and Cai, 2016). محدودیت ذاتی منابع آب، وقوع و حدوث خشکسالی و تداوم آن و آثار تخریبی فعالیت انسان بر عرصه های محیط زیستی و بهره گیری ناصحیح از ادبیات

پراوازه ی امروز یعنی توسعه، جملگی زمینه ساز چالش های سنگین در امر بهره گیری از منابع آب شیرین شده است (Akhtar et al., 2013). عدم توزیع مناسب بارندگی و عدم تطابق نیاز مصرف با زمان نزولات جوی (به ویژه در بخش کشاورزی) و نیاز شدید به سرمایه گذاری در بخش های ذخیره، پایش و حفاظت از منابع محدود، ابعاد مدیریت منابع را سنگین تر و گسترده تر می نماید (Bebbington et al., 2010; Davidson and Malano, 2013). لازم به ذکر است که به دلیل رشد تقاضای آب در بخش های اصلی یعنی کشاورزی، شرب و صنعت و افزوده شدن تقاضاهای جدید نظیر حق آبه های محیط زیستی و کاهش امکان عرضه، به دلیل نبود فیزیکی آب و توزیع نامناسب زمانی و مکانی آن، رقابت مابین مصرف کنندگان عمده ی این منبع حیاتی را شدت بخشیده است (Cao et al., 2015). در این شرایط یکی از چالش برانگیزترین مسائل مدیریتی، چگونگی تخصیص و بهره گیری از منابع آبی بین بزرگترین مصرف کنندگان یعنی صنعت، کشاورزی، مصارف خانگی و محیط زیستی می باشد (Boelens and Vos, 2012; Bjornlund et al., 2015). با توجه به اهمیت راهبرد تخصیص در کسب مزایایی چون بهبود کیفیت

می‌شود با وسعت تقریبی ۲۴۵۹ کیلومترمربع در دامنه شمالی ارتفاعات الوند جای گرفته‌است. لازم به ذکر است که گسترش سطحی سفره اصلی دشت حدود ۴۶۸ کیلومترمربع بوده که خروجی حوضه در ناحیه شمالی آن واقع و سفره آب زیرزمینی آن با دشت‌های کبودر آهنگ و قهاوند ارتباط ژئوهیدرولوژی<sup>۴</sup> دارد. متوسط آمار بارندگی سالانه در دوره‌ی آماری ۳۹ ساله براساس داده‌های ایستگاه باران‌سنجی همدان، سداکباتان و آق‌کهریز (بهادریگ) برابر ۳۲۴/۳ میلی‌متر می‌باشد. بیشتر رودخانه‌های حوضه‌ی مزبور از ارتفاعات جنوبی (کوه‌های الوند) سرچشمه می‌گیرند (اداره هواشناسی کل استان همدان، ۱۳۹۵). رودخانه‌های مذکور عبارتند از آبشینه، آلوسجرد، عباس‌آباد، مریانج و صالح‌آباد. از ارتفاعات غربی دشت نیز دوجریان سطحی به اسامی بهادریگ و قره‌آغاج سرچشمه می‌گیرند. تمامی رودخانه‌های ذکرشده در قسمت‌های مرکزی دشت به هم می‌پیوندند و رودخانه‌ی اصلی حوضه با نام سیمینه‌رود را پدید می‌آورند. سیمینه‌رود در امتداد جنوب - شمال جریان داشته که در این راه از سمت شمال و از طریق تنگه‌ی کوشک‌آباد از حوضه خارج می‌گردد. متوسط دبی دوره آماری ۳۷ ساله‌ی رودخانه‌ی مذکور ۲/۵۶ مترمکعب در ثانیه و معادل ۷۸/۸ میلیون مترمکعب در سال و متوسط خروجی حوضه در پنج سال اخیر برابر ۲۷/۹۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. دشت همدان - بهار که منطقه‌ی مطالعه‌ی تحقیق حاضر می‌باشد بخشی از حوضه‌ی ذکر شده می‌باشد که با مساحت ۴۶۸ کیلومتر مربع بین طول شرقی ۱۷°، ۴۸° تا ۳۳°، ۴۸° و عرض شمالی ۴۹°، ۳۴° تا ۰۲°، ۳۵° واقع شده‌است. تصویر (۱) موقعیت سفره آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه و حوضه‌ی آبریز همدان - بهار را نشان می‌دهد (Hamedan regional water authority, 2017).

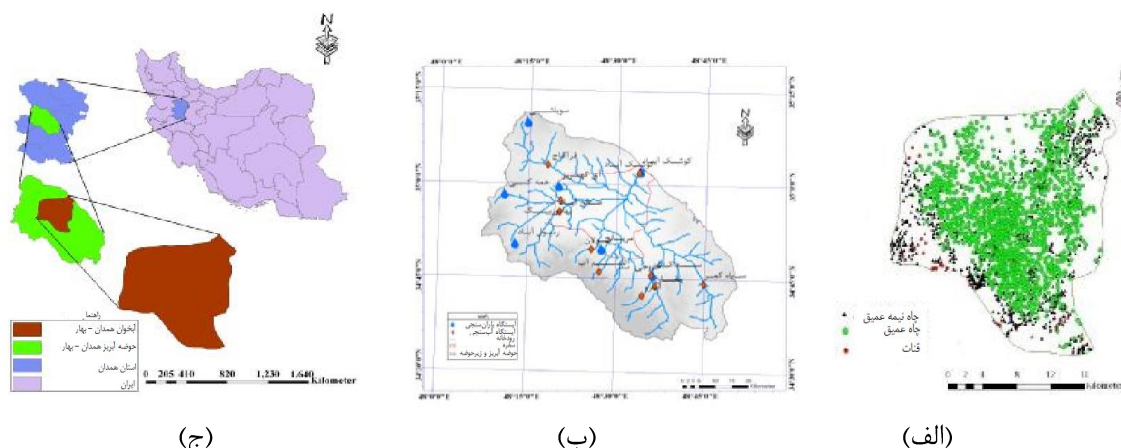
تعداد کل چاه‌ها و قنوت درون دشت مشتمل بر ۲۱۳۲ حلقه می‌باشد که از این تعداد ۱۳۹۲ حلقه چاه عمیق، ۷۱۶ حلقه چاه نیمه‌عمیق و ۲۴ رشته قنات می‌باشند. موقعیت‌های مکانی چاه‌های مزبور در تصویر (۳) ارائه شده‌است. این امر قابل درک است که به دلیل ضخامت آبخوان چاه‌های عمیق در مرکز دشت و چاه‌های نیمه‌عمیق و قنوت در کناره‌های دشت جای گرفته‌اند. در نهایت لازم به توجه است که در بخش استخراج ۸۳/۴۷ درصد از منابع مستخرج به بخش کشاورزی تعلق یافته، همچنین بخش صنعت و شرب به ترتیب ۱/۶۷ و ۱۴/۰۳ درصد از آب‌های تحصیل شده را در اختیار دارند (Water planning office, 2016; Iranian Association of Hydrology, 2016).

منابع آب، مواجهه‌ی مستقیم با تقاضاهای روبه رشد، افزایش انعطاف‌پذیری و اطمینان‌پذیری نظام‌ها و کاهش هزینه‌های تأمین آب، مدل‌سازی سیستم‌های پویا<sup>۱</sup> این امکان را فراهم می‌آورد که با دیدگاهی جامع به مبحث محدودیت آب نظاره شود و مدیریت یکپارچه اعمال گردد. در مدل حاضر درک مسائل و تغییرات از طریق حلقه و بازخورد<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد که به کمک شیوه‌ی مذکور پیامدهای نامعین و پیش‌بینی‌نشده هویدا می‌گردند (Li and Simonovic, 2002; Vlachos et al., 2007). به بیان دیگر، تفکر سیستمی<sup>۳</sup> روشی به منظور درک شهودی از اشیاء سیستم‌ها و نیز الگوهای رفتاری آنان پدید می‌آورد که در فهم چارچوب‌های فکری، مجاورت و هم‌راستایی آنان و رشد دیدگاه سیستمی یاری‌بخش محققان خواهد بود. در رابطه با موضوع سیستم‌های پویا (به‌ویژه در مبحث آب) تاکنون مطالعات متعددی در سطح دنیا صورت گرفته است که می‌توان به زمینه‌هایی چون ظرفیت تحمل منابع آب (Sun et al., 2007) و اراضی (Chen et al., 1999)، شبیه‌سازی معضلات بهره‌برداری از منابع آب (Fedorovskiy et al., 2004)، اثرات محیط زیستی (Deaton and Winebrake, 2000)، مدل‌سازی منابع آب جهانی (Simonovic, 2002)، روابط مابین منابع اقلیمی، محیط زیستی و اقتصادی (Costanza et al., 1998)، فعالیت‌های مرتبط با ذخیره‌سازی (Ahmad and Simonovic, 2000)، توسعه پایدار (Xu et al., 2002)، برنامه‌ریزی منابع آب (Zhang et al., 2008)، مدیریت کیفیت آب (Rivera et al., 2006; Tangirala et al., 2003)، بازتخصیص منابع آب (Wei et al., 2012)، بهینه‌سازی مصرف و کنترل منابع آب (Malinowski et al., 2017) و توسعه نامتوازن و بررسی اثرات آن بر منابع آب و محیط‌زیستی (Kashimbiri et al., 2016) اشاره نمود. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته و مباحث مطروحه ضروری است که امر تخصیص منابع آب متعلق به بخش کشاورزی مورد بررسی قرار گیرد، تا متغیرهای اصلی و تأثیرگذار به‌درستی شناسایی شده و بتوان براساس شرایط مورد بررسی، راهکارهایی در جهت مدیریت مناسب و حفظ چرخه‌ی آب اندیشیده شود. ب-ر این اساس مطالعه‌ی حاضر با هدف دستیابی به تخصیص مناسب، به تعیین مکانیزم‌های موثر بر منابع آب زیرزمینی و مصارف مربوطه در آب‌خوان همدان - بهار خواهد پرداخت.

## روش انجام تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبخوان دشت همدان - بهار که سیمینه‌رود نیز نامیده



تصویر ۱- موقعیت مکانی آبخوان همدان - بهار، (الف) موقعیت مکانی سفره آب زیرزمینی دشت همدان - بهار، (ب) حوضه آبریز همدان - بهار و زیرحوضه‌های تابعه، (ج) موقعیت چاه‌های در حال بهره‌برداری دشت همدان - بهار

### اطلاعات ورودی به مدل

در تحقیق حاضر شرایط مختلف توسعه، عرضه و تقاضای آب در دوره‌ی زمانی ۳۴ ساله از سال ۱۳۸۶ تا ۱۴۲۰ مورد بررسی قرار گرفته‌است که در این راه اطلاعات ذکر شده در ۴ دسته‌ی کلی اقتصادی - اجتماعی، هیدرولوژی و منابع آب، بهره‌گیری از منابع آب و دفع فاضلاب جای می‌گیرند. اطلاعات اقتصادی - اجتماعی پوشش‌دهنده‌ی مواردی چون جمعیت (شهری و روستایی)، نرخ رشد و مرگ جمعیت، تولید ناخالص داخلی بخش‌های کشاورزی و صنعت، درآمد سرانه‌ی خانوارهای شهری و روستایی و اراضی تحت آبیاری می‌باشد، از سویی اطلاعات مرتبط با منابع آب و هیدرولوژی در برگیرنده‌ی آب‌های سطحی (جریان‌های ورودی و خروجی) و زیرسطحی، میزان بارش و تبخیر و ضریب نفوذ می‌باشد. شایان ذکر است که بهره‌گیری از منابع آبی مشتمل بر مصرف روزانه‌ی آب شرب در سطح روستاها و شهرها، میزان آب مورد استفاده‌ی صنایع، میزان آب مورد استفاده‌ی بخش کشاورزی و ضرایب مصرف هر کدام از بخش‌های ذکر شده می‌باشد. در نهایت اطلاعات مرتبط با دفع فاضلاب شامل پس‌آب‌های صنعتی، شرب و کشاورزی می‌باشد. اطلاعات ذکر شده از مراجعی چون مرکز آمار ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان، بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، جهاد کشاورزی استان همدان، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان همدان و اداره کل هواشناسی استان همدان گردآوری شده‌است. همچنین جهت پیش‌بینی

اطلاعات مورد نیاز طی سال‌های آتی تا ۱۴۲۰ از تابع Forecast در اکسل<sup>۱</sup> بهره‌گرفته شد. تابع مذکور برای پیش‌بینی خطی یک متغیر بر اساس مقادیر قبلی آن متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. براین اساس با در دست داشتن مقادیر گذشته یک متغیر می‌توان با استفاده مقادیر مورد نظر را برای دوره‌های آینده بر اساس رگرسیون خطی پیش‌بینی نمود.

### مفهوم پویایی سیستم

ارزیابی به هم پیوسته سیستم‌های منابع آبی در مقیاس حوضه آبخوان و آبریز مستلزم توسعه مدل یکپارچه از منابع ذکر شده می‌باشد. رویکرد پویایی سیستم به‌عنوان یکی از توانمندترین ابزارهای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌تواند نقشی کلیدی را در این امر ایفا نماید (Elsawah, 2011). لازم به توجه است که ساختار شبیه‌سازی سیستم‌های پویا بر چهار ستون انباشت<sup>۲</sup> (متغیر حالت<sup>۳</sup>، سطح<sup>۴</sup> و مخزن<sup>۵</sup>)، جریان<sup>۶</sup> (نرخ، متغیر کنترل<sup>۷</sup> و فرآیندها<sup>۸</sup>)، مُبدل‌ها<sup>۹</sup> (متغیرهای کمکی<sup>۱۰</sup> و متغیرهای انتقالی<sup>۱۱</sup>) و رابطه‌ها<sup>۱۲</sup> (پیکان‌های اطلاعات<sup>۱۳</sup>) بنا نهاده شده‌است. از سوی دیگر مدل‌های شبیه‌سازی پویایی سیستم در برگیرنده‌ی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل غیر خطی است که در این میان می‌توان به معادلات سطح (حالت)، جریان، کمکی، پارامتر و شرایط (معادلات مقادیر اولیه) اشاره نمود. لازم به توجه است که معادلات سطح هسته‌ی رفتار پویای سیستم‌ها را شکل می‌دهند که می‌توان با کمک روابط (۱) آنان را نشان داد (Serman, )

9. Converter  
10. Auxiliary Variables  
11. Translation Variables  
12. Connector  
13. Information Arrow

1. Excel  
2. Stock  
3. State Variable  
4. Level  
5. Reservoir  
6. Flow  
7. Control Variable  
8. Processes

و مابین شهرستان‌های همدان و بهار جای گرفته‌است. تنظیم و شبیه‌سازی مدل بیان شده با بهره‌گیری از نرم‌افزار Vensim PLE<sup>۴</sup> صورت گرفته‌است. سیستم شبیه‌سازی فوق‌الذکر متشکل از ۸ زیرسیستم می‌باشد که مواردی چون جمعیت، صنعت، کشاورزی، بهره‌گیری/تقاضا آب، فاضلاب، منابع آب، تعادل آب و اکولوژی را در بر می‌گیرد (تصویر ۲). سیستم ذکر شده در برگیرنده‌ی ۱۶۰ متغیر و پارامتر بوده که از این تعداد ۷ متغیر سطح، ۴۱ ثابت و ۹۷ تابع، شاکله‌ی سیستم بیان شده را تشکیل می‌دهند. در تحقیق حاضر همان‌گونه که بیان شد ۷ متغیر سطح مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه توضیحاتی در مورد هر یک ارائه خواهد شد.

#### مدل‌سازی روابط فیزیکی متغیرهای تغذیه آبخوان

متغیرهای تغذیه آبخوان دربرگیرنده مواردی چون میزان نفوذ بارش سالیانه آبخوان، میزان نفوذ سالیانه رواناب‌های سطحی به آبخوان، میزان آب برگشتی به آبخوان دشت می‌باشد. حجم ذخیره آبخوان شامل ذخیره دینامیک و استاتیک بوده و در حقیقت میزان ذخیره قابل استحصال آبخوان است. ذخیره دینامیک (پویا) آب زیرزمینی به ذخیره‌ای اطلاق می‌شود که در ارتباط با چرخه هیدرولوژیکی بوده و حجم آن در حقیقت برابر میزان تغذیه سالانه آب زیرزمینی می‌باشد. در صورت عدم بهره‌برداری از آبخوان، ذخیره دینامیک به هر شکل ممکن از آبخوان خارج می‌شود که می‌تواند به صورت خروجی زیرزمینی به دشت‌های مجاور، زهکشی رودخانه‌ها، تبخیر مستقیم در مناطق کم‌عمق و غیره باشد. این ذخیره برگشت‌پذیر بوده و به همین دلیل، در صورت بهره‌برداری از آبخوان کمتر یا معادل میزان ذخیره دینامیک، اثرات نامطلوب بر سفره آب زیرزمینی وارد نمی‌گردد. بنابراین، این میزان برداشت به عنوان برداشت مجاز شناخته می‌شود. ذخیره استاتیک (ایستا) به ذخیره‌ای اطلاق می‌شود که در طول زمان زمین‌شناسی، در بخش‌های تحتانی آبخوان انباشته گردیده و معمولاً در ارتباط با چرخه هیدرولوژیکی نیست.

#### مدل‌سازی روابط فیزیکی متغیرهای جمعیت

متغیرهای مرتبط با جمعیت شامل نرخ خالص رشد جمعیت، نرخ مرگ و میر و نرخ مهاجرت به شهرها می‌باشد که در نهایت جمعیت کل آبخوان را تشکیل می‌دهد. رابطه بلندمدت بین رشد جمعیت و کیفیت زندگی یک منبع بحث برانگیز در بین محققان بوده‌است و به لحاظ تاریخی حمایت از نرخ‌های بالای رشد جمعیت نگرانی در مورد کیفیت و استانداردهای زندگی را

(2000).

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f(X_i, R_i, A_i, C_i) \quad (\text{رابطه ۱})$$

از سویی این امکان وجود دارد که معادلات دیفرانسیل به صورت رابطه‌ی (۲) بیان گردد:

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + f(X_i, R_i, A_i, C_i) \times \Delta t \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه‌ی (۲)،  $X_i(t)$  بردار متغیرهای حالت،  $f()$  بردار تابع مقدار،  $R_i$  بردار متغیرهای جریان،  $A_i$  بردار متغیرهای کمکی،  $C_i$  بردار پارامترها،  $t$  متغیر زمان و  $\Delta t$  تفاضل زمان می‌باشند. لازم به ذکر است که جهت یافتن پاسخ برای معادلات مطروحه از روش شبیه‌سازی اوپلر<sup>۱</sup> بهره‌گرفته شد.

لازم به توجه است که معادله‌ی حالت سه نقطه‌ی زمانی گذشته، حال و آینده را در بر می‌گیرد که در این میان زمان حال خلاصه‌ای از حالت‌های گذشته می‌باشد و جهت دستیابی به مقادیر آینده از جمع حالات فعلی با تغییرات پدید آمده در طول زمان بهره‌گرفته می‌شود تا تغییرات پویای یک سیستم در طول زمان معین گردد (Sterman, 2000).

#### فرآیند شبیه‌سازی سیستم‌های پویا

شایان ذکر است که فرآیند شبیه‌سازی سیستم‌های پویا از هفت مرحله‌ی، گزینش اهداف شبیه‌سازی، تعیین مرز (حدود) سیستم، طراحی یک ساختار گرافیکی رابط - کاربری<sup>۲</sup> از سیستم (نمودار علی حلقوی<sup>۳</sup>)، توسعه‌ی یک نمودار انباشت - جریان، تنظیم مدل‌های ریاضی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل و در نهایت پیاده‌سازی مدل تشکیل شده‌است (Sterman, 2000).

#### مدل شبیه‌سازی سیستم پویا

مدل شبیه‌سازی ارائه شده در تحقیق حاضر باهدف ارزیابی اثرات اقتصادی - اجتماعی سطوح مختلفی از تخصیص منابع آب زیرزمینی در حوضه‌ی آبخوان همدان - بهار و از طریق شناسایی تعاملات بین بخش‌های مختلف اقتصادی (کشاورزی، صنعت و شرب) بنا نهاده شده‌است. در آغاز با بررسی رفتار گذشته متغیرها در حوضه‌ی آبخوان مورد مطالعه و دریافت نظر خبرگان و مدیران ارشد و میانی سازمان‌های آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی و اداره‌ی صنایع و معادن منطقه‌ی مذکور عوامل مؤثر بر راهبرد تخصیص شناسایی و دسته‌بندی گردیدند. سپس رفتار هر کدام از عوامل در طی مدت زمانی مشخص بررسی و به شکل نمودارهای مرجع ارائه گردید و در نهایت با بررسی اطلاعات مربوط به رفتار متغیرها، ارتباطات منطقی از نحوه تأثیرگذاری آنها روی یکدیگر استخراج شد. مرز آبخوان ذکر شده در استان همدان

3. Casual Loop Diagram

4. Ventana Simulation Environment Personal Learning Edition

1. Euler

2. User-Interfaced

جهت واسنجی مدل مزبور می‌توان از سه روش، بهره‌گیری مستقیم از منابع نخستین، بهره‌گیری از منابع ثانویه (اسناد و اطلاعات دولتی) و تحقیقات گذشته و محاسبه‌ی همبستگی مابین متغیرها و ضرایب استفاده نمود. در تحقیق حاضر با آزمون صحت پارامترها و بررسی برازش با کمک ضریب تصحیح (R)، قدرمطلق خطای نسبی ( $ARE^1$ ) و میانگین قدرمطلق خطای نسبی ( $MARE^2$ ) واسنجی مدل صورت گرفت (Helfrick, 2005). از سویی مفهوم اعتبارسنجی مدل به آزمون ساختار و عملکرد مدل در شرایط مختلف و مقایسه‌ی نتایج با رفتار مشاهده شده باز می‌گردد. در تحقیق حاضر قدرمطلق خطای نسبی و میانگین قدرمطلق خطای نسبی جهت بررسی اعتبار عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفتند (روابط ۴ و ۵).

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y}_t)(\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}}_t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y}_t)^2 \sum_{t=1}^n (\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}}_t)^2}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$ARE = \left| \frac{\hat{Y}_t - Y_t}{Y_t} \right| \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{\hat{Y}_t - Y_t}{Y_t} \right| \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه‌های فوق‌الذکر  $t$  به‌عنوان واحد زمان،  $n$  تعداد اطلاعات،  $Y_t$  و  $\hat{Y}_t$  به ترتیب نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و  $\bar{Y}_t$  و  $\bar{\hat{Y}}_t$  به ترتیب میانگین نتایج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده می‌باشند (Helfrick, 2005).

### تحلیل حساسیت مدل

جهت تحلیل حساسیت مدل از روش تک متغیره (یک نوبت در زمان) بهره‌گرفته شد که با فرض ثابت بودن سایر متغیرها، تنها مقادیر پارامتر مدنظر، در زمان تغییر خواهد کرد. لازم به توجه است که شاخص حساسیت را می‌توان به کمک رابطه‌ی (۶) محاسبه نمود.

$$S_Y = \left| \frac{dY_t}{Y_t} * \frac{X_t}{dX_t} \right| \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه‌ی مطروحه،  $t$  واحد زمان،  $S_Y$  شاخص حساسیت وضعیت سیستم  $Y$  نسبت به پارامتر  $X$ ،  $Y_t$  وضعیت سیستم در زمان  $t$ ،  $X_t$  مقادیر پارامتر مدنظر در زمان  $t$  و  $dY_t$  و  $dX_t$  به ترتیب بیانگر مقادیر مدنظر جهت تغییر وضعیت سیستم  $Y$  تحت پارامتر  $X$  (در زمان  $t$ ) می‌باشند.

از سویی جهت محاسبه‌ی شاخص درجه‌ی حساسیت کل<sup>۳</sup> (شاخص حساسیت یک پارامتر برای  $n$  متغیر انباشت  $(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  در زمان  $t$ ) از رابطه‌ی (۷) بهره‌گرفته می‌شود.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Y_i} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه‌ی (۷)،  $S$  درجه‌ی حساسیت کل،  $n$  تعداد متغیرهای انباشت و  $S_{Y_i}$  درجه‌ی حساسیت متغیر انباشت  $Y_i$  می‌باشد (Golub et al., 1996).

تحت‌الشعاع قرار داده است. بحث بر سر رشد جمعیت و اهمیت آن برای رفاه انسان، در ابتدا به صورت جدی توسط مالتوس مطرح شد. از نظر مالتوس، رشد جمعیت و تمرکز سرمایه از طریق قانون بازدهی نزولی، رشد اقتصادی را مختل خواهد کرد. بر این مبنا جمعیت انسانی به صورت تصاعد هندسی رشد می‌کند، درحالی‌که بهره‌گیری از منابع حیاتی چون آب به صورت تصاعد حسابی رشد می‌نماید؛ بنابراین پس از مدت کوتاهی نیاز جمعیت به منابع حیاتی از توان تأمین منابع مزبور فزونی خواهد یافت و این منابع تحت فشار قرار خواهند گرفت. بر این اساس نقش رشد جمعیت می‌تواند نقشی کلیدی را در مدل حاضر ایفا نماید.

### مدل‌سازی روابط فیزیکی متغیرهای بخش صنعت

به‌طور کلی جهت مدل‌سازی بخش صنعت از دو متغیر سطح تولید ناخالص بخش صنعت و درآمد سرانه خانوارهای شهری بهره‌گرفته شده است که در مدل‌سازی تولید ناخالص بخش صنعت از متغیرهایی چون نرخ رشد صنایع، ارزش افزوده صنایع و ارزش تباه تباه شده صنایع بهره‌گرفته شده‌است. از جهت دیگر متغیرهایی چون نرخ رشد درآمد سرانه خانوارهای شهری، درآمد کسب شده و درآمد از دست رفته جهت مدل‌سازی درآمد سرانه خانوارهای شهری بکارگرفته شده‌اند.

### مدل‌سازی روابط فیزیکی متغیرهای بخش کشاورزی

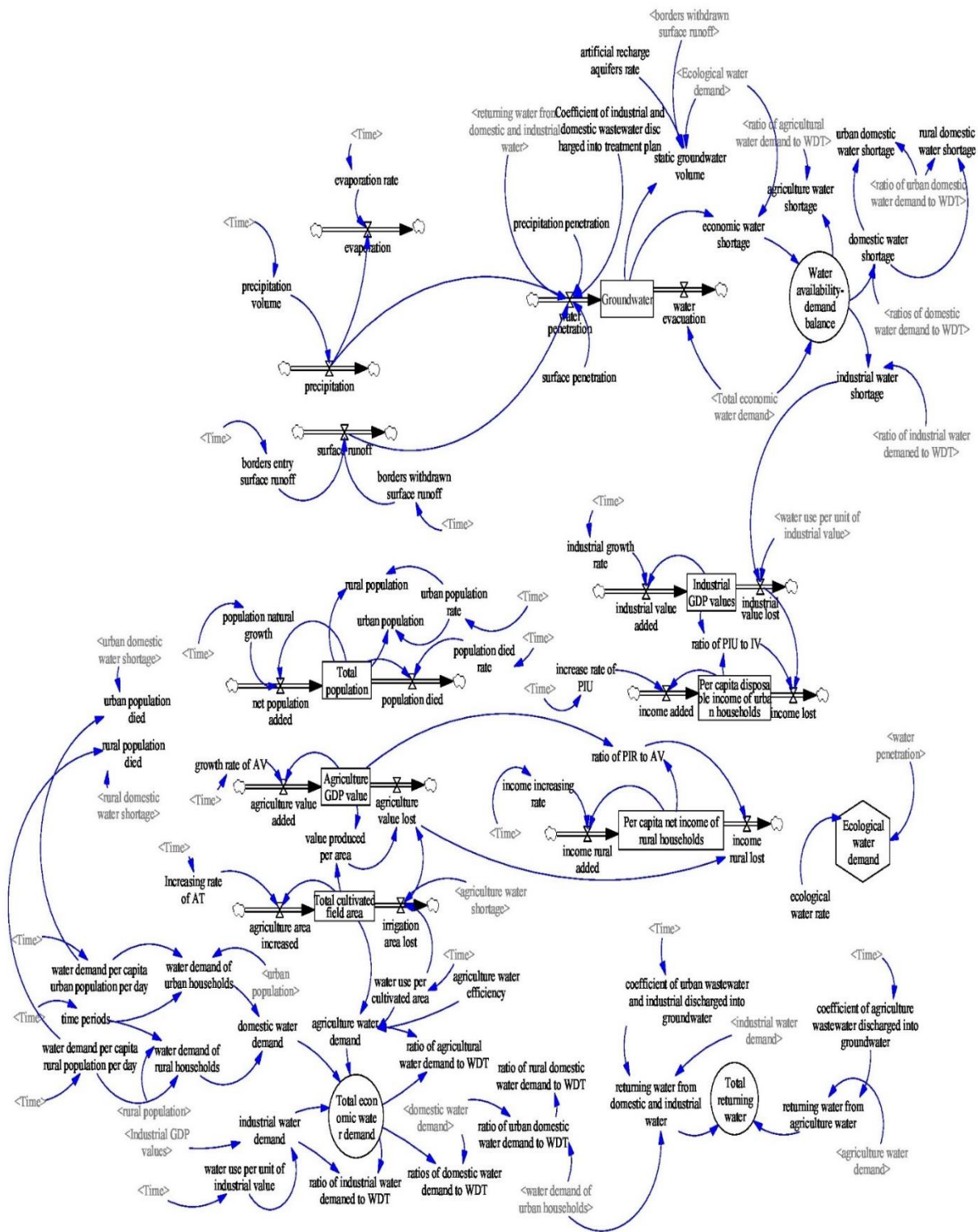
تقاضای آب کشاورزی به عنوان اصلی‌ترین نیاز آبی آبخوان شناخته می‌شود. در زیرمدل حاضر، کل اراضی تحت زیرکشت، درآمد سرانه خانوارهای شهری، تولید ناخالص بخش کشاورزی، آب مورد استفاده برای هر هکتار، کارایی بهره‌گیری از منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی، نرخ رشد افزایش درآمد خانوارهای روستایی، نرخ رشد تولید ناخالص بخش کشاورزی و نرخ رشد سطح زیرکشت اراضی کشاورزی لحاظ شده‌است. با افزایش میزان تقاضای کشاورزی، میزان کمبود آب افزایش می‌یابد و سیاست‌های مدیریتی جهت کاهش تقاضای کشاورزی فعال می‌شود.

### مدل‌سازی کمبود آب

در این مدل، رابطه بین تأمین آب و تقاضا با متغیر کمبود آب برقرار می‌گردد و اختلاف بین تقاضا و تأمین آب با متغیر کمبود تعریف شده است. عوامل مؤثر بر تغییرات بیلان آب، میزان عرضه و مصرف آب می‌باشد.

### ارزیابی مدل

### واسنجی مدل و اعتبارسنجی مدل



تصویر ۲- نمودار دینامیک - جریان برای آبخوان همدان بهار

در بهره‌برداری آب بخش کشاورزی می‌تواند به عنوان مطلوب‌ترین سناریوی ممکن خودنمایی نماید. براین اساس در تحقیق حاضر سه سناریو، شرایط بحرانی ( $A_1$ )، شرایط موجود ( $A_2$ ) و شرایط مطلوب ( $A_3$ ) مدنظر قرار خواهد گرفت (جدول ۱). براین اساس

### سناریوها

از آنجا که آبخوان همدان - بهار به‌لحاظ بهره‌برداری در قالب دشت‌های ممنوعه جای می‌گیرد و امکان توسعه‌ی بهره‌برداری‌ها در محدوده‌ی حاضر تقریباً مساوی با صفر می‌باشد، افزایش کارایی

موجود بنیان نهاده شده‌است، از سویی سایر الگوهای طراحی شده بر تغییرات آتی متغیرها تأکید دارند. در مجموع سناریوهای انتخابی به همراه الگوی‌های رشد طراحی شده، ۱۲ سناریو را برای تحقیق حاضر فراهم می‌آورند

مقادیر کارایی برای هر کدام از شرایط بحرانی، موجود و مطلوب به ترتیب ۲۰، ۳۵ و ۷۵ درصد در نظر گرفته خواهد شد. علاوه بر سناریوهای اتخاذ شده چهار الگوی رشد پایه، کمینه، متوسط و بیشینه طراحی گردید که در جدول (۲) ارائه شده‌است. الگوی رشد پایه بر مبنای الگوی فعالیت‌های انسانی

جدول ۱- تلخیصی از سه سناریو انتخابی کارایی بخش کشاورزی در آبخوان همدان - بهار

کد	سناریوها	توضیحات
A <sub>1</sub>	شرایط بحرانی	تحت کارایی منتخب (۲۰ درصد) در بخش کشاورزی تلفات افزون می‌باشد، به گونه‌ای که تنها ۲۰ درصد از آب استحصالی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ۸۰ درصد مابقی چه در مسیر انتقال و چه در هنگام آبیاری از دسترس کشاورزان خارج می‌گردد. شرایط کارایی ذکر شده در سال‌های ماقبل دهه‌ی ۸۰ در منطقه‌ی مورد مطالعه قالب بوده‌است (Agriculture Organization of Hamadan Province, 2016).
A <sub>2</sub>	شرایط موجود	بر اساس آمار ارائه شده توسط آب منطقه‌ای استان همدان (۱۳۹۶) و همچنین جهاد کشاورزی استان همدان (۱۳۹۵) میانگین آب استحصالی در بخش کشاورزی آبخوان همدان - بهار تقریباً و تحقیقاً برابر ۳۵ درصد می‌باشد که در تحقیق حاضر به عنوان شرایط موجود انتخاب گردید.
A <sub>3</sub>	شرایط مطلوب	بر اساس برنامه‌ریزی بانک جهانی، به دلیل ظهور یافتن مباحثی چون تغییرات اقلیم، توسعه‌ی صنعتی و افزایش جمعیت این نیاز احساس می‌گردد که میزان کارایی مصرف آب بخش کشاورزی باید تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۷۵ درصد افزایش یابد که بر این منوال سناریو حاضر به عنوان سناریو مطلوب انتخاب گردید (World Bank, 2017).

جدول ۲- پیش فرض الگوهای رشد

متغیرها	پایه (B <sub>1</sub> )	کمینه (B <sub>2</sub> )	متوسط (B <sub>3</sub> )	بیشینه (B <sub>4</sub> )
نرخ رشد طبیعی جمعیت	۰/۰۴۸	۰/۰۵۳	۰/۰۴۶	۰/۰۴۳
نرخ شهرنشینی	۰/۰۰۸	۰/۰۸۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۲
نرخ رشد صنایع	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷
نرخ رشد درآمد سرانه‌ی خانوارهای شهری	۰/۰۳۵	۰/۰۲۶	۰/۰۴	۰/۰۴۴
نرخ رشد اراضی تحت کشت	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۲۳	۰/۰۱۸
نرخ رشد تولید ناخالص بخش کشاورزی	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳
نرخ رشد درآمد سرانه‌ی خانوارهای روستایی	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۳۶
مصرف سرانه‌ی آب بخش خانگی در شهرها (لیتر)	۱۴۲/۶۵	۱۵۶/۹۱	۱۳۵/۵۲	۱۲۸/۳۸
مصرف سرانه‌ی آب بخش خانگی در روستاها (لیتر)	۱۷۴/۷۲	۱۹۲/۱۹	۱۶۵/۹۸	۱۵۷/۲۴
مصرف آب به‌ازای ارزش هرواحد تولیدات صنعتی (مترمکعب/میلیون ریال)	۰/۶۴۸	۰/۵۱۸	۰/۵۸۳	۰/۷۷۷
مصرف آب به‌ازای هر هکتار (مترمکعب/هکتار)	۶۲۴۸/۷	۷۷۱۴/۴	۵۷۵۸/۸	۵۱۴۲/۹
ضریب تخلیه‌ی فاضلاب شهری و صنعتی	۰/۴۹۳	۰/۶۱۷	۰/۴۱۹	۰/۳۷
ضریب تخلیه‌ی فاضلاب بخش کشاورزی	۰/۳۳۷	۰/۴۰۴	۰/۳۰۳	۰/۱۶۸
تقاضای آب محیط زیستی	۰	۰/۲	۰/۴۵	۰/۷
ضریب تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی	۰/۱۸	۰/۱	۰/۳	۰/۶
ضریب تغذیه مصنوعی آب‌خوان	۰	۰	۰/۲	۰/۴

## نتایج و بحث

### نتایج ارزیابی مدل

واسنجی و اعتبارسنجی مدل شش متغیر انباشت مشتمل بر جمعیت کل، درآمد سرانه‌ی خانوارهای شهری، درآمد سرانه‌ی خانوارهای روستایی، ارزش تولید ناخالص بخش صنعت، ارزش تولید ناخالص بخش کشاورزی و سطح کل اراضی تحت کشت انتخاب گردیدند.

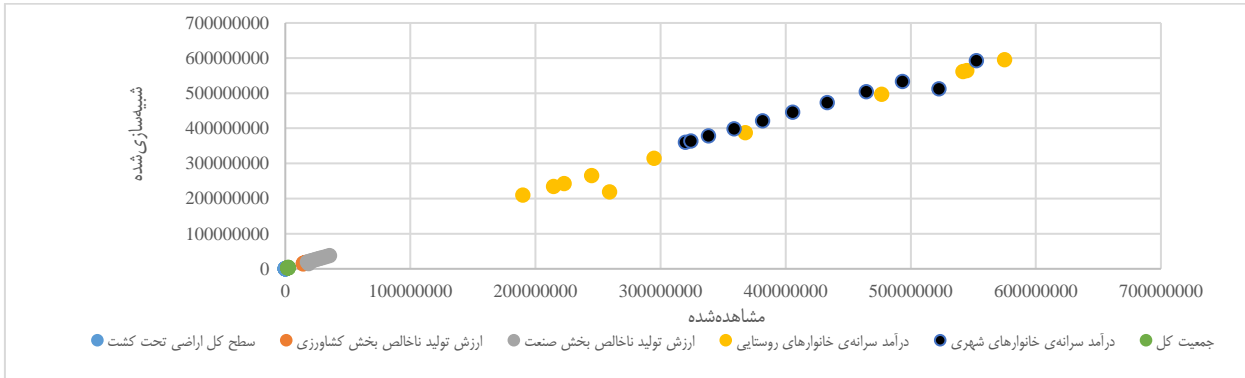
در تحقیق حاضر واسنجی مدل در دو گام، صورت گرفت که نخستین گام به آزمون تناظر پارامترهای مدل با اطلاعات

همان گونه که پیش از این نیز ذکر شد جهت اعتبارسنجی و واسنجی مدل اطلاعات موجود مابین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ به دو گروه تقسیم شدند که در این میان اطلاعات مابین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ برای واسنجی و مابقی اطلاعات حاضر برای اعتبارسنجی مدل بکار گرفته شدند. جهت تحلیل کمی نتایج

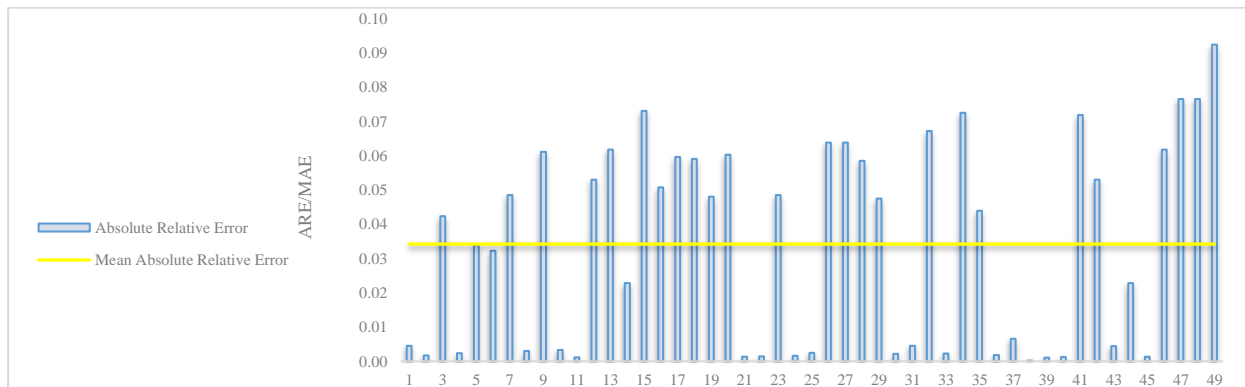


همان گونه که از نمودارهای مذکور مشخص است همبستگی بالا مابین نتایج مشاهده شده و شبیه سازی شده ( $R=0.99$ ) و همچنین مقادیر اندک میانگین قدرمطلق خطای نسبی (۰/۳۴۱) موید این حقیقت است که نتایج مدل پویایی سیستم تطابق مناسبی با داده های تاریخی دارند (از سویی تمامی مقادیر قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۰/۱ می باشند).

توصیفی و عددی سیستم واقعی باز می گردد و دومین گام تشخیص دقت برازش تاریخی را در بر می گیرد. فرآیند واسنجی مشتمل بر مجموعه ای از شبیه سازی هاست که از طریق تکرار و اجرا (آزمون - خطا - آزمون) شکل گرفتند (این امر از طریق، تغییر مقادیر پارامترها تا هنگامی که مابین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده، تطابق معنی داری پدید نیاید، صورت می گیرد). نتایج نهایی واسنجی در نمودارهای (۱ و ۲) ارائه شده است.



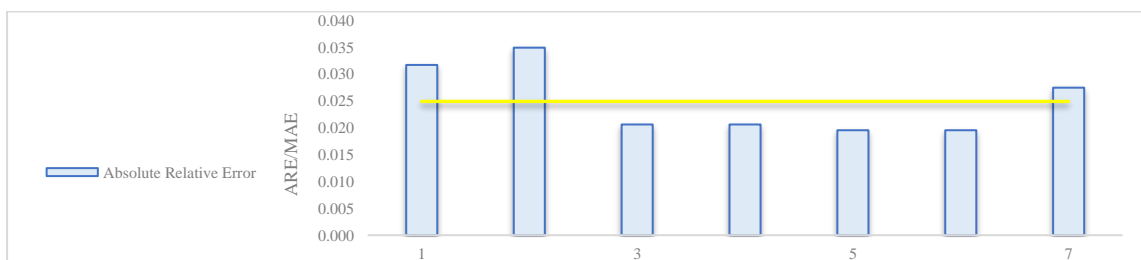
نمودار ۱- ضریب همبستگی مابین مقادیر مشاهده شده و نتایج شبیه سازی شده ( $R=0.99$ )



نمودار ۲- واسنجی مدل با بهره گیری از قدرمطلق خطای نسبی و میانگین قدرمطلق خطای نسبی

خیر؟ در آزمون کمی قابلیت پیش بینی مدل از رفتار حقیقی نظام مورد آزمون قرار می گیرد. نتایج آزمون در نمودار (۳) ارائه شده است. مقادیر اندک شاخص های قدرمطلق خطای نسبی (کمتر از ۰/۰۴) و میانگین قدرمطلق خطای نسبی (۰/۰۲۴) موید این حقیقت است که مدل از توانایی بالایی جهت ارائه ی رفتار نظام شبیه سازی شده برخوردار می باشد.

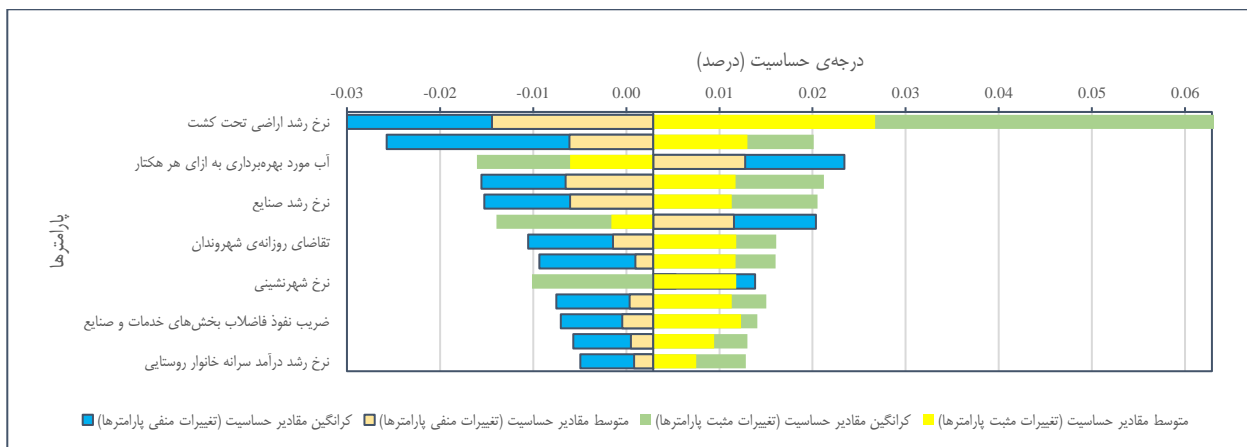
از سویی جهت اعتبارسنجی مدل نیاز به مجموعه ای از آزمون های کیفی و کمی می باشد. در آزمون کیفی بیشتر سازگاری و ساختار سیستم مورد تحلیل قرار می گیرد. لازم به توجه است که در تحلیل ساختار سیستم این امر مورد بررسی قرار می گیرد که آیا سیستم به طور منطقی بیانگر یک نظام حقیقی است و معادلات مدل، منطبق با قوانین فیزیکی می باشند و یا



نمودار ۳- اعتبارسنجی نتایج با بهره گیری از قدرمطلق خطای نسبی و میانگین قدرمطلق خطای نسبی

تولیدات صنعتی و ضریب نفوذ فاضلاب بخش‌های خدمات و صنایع، نرخ رشد درآمد سرانه‌ی خانوارهای شهری و نرخ رشد سرانه‌ی خانوارهای روستایی با  $\pm 25$  درصد تغییر مورد محاسبه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که درصد تغییرات بر مبنای محدوده‌های احتمالی نامطلوب پارامترها تنظیم گردید. متوسط و کرانگین درصد تغییرات کل سیستم ما به ازای تغییر پارامترها در نمودار (۴) ارائه شده‌است. قابل مشاهده‌است که بیشترین متعلق و کرانگین درجه‌ی حساسیت، مابین پارامترهای لحاظ شده متعلق به پارامتر نرخ رشد اراضی تحت کشت می‌باشد. در رتبه‌های بعدی پارامترهای ضریب نفوذ فاضلاب بخش کشاورزی، آب مورد بهره‌برداری به‌ازای هر هکتار و نرخ رشد جمعیت جای می‌گیرند. باید به این نکته اشاره شود که پارامترهای لحاظ شده چندان به شرایط سیستم هدف حساس نیستند ولی با این حال مقادیر حساسیت نشانگر آن هستند که نتایج شبیه‌سازی می‌توانند با اشتباه در مقادیر پارامترها متأثر گردند.

جهت تحلیل حساسیت سیستم، ۱۳ پارامتر که از عدم‌اطمینان بیشتری برخوردار بودند انتخاب شدند که مشتمل بر مواردی چون، نرخ رشد اراضی تحت کشت، نرخ رشد جمعیت، نرخ رشد صنایع، نرخ رشد ارزش تولید ناخالص بخش کشاورزی، آب مورد بهره‌برداری به‌ازای هر هکتار، تقاضای روزانه‌ی شهروندان، تقاضای روزانه‌ی شهروندانی، نرخ شهرنشینی، آب مورد نیاز به‌ازای هر واحد ارزش تولیدات صنعتی، ضریب نفوذ فاضلاب بخش کشاورزی، صنایع و خدمات و نرخ رشد درآمد سرانه‌ی خانوارهای شهری و نرخ رشد سرانه‌ی خانوارهای روستایی، می‌باشند. باید به این نکته توجه گردد که پارامترهای نرخ رشد اراضی تحت کشت، ضریب نفوذ فاضلاب بخش کشاورزی و آب مورد بهره‌برداری به‌ازای هر هکتار با  $\pm 20$  درصد، نرخ رشد جمعیت، نرخ رشد صنایع، نرخ شهرنشینی، تقاضای روزانه‌ی شهروندان و تقاضای روزانه‌ی خانوارهای روستایی با  $\pm 10$  درصد، نرخ رشد ارزش تولید ناخالص بخش کشاورزی، آب مورد نیاز به‌ازای هر واحد ارزش



نمودار ۴- دیاگرام گردباد (دامنه‌ی تغییرات حساسیت خروجی‌ها بر مبنای تغییرات پارامترهای ورودی)

عرضه و تقاضای آب و برهم‌خوردن تعادل بین این دو قطب امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. از سویی امروزه به‌دلیل فزونی تقاضا سهمی برای بخش محیط‌زیستی مدنظر قرار نمی‌گیرند که براین منوال سهم بخش حاضر نزدیک به صفر می‌باشد و سلامت اکوسیستم و پایداری آب‌خوان با چالش روبرو می‌باشد. شرایط ذکر شده موجب می‌گردد که در سال انتهایی شبیه‌سازی (۱۴۲۰) آب‌خوان همدان - بهار با عدم‌توازن معادل ۲۴۰۶ میلیون مترمکعب روبرو گردد که تمامی فعالیت‌های منطقه را در شرف نابودی قرار خواهد داد و حجم آب‌های زیرزمینی (حجم استاتیک<sup>۱</sup>) را نزدیک به صفر خواهد نمود و از آب‌خوان فقط

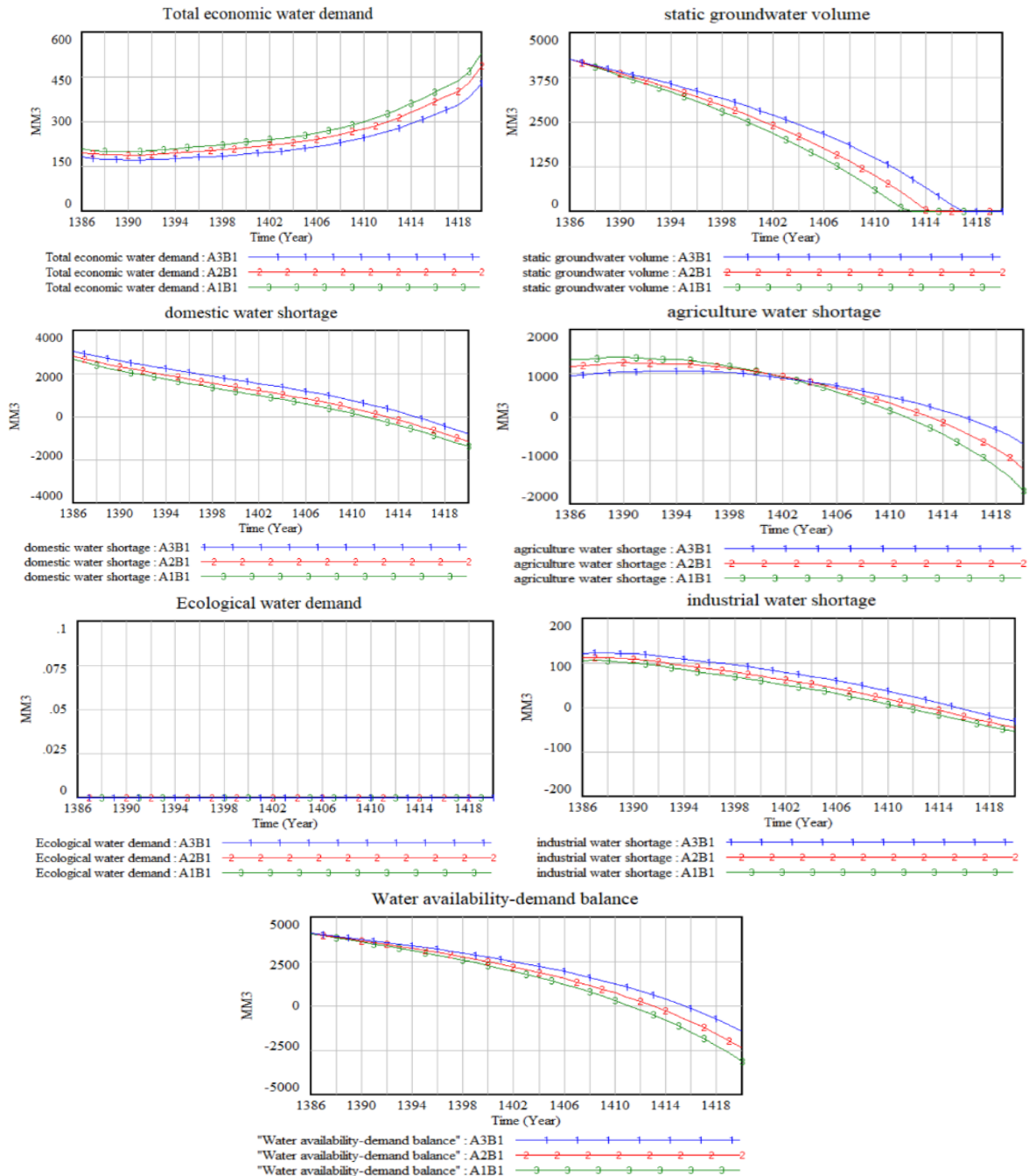
## نتایج شبیه‌سازی

### الگوی رشد پایه

نتایج شبیه‌سازی اثرات کارایی تحت الگوی رشد پایه ( $B_1$ ) در تصویر (۳) ارائه شده‌است. قابل مشاهده‌است که تحت لوای سه سطح کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی، کل تقاضای اقتصادی آب دارای روندی صعودی بوده و در شبیه‌سازی به حداکثر میزان خود خواهد رسید که این امر منجر به تقلیل حجم آب‌های زیرزمینی و همچنین نزول کران‌مندی‌های بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب خواهد شد که افزایش فاصله مابین

مواجهه شده است. تحت اعمال سناریو شرایط مطلوب تغییرات سریع افت آب خوان تا حدی کنترل می گردد و روند نابودی آبخوان برای ۲ سال به تعویق خواهد افتاد و از سال ۱۴۱۴ به ۱۴۱۶ منتقل خواهد شد. نتایج نشان گر آن است که تنها با اعمال سیاست بهبود کارایی مصرف آب بخش کشاورزی، نمی توان تغییر چندانی در وضعیت منطقه ایجاد نمود.

میزان تغذیه‌ی سالیانه (حجم دینامیک<sup>۱</sup>) باقی خواهد ماند (مقدار ذکر شده برای شرایط بحرانی و مطلوب به ترتیب برابر ۳۱۴۹ و ۱۴۶۶ میلیون مترمکعب خواهد بود). همان گونه که قابل مشاهده است حجم آبخوان در شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود به طور میانگین ۱۸/۵۶ درصد فزونی داشته، درحالی که این امر در شرایط بحرانی به طور میانگین با ۱۴/۸۹ درصد تقلیل



تصویر ۳- نتایج شبیه سازی مبتنی بر الگوی رشد پایه و سناریوهای مطرحه (شرایط بحرانی، شرایط موجود و شرایط مطلوب)

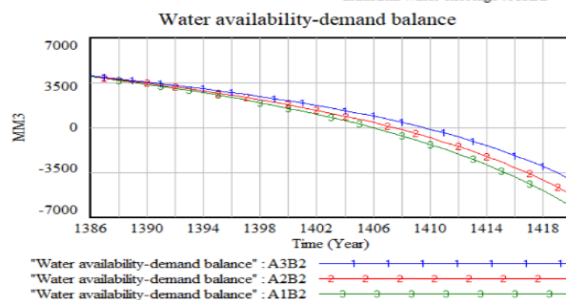
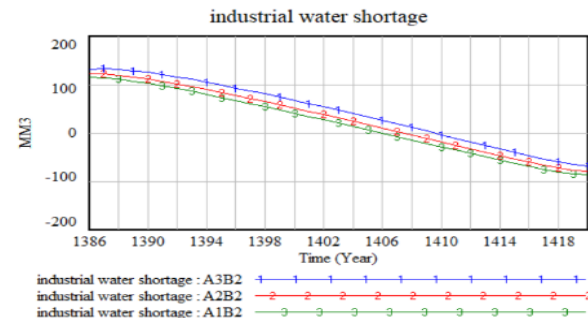
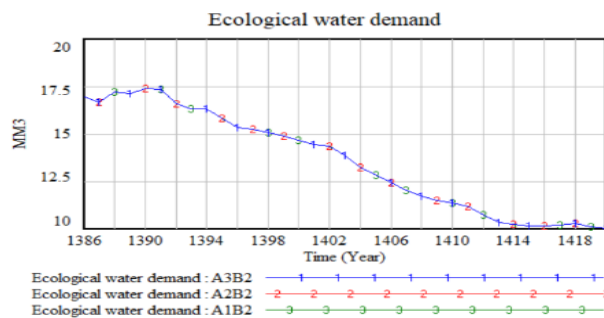
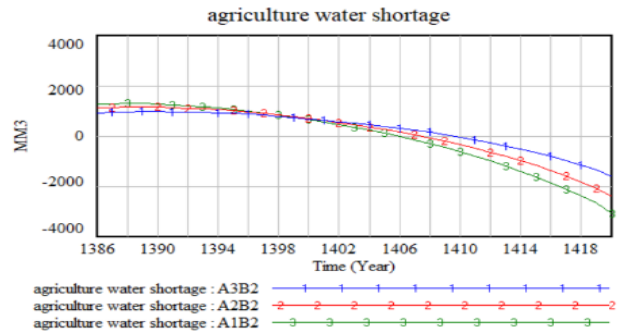
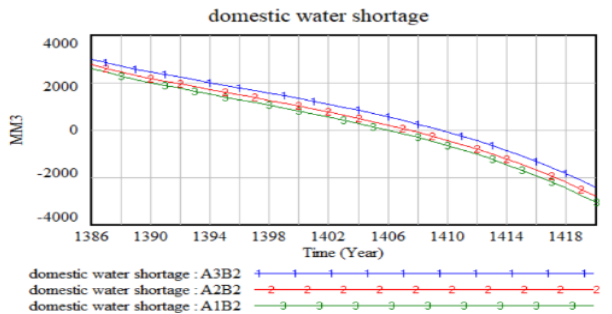
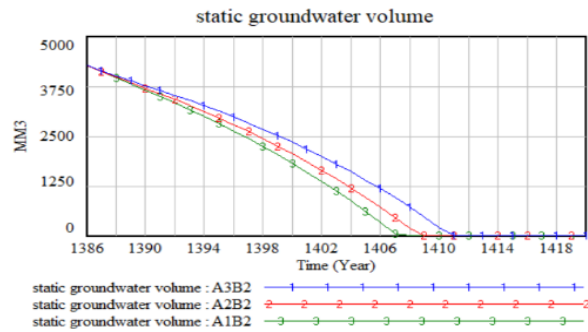
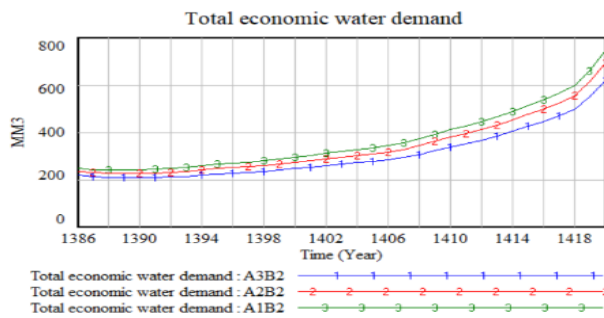
درمورد کمبود آب در بخش های کشاورزی، صنعت و شرب این امر مشهود است که سناریوهای شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، محدودیت آب را به ترتیب ۵۰/۳۸، ۳۰/۷۲ و ۴۱/۱۸ درصد تقلیل داده است این درحالی است که سناریو شرایط بحرانی، امر قِلت آب را در بخش های مورد نظر به ترتیب ۱۹/۹۱ و ۱۹/۹۱ درصد فزونی بخشیده است.

درمورد کمبود آب در بخش های کشاورزی، صنعت و شرب این امر مشهود است که سناریوهای شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، محدودیت آب را به ترتیب ۵۰/۳۸، ۳۰/۷۲ و ۴۱/۱۸ درصد تقلیل داده است این درحالی است که سناریو شرایط بحرانی، امر قِلت آب را در بخش های مورد نظر به ترتیب ۱۹/۹۱ و ۱۹/۹۱ درصد فزونی بخشیده است.

الگوی رشد کمینه

داشته‌است. علاوه بر مطالب ذکر شده افزایش تقاضا منجر به تخلیه بیشتر پس‌آب‌ها و در نتیجه تقلیل کیفیت منابع آب زیرزمینی خواهد شد که این امر خود کاهش دسترسی را در پی خواهد داشت. از سویی لازم به توجه است که رشد محدودیت آب در بخش‌های اجتماعی - اقتصادی خود ناشی از پدید آمدن بخشی جدید با عنوان حق‌آبه‌ی بخش محیط‌زیستی می‌باشد که در سناریو حاضر ۲۰ درصد حجم آب‌های تجدیدپذیر را در بر می‌گیرد که این خود تقلیل رشد اقتصادی و بروز محدودیت بیشتر را در پی خواهد داشت (تصویر ۴) و در صورت عدم رعایت حق‌آبه‌ی مزبور رشد فروچاله‌ها، نشست اراضی و نابودی اکوسیستم منطقه قریب‌الوقوع خواهد بود.

در الگوی رشد کمینه ( $B_2$ ) تقریباً رفتار مشابهی با الگوی رشد پایه مشاهده می‌گردد با این تفاوت که به دلیل رشد تقاضا، تخلیه‌ی منابع آب زیرزمینی با سرعت بیشتر صورت خواهد گرفت و مقادیر محدودیت‌ها در سه بخش کشاورزی، شرب و خدمات افزایش خواهند یافت. این امر مشهود است که به دلیل عدم وجود توازن در آب‌خوان (۵۳۱۲ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۲۰) و تقلیل حجم استاتیک مخازن مزبور تا حد صفر، در سال‌های مابعد ۱۴۰۸، ادامه‌ی فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی در محدوده‌ی مورد نظر با معضل روبرو خواهند شد. شرایط ذکر شده در مورد محدودیت هرکدام از بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت مابین دو سناریو به ترتیب برابر  $۸۴/۰۴$ ،  $۶۳/۶۸$  و  $۷۰/۳۱$  درصد رشد



شرب، این امر مشهود است که سناریو شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، محدودیت آب را به ترتیب ۹۹/۲۳، ۹۹/۹۸، ۹۹/۳۴ درصد تقلیل داده است این درحالی است که سناریو شرایط بحرانی، امر قِلت آب را در بخش‌های مورد نظر به ترتیب ۹۷/۵۶، ۷۸/۰۱، ۷۷/۹۴ فزونی بخشیده است.

#### الگوی رشد بیشینه

الگوی رشد بیشینه ( $B_4$ ) این امکان را در اختیار سیاست‌گذاران قرار می‌دهد که با کنترل تقاضا و اتخاذ شیوه‌هایی چون افزایش تغذیه مصنوعی آب‌خوان (۴۰ درصد) و رشد تصفیه‌ی پس‌آب‌های شهری و صنعتی (۶۰ درصد) و همچنین با مددگیری از سناریو مطلوب، تعادل آب‌خوان را احیاء نمایند و اضمحلال تقریبی آن را تا سال ۱۴۴۲ به تعویق اندازند. قابل مشاهده است که تقاضا برای منابع آبی همچنان سیر صعودی دارد اما می‌توان نظاره کرد که میزان تقاضا نسبت به الگوی رشد پایه ۵۶/۲۶ درصد تقلیل یافته است. از سویی محدودیت آب برای هریک از بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت نسبت به الگوی رشد پایه به ترتیب ۹۹/۹۹، ۹۹/۹۹ و ۹۹/۹۹ درصد کاهش یافته است اما با این حال هنوز شب منفی در شبیه‌سازی رخ‌نمایی می‌نماید و محدودیت آب برای هرکدام از بخش‌های ذکر شده وجود دارد که این امر عدم توازن مابین عرضه و تقاضا را پدید می‌آورد و رشد اقتصادی و شکوفایی محدوده‌ی مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. براین اساس حرکت به سوی ایجاد ارزش افزوده‌ی فزون‌تر و رشد کارایی در هریک از بخش‌های اقتصادی از الزامات امر است. از سویی حجم استاتیک آب‌خوان نسبت به الگوی رشد پایه فزونی یافته است (طی اتخاذ سناریو مطلوب) بگونه‌ای که از صفر به ۱۸۷۲ میلیون متر مکعب در سال ۱۴۲۰ ارتقاء خواهد یافت و این شرایط هنگامی رقم خواهد خورد که هیچ‌گونه استحصال از منابع ورودی از طریق تغذیه مصنوعی صورت نگیرد و حق‌آبه‌ی ۳۵/۶۳ میلیون مترمکعبی (با ضریب ۷۰ درصدی از آب‌های تجدیدپذیر) بخش محیط‌زیستی به رسمیت شناخته شود. قابل توجه است که اتخاذ سناریو شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، تخلیه‌ی کامل آب‌خوان را برای مدت ۱۲ سال به تعویق خواهد انداخت (تصویر ۶).

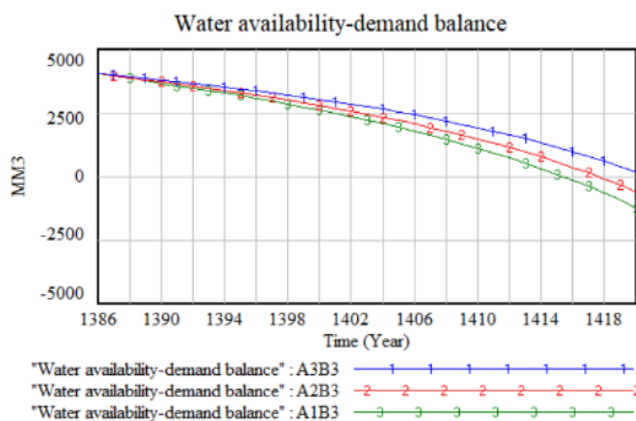
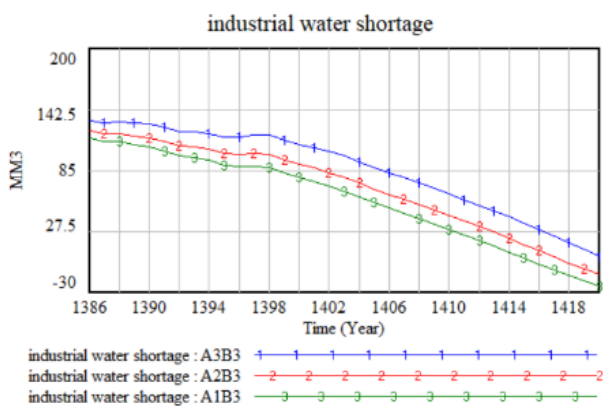
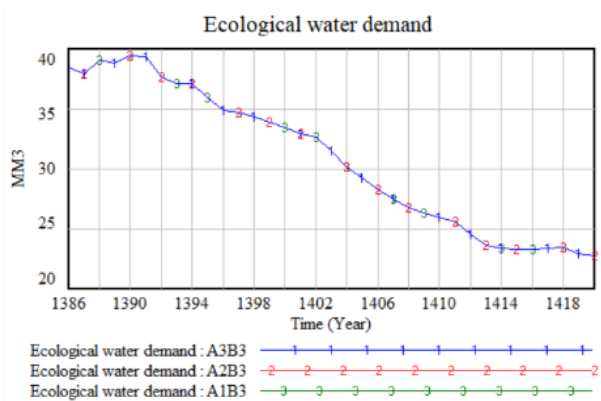
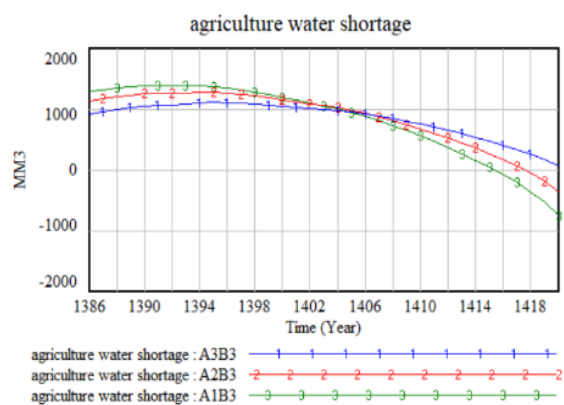
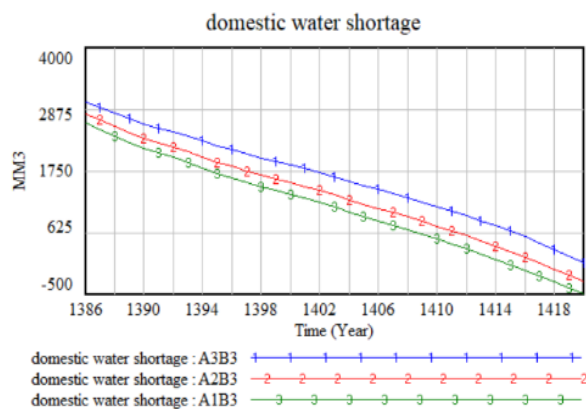
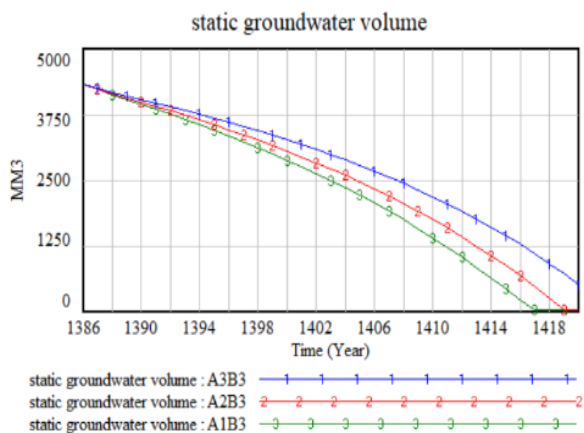
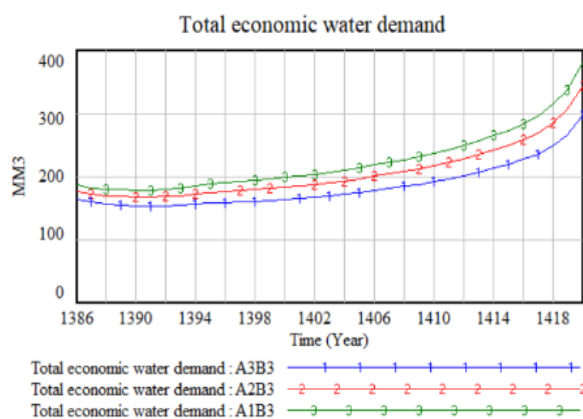
نگاهی اجمالی به کمبود آب مبین این حقیقت است که در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب، سناریو شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، محدودیت آب را به ترتیب ۴۱/۵۳، ۸۸/۷۴ و ۸۸/۷۴ درصد تقلیل داده است این درحالی است که سناریو شرایط بحرانی، امر قِلت آب را در بخش‌های مورد نظر به ترتیب ۴۵/۸، ۵۴/۸۱ و ۵۴/۸۴ فزونی بخشیده است.

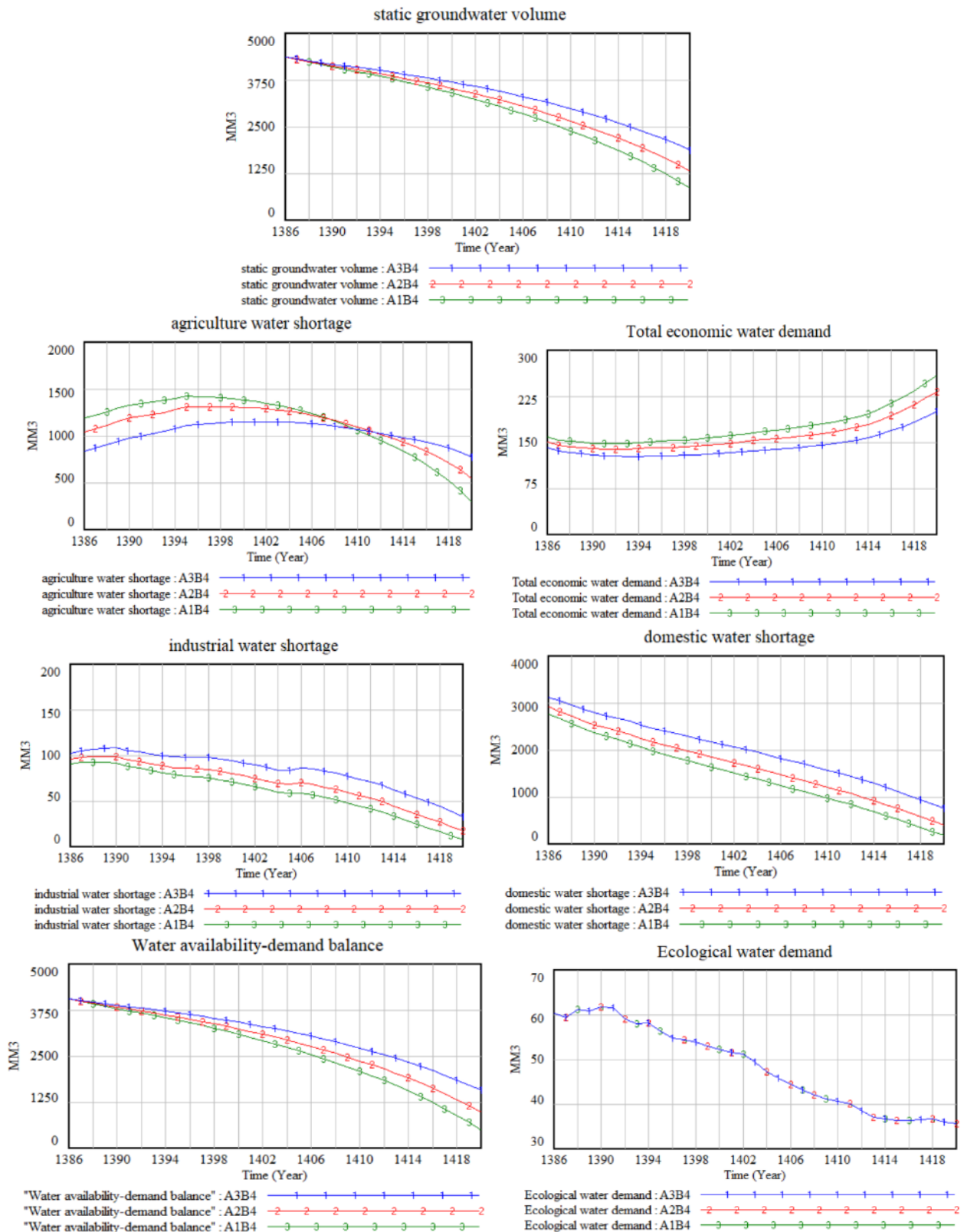
همان‌گونه که قابل مشاهده است حجم آب‌خوان در شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود به‌طور میانگین ۱۰/۷۵ درصد فزونی داشته، درحالی که این امر در شرایط بحرانی به‌طور میانگین با ۷/۷۷ درصد تقلیل مواجه شده است. تحت اعمال سناریو شرایط مطلوب تغییرات سریع افت آب‌خوان تا حدی کنترل می‌گردد و روند نابودی آب‌خوان برای ۲ سال به تعویق خواهد افتاد. درمورد کمبود آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب این امر مشهود است که سناریوهای شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، محدودیت آب را به ترتیب ۳۳/۲۵، ۱۳/۱۸ و ۱۳/۱۸ درصد تقلیل داده است این درحالی است که سناریو شرایط بحرانی، امر قِلت آب را در بخش‌های مورد نظر به ترتیب ۲۷/۵، ۸/۹۵ و ۸/۹۵ فزونی بخشیده است.

#### الگوی رشد متوسط

در الگوی رشد حاضر ( $B_3$ ) سعی گردیده تا با کاهش حداقلی فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی، مهار آب‌های سطحی و تغذیه‌ی مصنوعی آب‌خوان با ضریب ۲۰ درصد و همچنین رشد ۳۰ درصدی تصفیه‌ی پس‌آب‌های شهری و صنعتی، شرایط پیش‌رو مورد بررسی قرار گیرد. قابل مشاهده است که تقاضا برای منابع آبی همچنان سیر صعودی دارد اما می‌توان نظاره کرد که میزان تقاضا نسبت به الگوی رشد پایه ۳۵/۳ درصد تقلیل یافته است. از سویی محدودیت آب برای هریک از بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت نسبت به الگوی رشد پایه به ترتیب ۷۰/۱۷، ۷۶/۵۹ و ۷۰/۳۶ درصد کاهش یافته است اما هنوز محدودیت آب برای هرکدام از بخش‌های ذکر شده وجود دارد که این امر عدم توازن مابین عرضه و تقاضا را پدید می‌آورد که خود سبب نابودی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی در آب‌خوان همدان - بهار خواهد شد. از سویی حجم استاتیک آب‌خوان نسبت به الگوی رشد پایه فزونی یافته است بگونه‌ای که از صفر به ۴۰/۱۸ میلیون متر مکعب در سال ۱۴۲۰ ارتقاء خواهد یافت و این شرایط هنگامی رقم خواهد خورد که هیچ‌گونه استحصال از منابع ورودی از طریق تغذیه مصنوعی صورت نگیرد و حق‌آبه‌ی ۱۷/۴۳ میلیون مترمکعبی (با ضریب ۲۰ درصدی از آب‌های تجدیدپذیر) بخش محیط‌زیستی به رسمیت شناخته شود (اشاره به این نکته ضروری است که در سال ۱۴۲۰ حجم استاتیک آب‌خوان با بکارگیری سناریو شرایط مطلوب به ۵۰/۱ میلیون مترمکعب خواهد رسید). اتخاذ سناریو شرایط مطلوب نسبت به شرایط موجود، تخلیه‌ی کامل آب‌خوان را برای مدت ۶ سال به تعویق خواهد انداخت (تصویر ۵).

درباره‌ی کمبود آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و





تصویر ۶- نتایج شبیه سازی مبتنی بر الگوی رشد بیشینه و سناریوهای مطروحه (شرایط بحرانی، شرایط موجود و شرایط مطلوب)

پویایی ها و پیچیدگی های نهفته در مسائل آشکار و متغیرهای تأثیرگذار، شناسایی گردند. آبخوان همدان - بهار به سبب مجاورت بخش های کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی و روستایی (رقابت برای استحصال منابع آب زیرزمینی) و تقلیل جریان های

### نتیجه گیری کلی

ایجاد نگرش سیستمی در تحلیل مسائل، شناختی همه جانبه و درکی دقیق از چالش ها را فراهم می آورد. چنین رویکردی در شناخت معضلات مرتبط با آب این امکان را ایجاد می نماید که

آب‌خوان در اختیار سیاست‌گذاران قرار می‌دهد. در این راه الگوی رشد بیشینه با نگاهی به افزایش کارایی مصرف، تقلیل دفع پس‌آب‌ها و تصفیه‌ی آنان در بخش صنعت و شرب و همچنین تغذیه‌ی مصنوعی آب‌خوان، این امکان را فراهم می‌آورد که تخصیص حق‌آبه‌های محیط زیستی تنها اثری کاهشی (و نه منفی) بر توسعه‌ی اقتصادی - اجتماعی منطقه داشته‌باشد و از نابودی فعالیت‌های اقتصادی جلوگیری نماید. براین اساس مباحثی چون تأمین امنیت انتظارات صاحبان حق‌آبه‌ها، انعکاس هزینه‌های فرصت در تخصیص، لحاظ ارزش‌های جمعی (اجتماعی) مرتبط با آب، برابری، مقبولیت سیاسی و عمومی، کارایی، پایداری و امکان‌پذیری ساختاری می‌توانند نقشی کلیدی را جهت پیاده‌سازی الگوی رشد مذکور ایفا نمایند. لازم به توجه است که یافته‌های حاضر با نتایج ارائه شده توسط ( Lei and Cao, 2012; Liu and Sun, 2006; Wei et al, 2012) همراستا است. با در نظر گرفتن مشکلات و محدودیت‌های مدیریت منابع آب در حوضه آب‌خوان همدان - بهار می‌توان سیاست‌هایی چون بازنگری در سیاست رشد جمعیتی، ترفیع و توانمند کردن جوامع روستایی و کشاورزی، بازنگری در الگوی کشت، افزایش قیمت انرژی و آب بدون تحمیل فشار مضاعف به کشاورزان در کوتاه مدت، ایجاد شرکت‌های تعاونی کشاورزی، ایجاد بازار آب و ایجاد حساب‌های پس‌انداز آب، تبدیل مدیریت واکنشی به مدیریت فعال، توازن تلاش‌های مدیریتی و افزایش دانش محیط‌زیستی جامعه را جهت دستیابی به اهداف بلند مدت و ایجاد تعادل در حوضه مزبور مد نظر قرار داد. از سویی با توجه به سیاست‌های بیان شده، به‌منظور نتیجه‌گیری و آرایه راهکار در راستای رفع معضلات مرتبط با تخصیص آب، اقداماتی چون، کاهش فشار در شبکه، اصلاح سیستم توزیع و لوله‌کشی آب، استفاده از قطعات و وسایل کاهنده‌ی مصرف آب، نرخ‌گذاری، افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت، تغذیه‌ی مصنوعی آب‌خوان، تصفیه‌ی پس‌آب‌ها و آموزش می‌تواند در کوتاه مدت نقشی مهم در احیای آب‌خوان ایفا نماید که در این راه بهره‌گیری از ابزارهای قانونی، فنی و مالی امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

## REFERENCES

- Agriculture Organization of Hamadan Province. (2016). Agricultural features of the province. (in Farsi). Available at: [http://hamedan.agri-jahad.ir/sima/ostan-\(1\).aspx](http://hamedan.agri-jahad.ir/sima/ostan-(1).aspx)
- Ahmad, S. and Simonovic, S.P. (2000). System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14 (3), 190-198.
- Akhtar, M. K., Wibe, J., Simonovic, S. P. and MacGee, J. (2013). 'Integrated assessment model of society-biosphere-climate-economy-energy system'. *Environmental modeling & Software*, 49, 1-21.
- Bebbington, A., Humphreys Bebbington, D. and Bury, J. (2010). Federating and defending: Water, territory and extraction in the Andes. In: R. Boelens, D. Getches & A. Guevara, *Out of the mainstream. Water rights, politics and identity*, 307-327.
- Bjornlund, H., Parrack, C. and De Loë, R. C. (2015). Segmenting the Urban and Rural Population of

ورودی (منجمله بارش‌های جوی و آب‌های سطحی) از چالش‌های عدیده‌ای برخوردار است. از سویی بر مبنای سیاست‌گذاری‌های کلان کشوری و قوانین اصلاحی ماده ۲۷ و ۲۸ قانون توزیع عادلانه آب کشور مصوب سال ۱۳۸۴ و شیوه‌نامه‌ی اجرایی آن در سال ۱۳۸۵، امر بازتخصیص منابع آب در کشور به‌رسمیت شناخته شده‌است و براین اساس باید در مسیر افزایش ارزش اقتصادی آب و مدنظر قرار دادن حق‌آبه‌های محیط زیستی که مصوب برنامه‌ی پنجم و ششم توسعه است اقدامات لازم صورت گیرد. بدین‌لحاظ در مطالعه‌ی حاضر با بهره‌گیری از شبیه‌سازی سیستم‌های پویا، مدلی جهت بررسی آثار بلندمدت، افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی و الگوهای رشد متباین که پشتیبانی‌کننده‌ی، توسعه‌ی پایدار آب‌خوان همدان - بهار می‌باشند، تدوین گردید. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر علاوه بر مدل‌سازی چرخه‌ی آب، با افزودن عوامل اقتصادی و ساختارهای تصمیم‌ناشی از انگاره‌ها و مدل‌های ذهنی بازیگران مسئله، مدل ترکیبی عینی - ذهنی فراهم آمد که شناخت لایه‌های پنهان موجود را تسهیل می‌نمود. براین مبنای سناریو شرایط بحرانی، شرایط موجود و شرایط مطلوب انتخاب گردید که در چهار الگوی رشد پایه، کمینه، متوسط و بیشینه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مبین این امر است که منابع موجود جهت ادامه‌ی روند فعلی (فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی) مکفی نمی‌باشند و ادامه‌ی روند حاضر تخریب کامل آب‌خوان را در پی خواهد داشت، این درحالی است که با تخصیص آب به بخش محیط‌زیستی محدودیت برای بخش‌های اقتصادی - اجتماعی شدت بیشتری خواهد یافت. با این حال رشد پایین‌تر فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی و رشد مصرف بهینه مابین کاربران بخش‌های مختلف اقتصادی این امکان را فراهم می‌آورد که حفظ آب‌خوان مقدور گردد ولی نمی‌توان این امر را کتمان نمود که رفاه کاربران با معضل مواجه خواهد شد و کاهش خواهد یافت. در تحقیق حاضر الگوی رشد بیشینه، ترکیبی بهینه از رشد اقتصادی - اجتماعی و حفظ حق‌آبه‌های محیط زیستی را فراهم می‌آورد که راهبردی عمل‌گرا را جهت افزایش ظرفیت تحمل





A7%D8%B7%D9%84%D8%A7%D8%B9%D8%A7%D8%AA%DB%8C/InformationServicesDetail?InformationServicesID=3486

- Wei, S., Yang, H., Song, J., Abbaspour, K. and Xu, Z. (2012). System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *European Journal of Operational Research*, 221, 248–262.
- World Bank. (2017). Environmental Flows in Water Resources Policies, Plans, and Projects. Report from World Bank, Washington DC, USA. [http://site.resources.worldbank.org/INTWAT/Resources/Env\\_Flows\\_Water\\_v1.pdf](http://site.resources.worldbank.org/INTWAT/Resources/Env_Flows_Water_v1.pdf).
- Xu, Z.X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Zhang, X.W.

(2002). Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management*, 16, 239–261.

- Zhang, X.H., Zhang, H.W., Chen, B., Chen, G.Q. and Zhao, X.H. (2008). Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city. *Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 12, 2328–2336.
- Zwarteveen, M. Z. and Boelens, R. (2014). Defining, researching and struggling for water justice: some conceptual building blocks for research and action. *Water International*, 39(2), 143-158. DOI:10.1080/02508060.2014.891168