



Evaluation of Management Policies to Simultaneously Maintain Groundwater Resources and Farmers' Livelihoods Using the System Dynamics and Game Theory

M. Hashemi¹, H. Mazandarani Zadeh^{2*},
P. Daneshkare Arasteh³, and M. Zarghami⁴

Abstract

The water crisis caused by rapid population growth, unbalanced economic development, climate change, and inefficient water resources management is recognized as the most significant threat in the recent century. Groundwater resources, as one of the most important water resources available, have faced many challenges in recent years so that currently 404 out of 609 plains of the country have been declared as prohibited plains. The agricultural sector, as the main consumer of groundwater, has played a major role in creating this crisis. In this research, the impacts of different non-strategic crops on groundwater level and farmers' income have been investigated using long term system dynamics. The Qazvin Aquifer, which has been declared a prohibited plain since 1962, was picked as a case study. After collecting and preparing the time series data, the 15-year causality model was built up using Vensim PLE software, which then was calibrated using a genetic algorithm. The results showed that the transfer of water from Taleghan dam to Qazvin Plain helped to reduce ten meters of drawdown during a 15-year period. Also the impact of 17 different crops on groundwater level and farmers' net income were researched for Qazvin Plain. The results showed that farmers' income is most sensitive to grape cropping area with a high economic water footprint, while groundwater level is most affected by the wheat cropping area. Next, the influence of the removal of non-strategic crops with high water demands was evaluated in the plain and removing non-strategic crops was selected as optimal scenario by applying four conflict resolution methods in symmetric conflicts.

Keywords: Groundwater Drawdown, Farmers' Income, Qazvin Aquifer, Dynamic System.

Received: July 2, 2019

Accepted: October 9, 2019

ارزیابی سیاست‌های مدیریتی حفظ همزمان منابع آب زیرزمینی و معیشت کشاورزان با استفاده از پویایی سیستم و نظریه بازی‌ها

معصومه هاشمی^۱، حامد مازندرانی‌زاده^{۲*}، پیمان دانشکار
آراسته^۳ و مهدی ضرغامی^۴

چکیده

بحران آب ناشی از رشد سریع جمعیت، توسعه اقتصادی نامتوازن، تغییر اقلیم و همچنین مدیریت ناکارآمد منابع آب مهم‌ترین تهدید در قرن حاضر شناخته شده است. منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب در دسترس، در سال‌های اخیر با چالش‌های زیادی مواجه شده است، به گونه‌ای که از ۶۰۹ دشت کشور، ۴۰۴ دشت به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است. بخش کشاورزی به عنوان مهم‌ترین مصرف‌کننده منابع آب دشت‌ها، نقش زیادی در شکل‌گیری این بحران داشته است. در این تحقیق نقش محصولات زراعی غیر استراتژیک مختلف در افت سطح آبخوان و همچنین بر درآمد کشاورزان در دراز مدت با استفاده از مدل سیستم دینامیک بررسی شده است. آبخوان دشت قزوین که از سال ۱۳۴۲ به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. بدین منظور بعد از جمع‌آوری سری زمانی داده‌ها و رفع نقایص آن، مدل شبیه‌سازی ۱۵ ساله علت و معلولی با استفاده از نرم‌افزار Vensim PLE توسعه یافت و با استفاده از الگوریتم ژنتیک کالیبره گردید. نتایج نشان داد آب انتقالی از سد طالقان به دشت قزوین باعث کاهش مقدار افت سطح آبخوان در طول ۱۵ سال به اندازه ۱۰ متر شده است. حساسیت سطح ایستابی و درآمد خالص کشاورزان به تغییرات سطح زیر کشت ۱۷ محصول در دشت قزوین بررسی گردید و نتایج نشان داد درآمد کشاورزان بیشترین حساسیت را به کشت انگور با ردپای بالای اقتصادی دارد و از طرف دیگر سطح ایستابی نیز بیشترین حساسیت را به کشت محصول گندم دارد. در ادامه اثرات حذف برخی محصولات زراعی با نیاز آبی بالا و غیراستراتژیک از الگوی کشت بر درآمد کشاورزان و سطح ایستابی ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد سناریو عدم کشت محصولات زراعی غیراستراتژیک به‌عنوان سناریوی تعادلی توسط هر چهار روش حل اختلاف در حالت متقارن انتخاب گردید.

کلمات کلیدی: افت سطح ایستابی، درآمد کشاورزان، آبخوان دشت قزوین، پویایی سیستم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۷/۱۷

1- Ph.D. Graduate of Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: hashemitame@yahoo.com

2- Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

3- Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: arasteh@eng.ikiu.ac.ir

4- Adjunct Professor, Institute of Water & Energy, Sharif University of Technology. Email: mzarzhami@tabrizu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۴- استاد مدعو انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

جامع به نام آب کانادا برای کشورهای کانادا، آمریکا و حوضه دریاچه گریت با استفاده از پویایی سیستم به بررسی منابع آب از نظر کیفی و کمی شامل هفت بخش جمعیت، کشاورزی توسعه یافته، تولیدات غذایی، ارزش افزوده، تولید انرژی، استفاده از منابع تجدیدناپذیر و پایداری آلودگی پرداختند. مدل کالیبره شده برای شبیه سازی ۱۰۰ سال طی دوازده سناریو به منظور بررسی مقدار آب تازه در دسترس، رشد اقتصادی، رشد جمعیت، تولید انرژی و تولید غذا به کار گرفته شد.

Nasari et al. (2013) به بررسی رفتار آبخوان دشت تبریز در برابر تنش های مختلف و تعیین حد مجاز بهره برداری از آبخوان با استفاده از پویایی سیستم پرداختند. در این تحقیق با تعریف محدوده مجاز افت سطح ایستابی و تخصیص میزان آب استحصالی تحت این شرایط، میزان بهره برداری مطمئن از آبخوان مشخص شد. Alami et al. (2014) به بررسی اثرات سد مخزنی گلک در جمع آوری جریان های سیلابی در زمان های بارندگی، تأمین نیازهای منطقه و همچنین تغذیه آبخوان آبرفتی دشت پایین دست با استفاده از پویایی سیستم پرداختند. نتایج حاصل از شبیه سازی ۳۵ ساله نشان داد احداث سد و اجرای پروژه تغذیه مصنوعی، باعث بهبود ذخایر منابع آب زیرزمینی منطقه شده است. همچنین یافته های این مطالعه نشان از توانایی Vensim مدل سازی اثر سیاست های بهره برداری و مدیریتی مختلف دارد. در تحقیق دیگری Mehr Azar et al. (2016) از مدل پویایی سیستم بر اساس حلقه های علت و معلولی برای شبیه سازی سیستم جامع منابع آب دشت هشتگرد به منظور مدیریت، برنامه ریزی و ارزیابی سیاست های مدیریت منابع آب استفاده شد. نتایج صحت سنجی مدل نشان داد این مدل می تواند به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم در ارزیابی آثار تصمیم ها و اقدام های مختلف بر سیستم های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی به ویژه در شرایط بحران آب مورد استفاده قرار گیرد. بررسی Darvishi et al. (2018) بر روی تأثیر تغییر الگوی کشت بر منابع آب زیرزمینی دشت مهران با استفاده از روش پویایی سیستم تحت سناریوهای مختلف تغییر قیمت انرژی نشان داد سناریوی تغییر الگوی کشت از یونجه و کلزا همراه با افزایش ۱۰۰ درصدی تعرفه انرژی، دارای بیشترین تأثیر مثبت بر آبخوان است. همچنین تغییر سطح زیر کشت از یونجه به ذرت همراه با افزایش تعرفه انرژی به میزان ۵۰ درصد قیمت فعلی، تا حدودی تعادل در سطح آب زیرزمینی دشت را به دنبال دارد. Ebrahimi Sarindizaj and Zarghami (2018) تأثیر سیاست های افزایش بهره وری کشاورزی، کاهش سطح زیر کشت آبی، تغییر الگوی کشت و انتقال آب از رودخانه های ارس و زاب از دیدگاه پویایی سیستم ها به منظور احیاء دریاچه ارومیه بررسی کردند. نتایج نشان داد هیچ یک از طرح ها به صورت منفرد، در احیاء دریاچه ارومیه مؤثر نیستند و از طرفی سیاست افزایش بهره وری آبیاری، تغییر الگوی کشت و کاهش سطح زیر کشت بیشترین تأثیر در افزایش

آب ارتباط جدایی ناپذیری با جنبه های مختلف زندگی انسان شامل امنیت غذایی، سلامت، رشد اقتصادی و تعادل اکولوژیکی دارد. مدیریت و تصمیم گیری در مورد منابع آبی از اهمیت زیادی برخوردار است و این اهمیت زمانی بیشتر می شود که کمبود آب به عنوان یکی از چالش برانگیزترین مسائل زیست محیطی در قرن ۲۱ معرفی شده است (Brown, 1999).

حفظ و نگهداری منابع آب زیرزمینی برای سازگاری و کاهش تنش های ناشی از کمبود آب در آینده حائز اهمیت است. در سال های اخیر با افزایش خشک سالی و اثرات ناشی از تغییر اقلیم، فشار وارد بر منابع آب زیرزمینی از سوی بخش کشاورزی بیشتر شده است. در بسیاری از دشت های کشور افت شدید سطح ایستابی و به همراه آن نشست زمین قابل مشاهده است. چاره اندیشی و حرکت به سوی مدیریت فراگیر و همکاری همه بخش های درگیر در مسأله مدیریت منابع آب، از لوازم اصلی نیل به هدف است. با توجه به درهم تنیدگی سیستم های منابع آب و سایر سیستم های اقتصادی و اجتماعی، برای تحلیل آن به نگرشی جامع، سیستمی و آینده نگر نیاز است، به طوری که تمام جنبه های اثرگذار و بازخوردهای اجزا بر یکدیگر را به خوبی شبیه سازی کند و در پایش وضعیت حال و آینده راهبردها و گزینه های مدیریتی مؤثر واقع شود (Winz et al., 2008; Alami et al., 2013; Mehr Azar et al., 2016). یکی از ابزارهای مفید در نگرش به هم پیوسته در شبیه سازی ها و پیش بینی ها، فن مبتنی بر نگرش پویایی سیستم است که نخستین بار توسط فاستر در دهه ۶۰ میلادی ارائه شد. روش پویایی سیستم قابلیت استفاده در تحقیقات پویا و بلندمدت را دارد و روابط بین مسائل اقتصادی- اجتماعی، محیط زیست، منابع آب، کنترل سیلاب و کاهش خطرات سوانح طبیعی را به خوبی بیان می کند (Chen et al., 2014; Sharawat et al., 2014; Arshadi et al., 2014; Fotookian et al., 2017; Ebrahimzadeh et al., 2019).

Rahimikhoob and Sotoodehnia (2015) با استفاده از یک مدل جامع بر مبنای رویکرد پویایی سیستم به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم های منابع آب و کشاورزی پرداختند. نتایج مربوط به شبیه سازی طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۲۰ نشان داد که بخش کشاورزی در مقایسه با دو بخش شرب و صنعت نسبت به پدیده تغییر اقلیم آسیب پذیرتر است. استفاده از پویایی سیستم برای مدیریت جامع آب شهری تبریز به منظور شبیه سازی اثر کمبود آب در آینده، نشان از توانایی بالای پویایی سیستم در مدیریت جامع آب شهری دارد و می تواند به عنوان ابزار قوی مدیریتی در سازمان آب مورد استفاده قرار گیرد (Zarghami and Akbariye, 2012). Simonovic et al. (2004) با ارائه مدلی

تراز دریاچه دارد.

بنابراین در این تحقیق با هدف بررسی آثار حذف محصولات غیر استراتژیک و به منظور انتخاب تصمیمی که مطلوبیت کشاورزان و دولت را در یک حد متعادلی تأمین کند، از نظریه بازی‌ها در حالت متقارن و غیرمتقارن استفاده شده است. خروجی این مدل می‌تواند برای اتخاذ تصمیم تعادلی با وزن‌های مختلف به منظور مدیریت منابع آب، تأمین امنیت شغلی و اقتصادی به مدیران کمک کند. بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بررسی و انتخاب نقطه تعادل میان دو ذینفع، بر اساس حذف محصول‌های غیر استراتژیک در یک بازه میان مدت ۱۵ ساله، تاکنون مدنظر محققین قرار نگرفته است. همچنین در این تحقیق آثار اجرای سناریوی پیشنهادی سازمان جهاد کشاورزی در دشت قزوین بر معیشت کشاورزان و تراز آب زیرزمینی دشت مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن اینکه حساسیت آبخوان و اقتصاد کشاورزی منطقه با استفاده از آنالیز حساسیت برای محصولات عمده ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان قزوین در حوضه مرکزی ایران با مساحتی معادل ۱۵۸۲۱ کیلومتر مربع بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. محدوده مطالعاتی در نیمه شمالی و غربی حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۴۴۹۲/۳۷ و ۵۰۵۹/۳ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع محدوده نیز به ترتیب ۲۹۰۲ و ۱۱۳۱ متر است. شکل ۱ موقعیت منابع آبی موجود در دشت، تقسیم‌بندی آب و هوایی و سطح زیر کشت منطقه را نشان می‌دهد. منابع آب سطحی دشت قزوین شامل رودخانه‌های فصلی و همچنین سهمیه آب تخصیص یافته از سد طالقان است.

دشت قزوین یکی از دشت‌های مستعد کشور برای تولید محصولات کشاورزی است که همانند بسیاری از دشت‌های کشور دارای بیلان منفی آب زیرزمینی است. این منطقه از رتبه مناسبی در تولید محصولات کشاورزی و باغی در کشور برخوردار است. بیش از ۹۳ درصد از مصارف آب این دشت مربوط به بخش کشاورزی است که با توجه به محدودیت منابع آب سطحی و فصلی بودن این منابع، بخش عمده آب آبیاری از منابع زیرزمینی استحصال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان می‌دهد، سالانه حدود ۳۱۴ میلیون مترمکعب مازاد بر ظرفیت از آب‌های زیرزمینی این دشت برداشت می‌شود که به‌طور میانگین باعث افت سالانه ۱/۳ متر سطح ایستابی شده است (Abkhan Consulting Engineers, 2011).

اغلب مسائل تصمیم‌گیری در مدیریت منابع طبیعی شامل اهداف متضاد است، اهدافی مانند بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی خسارت زیست‌محیطی اهداف متضادی هستند که در اغلب پروژه‌ها به چشم می‌خورد (Salazar et al., 2007). مسائل چندهدفه برخلاف مسائل تک‌هدفه، شامل مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه است که مجموعه پارتو نامیده می‌شود. در چنین شرایطی تصمیم‌گیران نیازمند یافتن یک‌راه حل توافقی هستند، به نحوی که به یک تعادل اجتماعی منجر شود. نظریه بازی‌ها یک علم شناخته‌شده در حل اختلاف است. (Haji Rajabi and Mazandarani Zadeh (2018) تقابل آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت زیست‌محیطی تعیین پارامترهای بهینه طراحی زهکش را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده روش حل تعارض‌ها عمق بهینه نصب زهکش محاسبه شد. در مطالعه Taraghi et al. (2017)، به منظور برقراری تعادل بین دو هدف شامل جلوگیری از افت بیش از حد منابع آب در راستای توسعه پایدار (هدف محیط زیستی) و بیشینه‌سازی سود خالص کشاورزان (هدف اقتصادی) در کوتاه مدت از روش‌های حل تعارض در محدوده مطالعاتی ارومیه استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش وزن هدف زیست‌محیطی، سطح زیر کشت و در پی آن سود خالص کشاورزی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از مطالعه (Asadi et al. (2018 نیز روی آبخوان شهرستان گرگان با استفاده از نظریه بازی‌ها نشان داد میزان برداشت سالانه آب زیرزمینی از میزان تغذیه سالانه بیشتر بوده و تغییرات ذخیره آبخوان منفی است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه با کاهش استخراج آب زیرزمینی برای آبیاری، سطح زیر کشت و درآمد خالص کشاورزان کاهش می‌یابد.

هدف تحقیق حاضر توسعه و بسط مدلی است که با استفاده از پویایی سیستم به شبیه‌سازی منابع آب و اقتصاد کشاورزی دشت قزوین به منظور ارزیابی سیاست‌های مدیریتی بپردازد. در این تحقیق مقایسه سناریوهای عدم کاشت محصولات زراعی غیراستراتژیک با نیاز آبی بالا و ردپای اقتصادی کم، با دو هدف تأمین منافع کشاورزان و دولت، به کمک روش حل اختلاف انجام شده است. به بیان دیگر بازخورد سناریوی عدم کاشت محصولات غیراستراتژیک در یک نگاه میان مدت (به مدت ۱۵ سال) بر دو متغیر مهم درآمد کشاورزان و سطح ایستابی که در تضاد با یکدیگر قرار دارند بررسی شده است. عدم کاشت محصولات غیراستراتژیک در دشت‌های ممنوعه، با توجه به اهمیت کم در امنیت غذایی، از جمله مهم‌ترین مسائلی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. تغییر الگوی کشت باید به گونه‌ای انجام شود که ضمن رعایت حقوق دو ذینفع مهم، کشاورزان و دولت، باعث کاهش تمایل ذینفعان به تعدی از تصمیم و انتخاب تصمیم‌های دیگر شود.

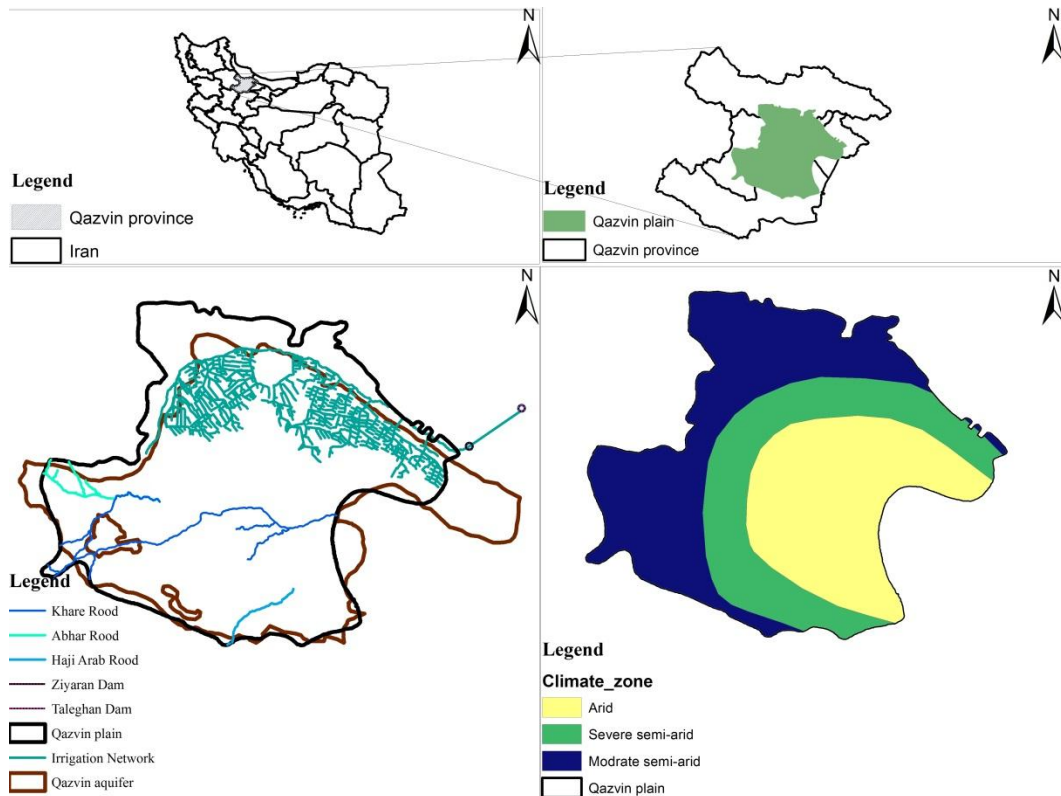


Fig. 1- The location of water resources, climate zone and orchard and farming lands in Qazvin Plain
 شکل ۱- موقعیت منابع آبی، تقسیم‌بندی آب و هوایی و سطح زیر کشت محصولات باغی و زراعی دشت قزوین

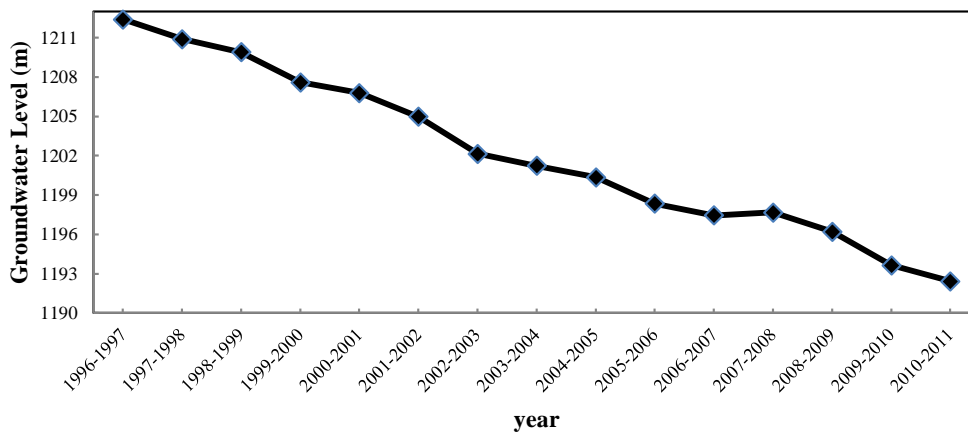


Fig. 2- Changes in annual unit hydrograph of groundwater in Qazvin Aquifer
 شکل ۲- تغییرات سالانه هیدروگراف واحد سطح ایستابی آبخوان دشت قزوین

سیستماتیک بنانهاده شده، برای مطالعه و مدل‌سازی ارتباطات بین اجزاء سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود و هدف آن در اختیار گذاشتن روشی برای آشکار شدن مدل ذهنی تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در یک مسأله است. بازخوردها، متغیر حالت، جریان، تأخیرهای زمانی و رفتار غیرخطی، ضروری‌ترین اجزاء مدل‌سازی پویایی سیستم هستند

۲-۲- پویایی سیستم

پویایی سیستم اولین بار توسط فارستر جهت درک بهتر مسایل راهبردی در سیستم‌های پویای پیچیده معرفی شد (Forrester, 1961). این رویکرد یک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی بازخورد شیء‌گرا است که به‌عنوان روشی که بر اساس تفکر

$$S_{G,t} = \Delta S_{G,t} + S_{G,t-1} \quad (2)$$

که در آن، $\Delta S_{G,t}$ مقدار ذخیره یا تخلیه آبخوان در سال t و $Q_{GI,t}$ به ترتیب مقدار جریان ورودی و خروجی به آبخوان در سال t و $Q_{GO,t}$ مقدار آب موجود در آبخوان در سال t است. مقدار جریان ورودی و خروجی از آبخوان به ترتیب از معادله (۳) و (۴) قابل محاسبه است:

$$Q_{GI,t} = D_{agri,t} \times RC_{agri} + S_R + Re_{TD,t} + Re_{r,t}^G + InFlow_{an}^G + (D_I + D_{Dr}) \times RC_{I,DR} \quad (3)$$

$$Q_{GO,t} = D_I + D_{Dr} + D_{agri,t}^G + E_G + OutFlow_{an}^G + Dr_R \quad (4)$$

که در آن، $D_{agri,t}$ و $D_{agri,t}^G$ به ترتیب مقدار کل نیاز کشاورزی و نیاز کشاورزی تأمین شده از آب زیرزمینی در سال t ، RC_{agri} ضریب آب برگشتی از کشاورزی، S_R مقدار نشت از رودخانه به آبخوان، $Re_{TD,t}$ و $Re_{r,t}^G$ به ترتیب مقدار تغذیه مصنوعی از سد طالقان و مقدار تغذیه آبخوان از بارندگی در سال t ، $InFlow_{an}^G$ و $OutFlow_{an}^G$ به ترتیب جریان ورودی از دیگر آبخوان‌ها و خروجی به دیگر آبخوان‌ها، D_I و D_{Dr} به ترتیب نیاز آبی بخش صنعت و شهری، $RC_{I,DR}$ ضریب آب بازگشتی از شهری و صنعت، E_G تبخیر از آبخوان و Dr_R مقدار زهکشی از آبخوان به رودخانه است.

در معادله‌های ۳ و ۴، برای محاسبه پارامترهای $InFlow_{an}^G$ ، $OutFlow_{an}^G$ ، Dr_R و Dr_R از محاسبات انجام شده توسط شرکت مشاوره آبخوان استفاده شده است (Abkhan Consulting Engineers, 2011)، که مقدار ضریب جریان بازگشتی از کشاورزی، RC_{agri} عدد ۰/۲۶ و برای صنعت و شرب، $RC_{I,DR}$ عدد ۰/۶ بر

که سیستم را برای نحوه پاسخگویی به تغییرات مهیا می‌کند (Forrester, 1997).

۱-۲-۲- توسعه مدل مفهومی

با توجه به مرز انتخاب شده و شناسایی متغیرهای مهم تأثیرگذار در سیستم شامل تقاضای آب، میزان برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی، قیمت و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی مدل مفهومی توسعه داده شد. مدل توسعه داده شده دارای دو زیرسیستم منابع آب و زیرسیستم کشاورزی-اقتصادی است.

۱-۱-۲-۲ زیرسیستم منابع آب

این زیرسیستم شامل دو متغیر حالت، آب زیرزمینی و سطحی است.

الف- متغیر حالت آب زیرزمینی

شکل ۳ به نمایش زیرسیستم آب زیرزمینی می‌پردازد. در این زیرسیستم مقدار آب ذخیره شده در آبخوان، به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است که با میزان جریان ورودی و خروجی به آبخوان مقدار آن تغییر می‌کند و مقدار آن با استفاده از معادله بیلان قابل محاسبه است (معادله ۱).

با استفاده از معادله بازگشتی ذخیره آب (معادله ۲)، مقدار کل آب ذخیره شده در آبخوان در هر سال قابل محاسبه است.

$$\Delta S_{G,t} = Q_{GI,t} - Q_{GO,t} \quad (1)$$

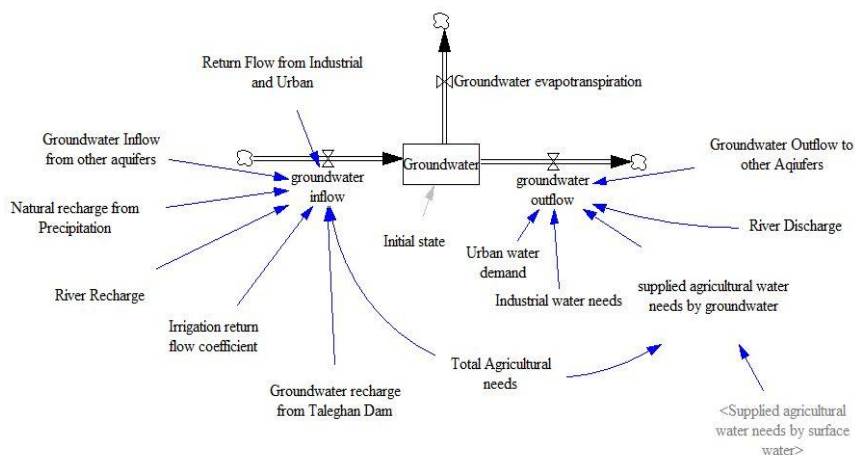


Fig. 3- Stock and flow diagram of Qazvin Aquifer

شکل ۳- نمودار جریان آبخوان دشت قزوین

که در آن، $\Delta S_{S,t}$ مقدار تغییرات ذخیره منابع سطحی، Q_{S0} و Q_{SI} به ترتیب مقدار جریان سطحی ورودی و خروجی از حوضه است (رابطه ۹ و ۱۰).

$$Q_{SI,t} = Al_{Ta,t} \times 0.9 + RF_t + RI \quad (9)$$

$$Q_{S0,t} = OF_S + E_S + D_{agri,t}^S \quad (10)$$

که در آن، $Al_{Ta,t}$ مقدار آب اختصاص یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری قزوین در سال t ، RF_t مقدار رواناب در سال t ، RI مقدار جریان سطحی ورودی از رودخانه‌های بالادست، OF_S جریان سطحی خارج شده از محدوده مطالعاتی به شوره‌زار قزوین، E_S مقدار آب تبخیر شده از آب‌های سطحی و $D_{agri,t}^S$ مقدار جریان سطحی استفاده شده برای مصارف کشاورزی در سال t است.

۲-۱-۲- زیرسیستم کشاورزی - اقتصادی

مهم‌ترین فاکتورهای این زیرسیستم شامل مقدار نیاز آبی، مقدار محصول تولیدشده بخش کشاورزی و درآمد کشاورزان است. نیاز آبی کشاورزی از طریق منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود، به‌گونه‌ای که نیاز آبی ابتدا از آب سطحی و مازاد نیاز از آب زیرزمینی تأمین شود. نمودار جریان زیرسیستم کشاورزی - اقتصادی در شکل ۵ نشان داده شده است.

اساس نظر کارشناسان منظور شده است. مقدار جریان تغذیه از بارندگی و سد طالقان از معادلات (۵) و (۶) محاسبه گردید:

$$Re_{r,t}^G = (r_t \times Ec) \times I \times A_{aq} \quad (5)$$

$$Re_{TD,t} = 0.1 \times Al_{Ta,i} \quad (6)$$

که در آن؛ r_t مقدار بارندگی در دشت قزوین در سال t ، Ec ضریب بارندگی مؤثر ۰/۱۸، I درصد باران نفوذ یافته از بارندگی مؤثر برابر ۴۴٪، A_{aq} مساحت آبخوان و $Al_{Ta,t}$ مقدار جریان تخصیص یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری قزوین است. بنابراین با استفاده از معادله بازگشتی زیر در هر سال سطح ایستابی محاسبه می‌شود:

$$GW_I_t = \frac{S_{G,t}}{A_{aq} \times S} + GW_I_{t-1} \quad (7)$$

که در آن، GW_I_t هیدروگراف واحد سطح ایستابی در سال t و S ضریب ذخیره آبخوان است.

ب- آب سطحی

مقدار آب سطحی در سال t یکی دیگر از متغیرهای حالت است که در زیرسیستم منابع آبی دشت قزوین در نظر گرفته شده است (شکل ۴).

مقدار تغییرات آب سطحی با استفاده از معادله (۸) در سال t محاسبه می‌شود:

$$\Delta S_{S,t} = Q_{SI,t} - Q_{S0,t} \quad (8)$$

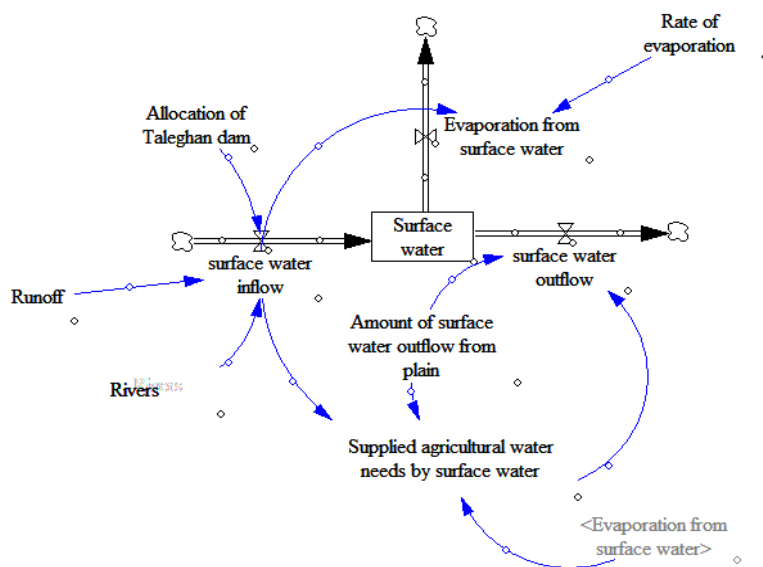


Fig. 4- Stock and flow diagram of surface water

شکل ۴- نمودار جریان آب سطحی

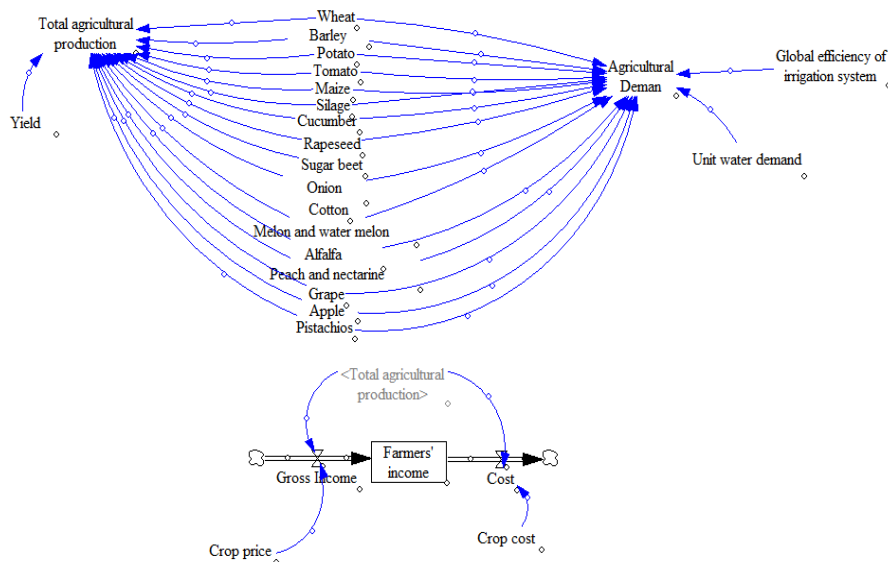


Fig. 5- Stock and flow diagram of the economic-agricultural subsystem
 شکل ۵- نمودار جریان زیرسیستم کشاورزی- اقتصادی دشت قزوین

$$Income_{total}^t = \sum_z Y_z^t \times PH_z^t \quad (14)$$

که در آن، $Income_{total}^t$ و PH_z^t به ترتیب مقدار درآمد ناخالص کشاورزان و قیمت محصولات در سال t است. با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶) مقدار درآمد خالص کشاورزان در هر سال و از ابتدا تا انتها دوره قابل محاسبه است.

$$\Delta Total\ income_{net}^t = Income_{total}^t - \sum_z Y_z^t \times C_z^t \quad (15)$$

$$Total\ income_{net}^t = \Delta Total\ income_{net}^t + Total\ income_{net}^{t-1} \quad (16)$$

که در آن، C_z^t هزینه تولید محصول z در سال t ، $\Delta Total\ income_{net}^t$ مقدار درآمد خالص در سال t و $Total\ income_{net}^t$ مقدار درآمد خالص از سال اول تا سال t است.

۲-۲-۲- کالیبراسیون مدل پویایی سیستم

در مدل توسعه داده شده محصولات کشاورزی که جز محصولات عمده دشت نبودن در مدل در نظر گرفته نشده بودند از طرفی دیگر، با توجه به دقتی که در مورد آرایه سطح زیر کشت محصولات استفاده شده در مدل یا نیاز آبی آن‌ها ممکن بود وجود داشته باشد از یک معادله خطی (۱۷) برای کالیبراسیون مدل استفاده شد:

$$AD_{agri,t} = a(D_{agri,t}) + b \quad (17)$$

که در آن، $AD_{agri,t}$ مقدار نیاز آبی کشاورزی تصحیح شده (MCM)، a شیب خط و b عرض از مبدا (MCM) معادله می‌باشد. به منظور محاسبه ضرایب کالیبراسیون (a, b) ، از الگوریتم ژنتیک (GA) با هدف

۱۷ محصول عمده دشت قزوین به دو گروه زراعی و باغی قابل تقسیم است:

گروه یک شامل محصولات زراعی گندم، جو، ذرت دانه‌ای، سیب‌زمینی، گوجه، ذرت علوفه‌ای، خیار، کلزا، چغندر قند، پیاز، پنبه، هندوانه و خربزه و یونجه و گروه دو شامل محصولات باغی هلو و شلیل، انگور، سیب و پسته است. نیاز متوسط آبی محصولات با استفاده از اطلاعات ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$WROC_z^t = AWROC1_z \times CL_z^t \quad (11)$$

که در آن، $WROC_z^t$ کل نیاز آبی خالص محصول z در سال t برحسب مترمکعب، $AWROC1_z$ میانگین نیاز آبی خالص محصول z ام برحسب مترمکعب بر هکتار و CL_z^t سطح زیر کشت محصول z در سال t برحسب هکتار است. در نتیجه مقدار نیاز آبی کشاورزی در سال t برابر با مجموع نیاز ناخالص همه محصولات کشاورزی است.

$$D_{agri,t} = \sum_{z=1}^{17} WROC_z^t \times \frac{1}{EP} \quad (12)$$

از طرف دیگر مقدار تولید هر محصول با داشتن راندمان تولید در هکتار با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$Y_z^t = Unit_Y_z^t \times CL_z^t \quad (13)$$

که در معادله (۱۱) و (۱۲)، $D_{agri,t}$ کل نیاز ناخالص آبی بر حسب مترمکعب و EP راندمان آبیاری، Y_z^t و $Unit_Y_z^t$ به ترتیب مقدار کل و مقدار تولید شده در یک هکتار از محصول z در سال t است. درآمد خالص کشاورزان به عنوان یکی دیگر از متغیرهای حالت در زیرسیستم اقتصادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

انتقالی از سد طالقان اختصاص دارد. این پنج سناریو با هدف کاهش بیلان منفی آبخوان به گونه‌ای که درآمد کشاورزان بدون تغییر بماند طراحی شده است. از آنجاکه اجرای این سناریوها وابستگی زیادی به مقدار بارندگی و آورد رودخانه دارد، بنابراین اجرای آن‌ها برای حفظ منابع آبی با عدم قطعیت قابل توجهی همراه خواهد بود. دسته دوم سناریوها به بررسی میزان کاهش سطح ایستابی و تغییر درآمد کشاورزان در اثر عدم کاشت محصولات می‌پردازد. به عبارت دیگر در این ۱۰ سناریو اثر عدم کاشت محصولات مختلف بر درآمد کشاورزان و کاهش بیلان منفی آبخوان ارزیابی شده است. همچنین اثر اجرای الگوی کشت پیشنهادی سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین، سناریو ۱۹، بر افت سطح آبخوان و درآمد کشاورزان بررسی شد. جدول ۱ به نمایش این سناریوها می‌پردازد.

۲-۵- حل اختلاف

از آنجاکه کاهش افت سطح ایستابی آبخوان منجر به کاهش درآمد کشاورزان می‌شود، بنابراین این دو هدف در تعارض با یکدیگر هستند. نتایج اجرای این سناریوها یک منحنی پارتو خواهد بود که سناریو تعادلی آن با استفاده از روش حل اختلاف نش، کالای و اسمردینسکای، مساحت یکنواخت و ضررهای یکسان محاسبه می‌شود.

۲-۵-۱- روش نش

این روش که توسط Nash (1953) به منظور حل بازی‌های همکارانه معرفی گردید برای انجام تقسیم عادلانه در بین جواب‌های مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مناسب است بر مبنای بیشینه‌سازی فاصله همه هدف‌ها از حداقل مقدار آن هدف است.

$$\text{Maximize } (f_1 - f_1^-)^{w_1} (f_2 - f_2^-)^{w_2} \quad (20)$$

Subject to:

$$f_1^- \leq f_1 \leq f_1^+ \\ f_2 = g(f_1)$$

که در آن، f_1 و f_2 به ترتیب مقدار تابع هدف اول و دوم، f_1^+ و f_2^+ به ترتیب بیشترین مقدار تابع هدف اول و دوم، f_1^- و f_2^- کمترین مقدار تابع هدف اول و دوم، w_1 و w_2 درجه اهمیت هر کدام از اهداف و g تابع مقعر و اکیداً نزولی که در فاصله $[f_1^-, f_1^+]$ بر مرز پارتو برازش داده می‌شود که در آن $g(f_1^+) = f_2^-$ و $g(f_1^-) = f_2^+$ می‌باشد. در صورتی که مقدار w_1 و w_2 برابر یک باشد بیانگر برابر بودن درجه تصمیم هر کدام از بازیکنان است و در غیر این صورت روش نامقارن نش اجرا خواهد شد که هر کدام از اهداف که مهم‌تر باشد درجه اهمیت بیشتری خواهد داشت.

کاهش خطای شبیه‌سازی استفاده شد. معادله (۱۸) تابع هدف مدل GA را نشان می‌دهد.

$$\text{Min } F(\bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{15} (Y_{\text{Obs},i} - Y_{\text{Simu},i})^2}{T_f} \quad (18)$$

که در آن، \bar{x} بردار متغیر شامل a و b ، $F(\bar{x})$ تابع، $Y_{\text{Obs},i}$ هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت قزوین بدست آمده از داده‌های مشاهداتی و $Y_{\text{Simu},i}$ هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت قزوین شبیه‌سازی شده توسط مدل پویایی سیستم می‌باشد.

۲-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش حساسیت خروجی‌های مدل سیستم دینامیک شامل درآمد کشاورزان و سطح ایستابی آبخوان نسبت به تغییر الگوی کشت بررسی گردید. به این منظور از روش ارائه شده توسط lane et al. (1994) برای تعیین مؤثرترین گیاه بر درآمد کشاورزان و سطح ایستابی آبخوان استفاده شده است. ابتدا مدل با استفاده از داده‌های ورودی واقعی اجرا گردید و نتایج به دست آمده در این حالت به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. سپس در اجراهای بعد به ترتیب سطح زیر کشت یک محصول تغییر کرده و سطح زیر کشت سایر محصولات ثابت نگه‌داشته شدند و پویایی سیستم با سری داده‌های ورودی جدید اجرا شد. مقدار حساسیت افت سطح آبخوان و درآمد کشاورزان به تغییر سطح زیر کشت هر محصول با استفاده از معادله (۱۹) قابل محاسبه است.

$$D_{ji} = \left| \frac{N_{ji} - O_j}{O_j} \right| \times 100 \quad j = 1,2 \quad (19)$$

$$i = 1,2, \dots, 17$$

که در آن، i شماره‌دهنده محصول و j شماره‌دهنده پارامتر خروجی شامل درآمد کشاورزان و افت سطح آبخوان است. D_{ji} عبارت از حساسیت پارامتر خروجی j به تغییر سطح زیر کشت محصول i ، N_{ji} مقدار پارامتر خروجی j به ازای تغییر سطح زیر کشت محصول i و O_j مقدار پارامتر خروجی j به دست آمده در شرایط مبنا، است.

۲-۴- سناریوها

بخش اعظم منابع آب سطحی دشت قزوین از طریق سد طالقان تأمین می‌شود که حدود ۱۰٪ از آن صرف تغذیه مصنوعی آبخوان می‌شود. چهار سناریوی اول به بررسی اثر آب تخصیص یافته از سد طالقان بر سطح ایستابی آبخوان با ثابت نگه‌داشتن بقیه شرایط می‌پردازد، به گونه‌ای که S1S با فرض صفر شدن آب تخصیص یافته و سناریوهای S2S، S3S و S4S به ترتیب با فرض افزایش ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ مقدار آب تخصیص یافته از سد طالقان است. سناریوهای S5S و S6S به بررسی اثر ۳ و ۵ برابر شدن میزان تغذیه آبخوان با استفاده از آب

Table 1- Character of scenarios

جدول ۱ - مشخصات سناریوها

NO.	Character of scenario	Scenario
1	Actual condition	S0
2	Remove allocated water from Taleghan Dam	S1S
3	Increase allocated water from Taleghan Dam by 10 percent	S2S
4	Increase allocated water from Taleghan Dam by 30 percent	S3S
5	Increase allocated water from Taleghan Dam by 50 percent	S4S
6	Increase allocated water from Taleghan dam used for Qazvin Aquifer recharge by three times	S5S
7	Increase allocated water from Taleghan dam used for Qazvin Aquifer recharge by three times	S6S
8	Remove tomato from the cropping pattern	S1C
9	Remove water melon and melon from the cropping pattern	S2C
10	Remove potato from the cropping pattern	S3C
11	Remove cucumber from the cropping pattern	S4C
12	Remove barely from the cropping pattern	S5C
13	Remove cotton from the cropping pattern	S6C
14	Remove onion from the cropping pattern	S7C
15	Remove non-strategic crops from the cropping pattern	S8C
16	Remove tomato, water melon and melon from the cropping pattern	S9C
17	Remove cucumber, tomato, water melon and melon from the cropping pattern	S10C
18	Remove cucumber, potato, tomato, water melon and melon from the cropping pattern	S11C
19	Jahad-agriculture office's proposed cropping pattern	S12C

۲-۵-۴- راه حل ضررهای یکسان

در این روش هر دو بازیکنان تمایل دارند تا حد امکان کم‌تر ضرر کنند. در حالتی که هر دو وزن یکسان دارند هر دو هدف با سرعت یکسانی به توافق می‌رسند. اما در روش نامتقارن اهداف وزن متفاوتی دارند و هدف مهم‌تر با سرعت کمتری نسبت به دیگری زیان خواهد دید. بنابراین در این روش، نقطه $(f_1^*, g(f_1^*))$ روی مرز پارتو به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$(f_1^+ - f_1) \times w_1 = (f_2^+ - g(f_1)) \times w_2 \quad (23)$$

۲-۵-۲ روش Kalai-Smorodinsky

نقطه تقسیم عادلانه در این روش که توسط Kalai and Smorodinsky (1975) ارائه شد، نقطه تقاطع منحنی پارتو نرمال شده با خط ترسیمی از مبدأ است. ضریب زاویه خط ترسیم شده، نشان‌دهنده درجه اهمیت هدف‌های مختلف است. به عبارت دیگر نقطه تقسیم عادلانه جواب معادله (۲۱) است. w_i درجه اهمیت تابع هدف i است.

$$f_1 + \left[\frac{(f_1^+ - f_1^-)}{(f_2^+ - f_2^-)} \right] (f_1 - f_1^-) \left(\frac{w_2}{w_1} \right) - f_2 = 0 \quad (21)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کالیبراسیون و بررسی شرایط حدی مدل

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، در سال‌های گذشته آبخوان دشت قزوین با متوسط افت سالانه حدود ۱/۳۳ متر روبرو بوده است. به منظور شبیه‌سازی، منابع آب دشت قزوین با استفاده از پویایی سیستم مدل‌سازی گردید تا سناریوهای مختلف مدیریتی بر روی آن ارزیابی گردد. مدل توسعه داده شده در ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تخمین دقیق نیاز آبی بخش کشاورزی کالیبره شد.

جدول ۲ و شکل ۶ نتایج قبل و بعد از کالیبراسیون را نمایش می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مدل کالیبراسیون شده با ضریب همبستگی ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۳/۰۷ هیدروگراف واحد آب زیرزمینی شبیه‌سازی کرده است. ضرایب a و b به ترتیب ۱۸۸ و ۱/۰۲ توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه گردید. نتایج شبیه‌سازی شده را با

۳-۵-۲ روش Monotonic Area

برای محاسبه نقطه تقسیم عادلانه در این روش از مساحت زیر منحنی پارتو (g) به دست آمده استفاده می‌شود، به نحوی که نقطه تعادل در این روش نقطه‌ای است که مساحت زیر منحنی پارتو را به دو قسمت متناسب با درجه اهمیت اهداف تقسیم نماید (Rouhparvar et al., 2014). با استفاده از حل معادله غیرخطی (۲۲)، نقطه تعادل قابل محاسبه است. نقطه $(f_1^*, f_2^* = g(f_1^*))$ نقطه تعادل مسأله است.

$$w_2 \left[\int_{f_1^-}^{f_1^+} g(t) dt - \frac{1}{2} (f_1^* - f_1^-) (g(f_1^*) + f_2^-) \right] = w_1 \left[\int_{f_1^-}^{f_1^+} g(t) dt - (f_1^- - f_1^*) f_2^- - \frac{1}{2} (f_1^* - f_1^-) (g(f_1^*) - f_2^-) \right] \quad (22)$$

۳-۲- نتایج تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت تغییر سطح ایستابی در اثر تغییر سطح زیر کشت محصولات در شکل ۷ بر روی محور عمودی به صورت درصد نشان می‌دهند. سطح ایستابی آبخوان دشت قزوین، بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات سطح زیر کشت محصول گندم را به دلیل بالا بودن سطح زیر کشت آن در شرایط فعلی داشته است. سطح ایستابی به ترتیب به تغییرات سطح زیر کشت محصولات انگور، یونجه، جو، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، گوجه، چغندر قند، سیب، هندوانه و خربزه، هلو و شلیل، سیب‌زمینی، پسته، پنبه، خیار، کلزا و پیاز حساسیت بیشتری دارد.

در مقایسه‌ای که بین سطح زیر کشت محصولات و مقدار نیاز آبی آن‌ها انجام شد (شکل ۸) نتایج نشان داد تغییر سطح ایستابی حساسیت بیشتری به تغییر در محصولات با سطح زیر کشت بیشتر به جز جو، یونجه، چغندر قند، سیب، هندوانه و خربزه، پنبه و خیار داشته است.

استفاده از معادله رگرسیونی و خط یک به یک با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند (شکل ۶.ب). براساس آزمون فرض صفر شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون معنی‌دار می‌باشد. معادله خط برازش داده شده بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده سطح آب زیرزمینی به صورت زیر است:

$$H_{\text{Observed}} = 0.87 \times H_{\text{Simulated}} + 156.54 \quad (24)$$

$$R^2 = 0.97$$

که در آن، H_{Observed} هیدروگراف واحد سطح ایستابی مشاهده شده و $H_{\text{Simulated}}$ هیدروگراف واحد سطح ایستابی شبیه‌سازی شده می‌باشد.

در ادامه به منظور واسنجی مدل، مدل کالیبره شده در شرایط حدی مختلف شامل بارندگی برابر صفر، آب انتقالی طالقان برابر صفر و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی برابر صفر ارزیابی گردید و در شرایط حدی نیز صحت مدل تأیید شد.

Table 2- Statistical indicators of system dynamics model after and before calibration

جدول ۲- پارامترهای آماری مدل پویایی سیستم قبل و بعد از کالیبراسیون		
Statistical index	After calibration	Before calibration
MSE	3.07	1992.717
R ²	0.97	0.34

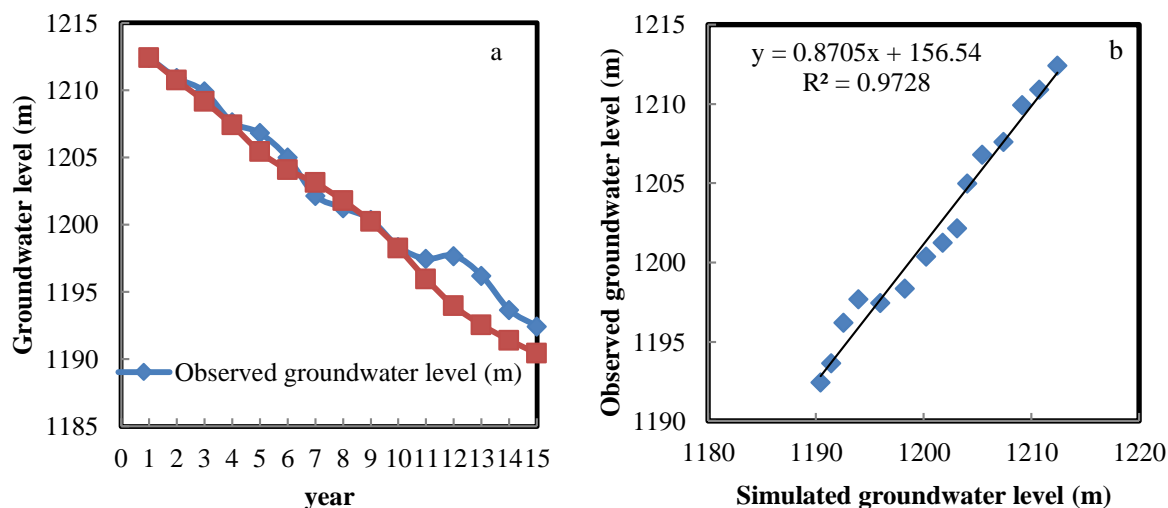


Fig. 6- a) The observed and simulated unit hydrograph of groundwater level and b) The linear regression between observed and simulated unit hydrograph of groundwater level during 15 years
 شکل ۶- (a) هیدروگراف واحد سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل پویایی سیستم و (b) رگرسیون خطی بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در طول ۱۵ سال

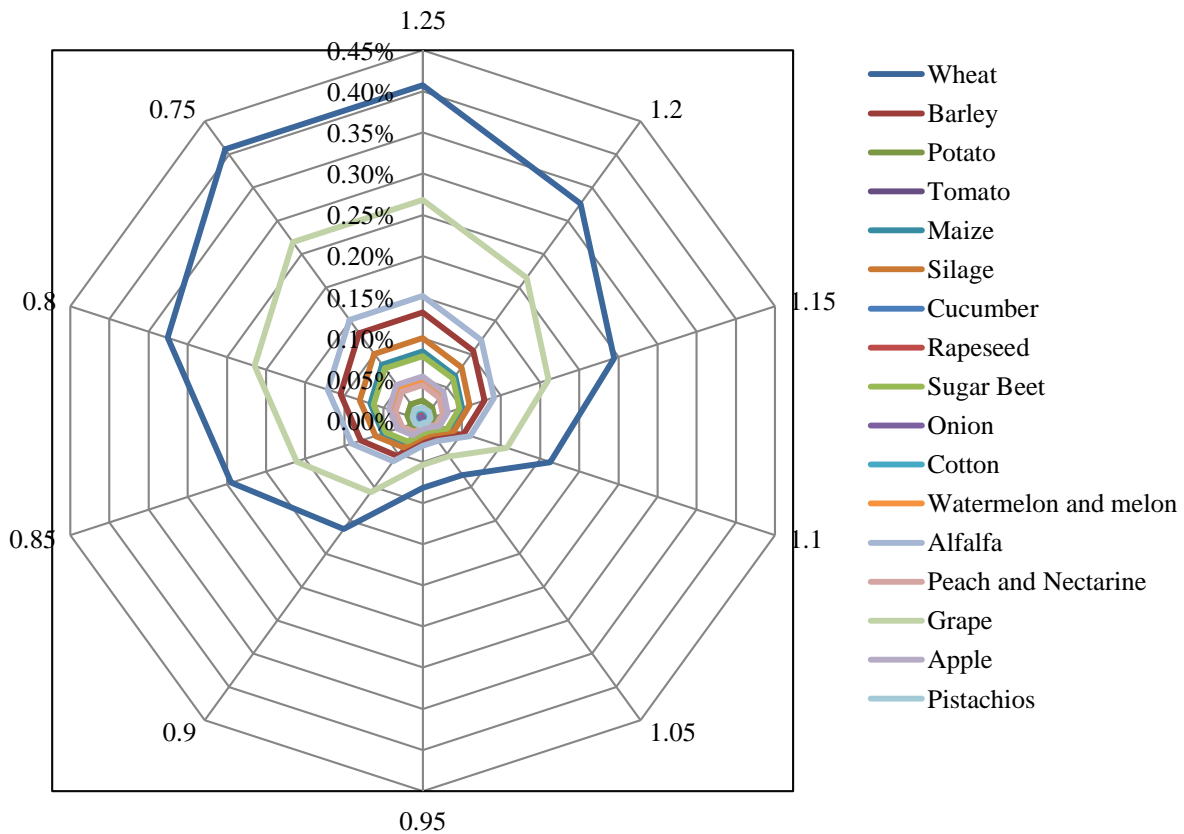


Fig. 7- Sensitivity analysis of groundwater level in response to changes of croplands by 1.25 to 0.75 times the current situation with $\pm 5\%$ increments

شکل ۷- حساسیت سطح ایستابی دشت قزوین نسبت به تغییر سطح زیر کشت محصولات در بازه ۱/۲۵-۱/۷۵+ برابر شرایط موجود

۳-۳- بررسی کارایی سناریوها

آب انتقالی از سد طالقان، یکی از مهم‌ترین منابع آب سطحی دشت قزوین است، برای ارزیابی تأثیر آن بر میزان سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت قزوین، نتایج مدل در صورت عدم تخصیص این حق‌آبه تحلیل شده است. نتایج نشان داد حذف آب تخصیص‌یافته از سد طالقان باعث افزایش افت تراز آب زیرزمینی در حدود ۱۰ متر نسبت به حالت موجود می‌شود. در ادامه، تغییر میزان حق‌آبه از سد در حالت افزایش ۲۰٪ (S2S)، ۳۰٪ (S3S) و ۵۰٪ (S4S) بررسی گردید و بر اساس شکل (۱۰) نشان داده شده است این سناریوها منجر به کاهش افت به ترتیب ۲/۲۶، ۳/۳۸ و ۵/۴۷ متر شده‌اند.

محصول جو اگرچه مساحت بیشتری نسبت به یونجه داشته است، ولی به دلیل نیاز آبی بیشتر یونجه، افت سطح آبخوان حساسیت بیشتری نسبت به گیاه یونجه داشته است. همچنین محصول خیار با داشتن سطح زیر کشت بیشتری از پنبه، به دلیل نیاز آبی پایین‌تر از پنبه، تأثیر کمتری نسبت به پنبه در تغییر سطح ایستابی دارد.

حساسیت درآمد کشاورزان به افزایش و یا کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد درآمد کشاورزان بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر سطح زیر کشت محصول انگور دارد. درواقع، با کاهش سطح زیر کشت انگور، درآمد کشاورزان کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

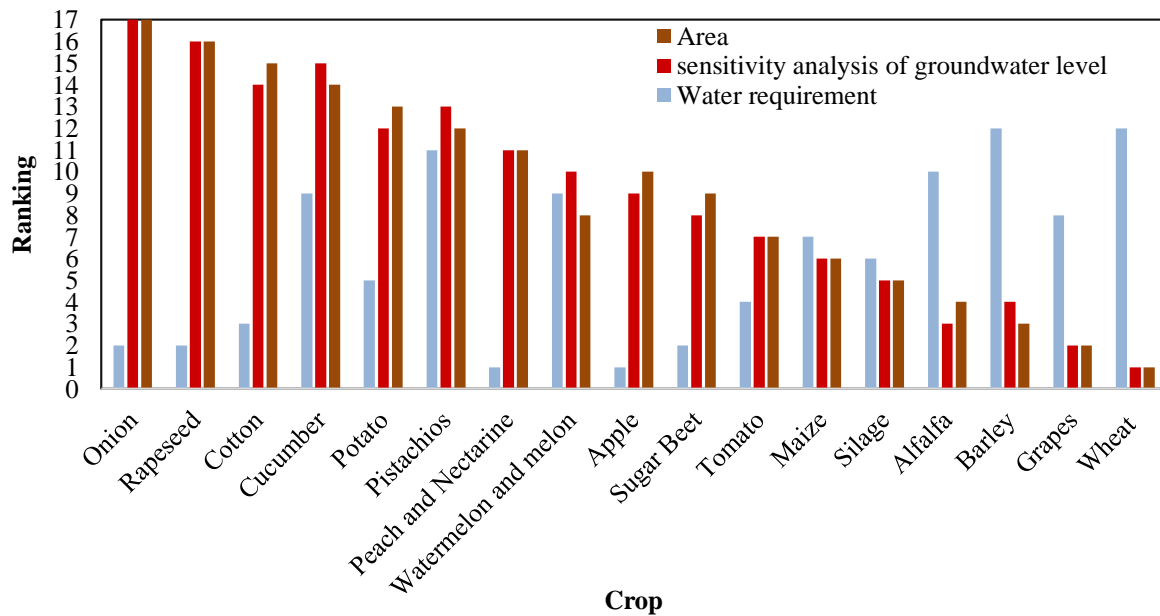


Fig. 8- Ranking cropland, water requirement and sensitivity analysis of groundwater level of agricultural products

شکل ۸- رتبه بندی سطح زیر کشت، نیاز آبی و آنالیز حساسیت سطح ایستابی محصولات کشاورزی

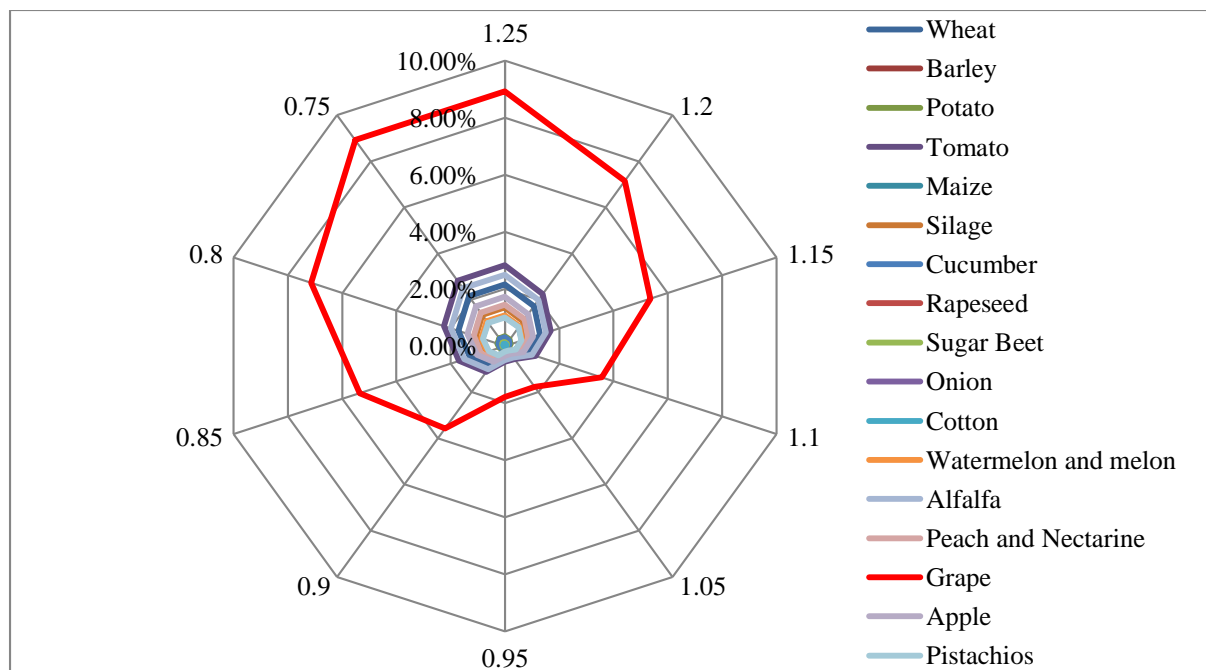


Fig. 9- Sensitivity analysis of Farmers' income in response to changes of croplands by 1.25 to 0.75 times of the current situation with $\pm 5\%$ increments

شکل ۹- حساسیت درآمد کشاورزان دشت قزوین نسبت به تغییرات سطح زیر کشت محصولات در بازه ۱/۲۵-۰/۷۵ برابر شرایط موجود

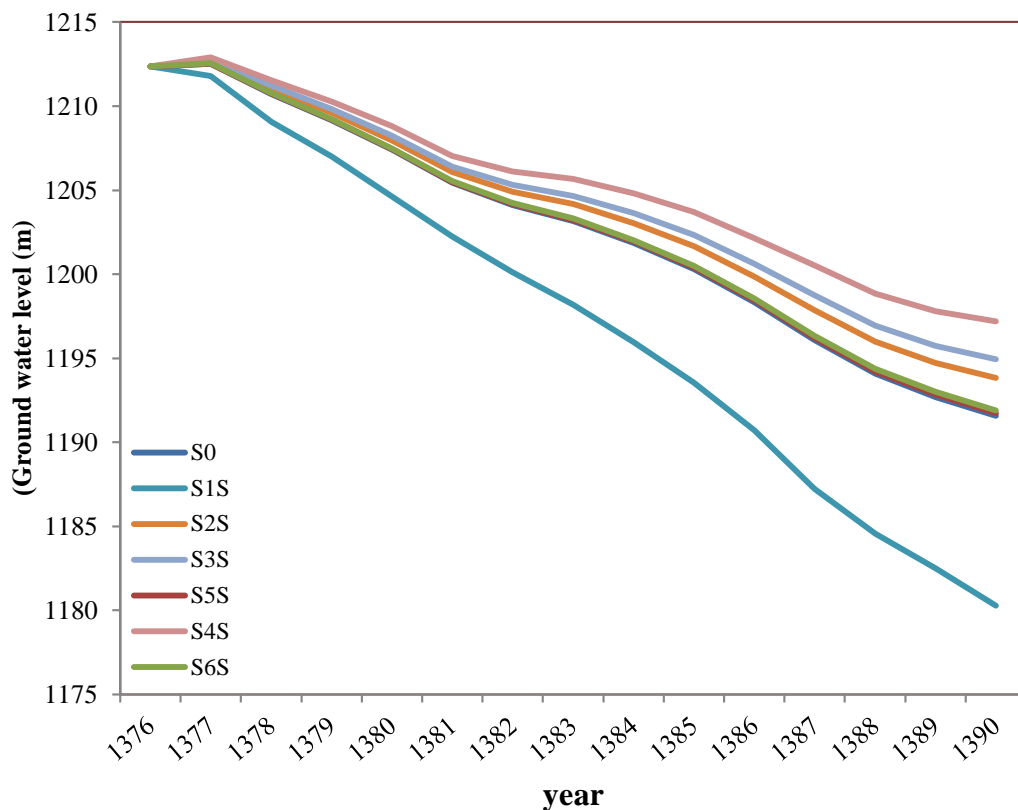


Fig. 10- Changes in groundwater level after applying scenarios S1S, S2S, S3S, S4S, S5S and S6S
 شکل ۱۰ - تغییرات سطح ایستابی دشت قزوین بعد از اعمال سناریوهای S1S، S2S، S3S، S4S، S5S و S6S

خالص کشاورزان (شکل ۱۱-ا) خواهد شد. میزان کاهش افت سطح ایستابی و درآمد کشاورزان در پایان ۱۵ سال برای هر سناریو در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در حالی که درآمد کشاورزان از ۱/۴ تا ۲/۴۹ میلیارد دلار تغییر می‌کند، افت سطح ایستابی از ۲۶- تا ۲۰/۵۶ متر تغییر می‌کند، که این بیانگر بالا بودن نیاز آبی محصولات حذف شده در مقابل سودهای آنها است.

از آنجا که سناریوی منتخب، سناریویی است که باعث افزایش درآمد کشاورزان و کاهش افت سطح ایستابی شود، سناریوهای S4C، S1C، S9C و S10C که توسط سایر سناریوها مغلوب می‌شوند حذف شده و منحنی پارتو با ۸ سناریوی غالب باقی‌مانده، تشکیل می‌شود.

۳-۴- نتایج حاصل از مدل تقسیم عادلانه منافع

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود سناریوهای S1C تا S12C با کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، منجر به افزایش سطح ایستابی و کاهش درآمد کشاورزان شده است. سناریوهای غیرمغلوب S2C، S3C، S5C، S6C، S7C، S8C، S11C و S12C مجموعه پارتویی را تشکیل داده است که در شکل ۱۲ نشان داده شده

همچنین افزایش میزان آب تخصیص داده‌شده از سد برای تغذیه آبخوان در دو حالت سه (S5S) و پنج (S6S) برابر شرایط فعلی بررسی گردید و نتایج نشان داد این سناریوها به‌طور میانگین حدود ۱/۵ متر میزان افت را کاهش می‌دهد.

با توجه به روند افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی، احتمال افزایش حق آبه از سد طالقان زیاد نیست در ادامه سناریوهای حذف محصولات با نیاز آبی بالا و غیراستراتژیک (گوجه فرنگی، هندوانه و خربزه، سیب‌زمینی، خیار، پیاز، یونجه و پنبه) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه، سناریو پیشنهادی جهاد کشاورزی (S12C) برای سال آبی ۹۷-۹۸ در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین، مدل‌سازی شد. در سناریو پیشنهادی سازمان جهاد کشاورزی، اختصاص ۳۰ درصد از سطح زیر کشت به گندم، ۱۵٪ به کزازه، ۵٪ به جو، ۷٪ ذرت علوفه‌ای، ۸٪ ذرت دانه‌ای، ۳٪ به گوجه و ۳٪ به چغندر قند پیشنهاد داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است عدم کاشت محصولات پرمصرف منجر به افزایش سطح ایستابی (شکل ۱۱-ب) و کاهش درآمد

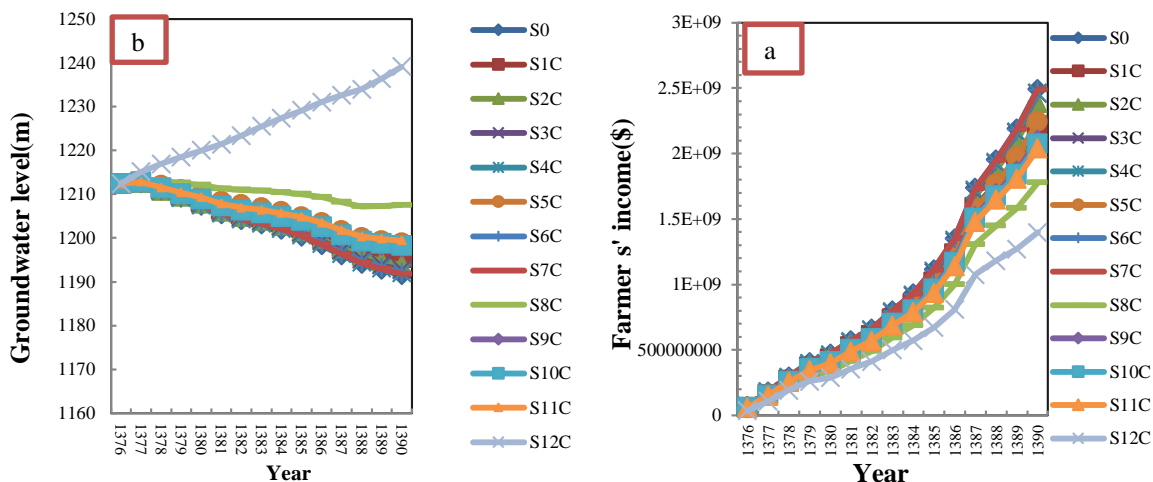


Fig. 11- Changes in groundwater level (a) and farmers' income (b) after applying different scenarios of the cropping pattern

شکل ۱۱- (a) تغییرات سطح ایستابی و (b) تغییرات درآمد کشاورزان دشت قزوین بعد از اعمال سناریوهای تغییر الگوی کشت

Table 3- Farmers' income and groundwater drawdown for different scenarios of cropping pattern during 15 years

جدول ۳- درآمد کشاورزان و افت سطح ایستابی در سناریوهای تغییر الگوی کشت در دشت قزوین در طول ۱۵ سال

Scenario	The percentage of net income deficiency (%)	Groundwater drawdown (m)
S0	0.00	20.80
S1C	11.24	16.89
S2C	4.02	18.54
S3C	1.20	19.63
S4C	1.20	20.32
S5C	10.04	13.58
S6C	0.00	20.13
S7C	0.00	20.56
S8C	28.51	4.83
S9C	15.26	14.63
S10C	16.47	14.14
S11C	18.07	12.97
S12C	43.78	-26.74

که تنها به هدف حفظ آبخوان توجه شود، برداشت از منابع آب کاهش پیدا می‌کند در نتیجه با کاهش برداشت آب زیرزمینی مقدار درآمد کشاورزان کاهش پیدا می‌کند. در جدول ۴ میزان کاهش افت سطح ایستابی نسبت به شرایط موجود و میزان درآمد خالص کشاورزان برای تمام سناریو آورده شده است. نتایج سناریوی S8C توسط چهار روش در شرایط متقارن، به عنوان سناریو تعادلی محاسبه شد (جدول ۴). اجرای این سناریو باعث افزایش ۱۶ متر در سطح آبخوان و در مقابل باعث کاهش ۲۸٪ درآمد کشاورزان خواهد شد. در این سناریو ۸ محصول شامل گوجه، خربزه و هندوانه، سیب‌زمینی، خیار، یونجه، پنبه و پیاز از الگوی کشت حذف خواهد شد.

است. از روش‌های حل تضاد نش، کالایی و اسمردینسکای، مساحت یکنواخت و راه‌حل ضررهای یکسان به منظور پیدا کردن سناریوی تعادلی بین اهداف استفاده شد. همچنین با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای هر کدام از اهداف، نقطه تعادل بازی با استفاده از روش‌های حل اختلاف برای حالت‌های مختلف مدیریتی محاسبه گردید (جدول ۴).

جدول ۴ نتایج به دست آمده از چهار روش حل اختلاف را با درجه اهمیت متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش اهمیت هدف اقتصادی، میزان برداشت کل منابع آب در بخش کشاورزی افزایش و درآمد خالص کشاورزان افزایش می‌یابد و هنگامی

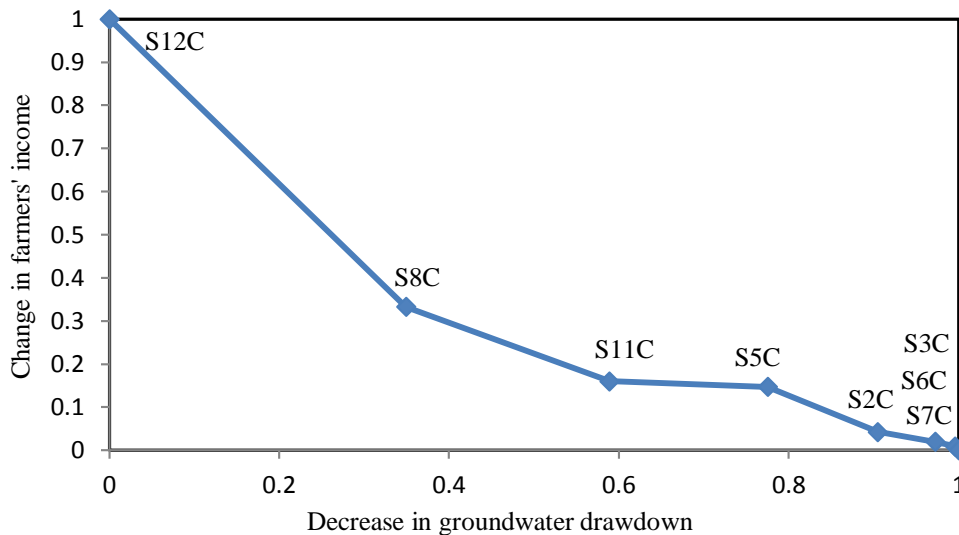


Fig. 12- The Pareto frontier with normalized objectives for non-dominant scenarios S2C, S3C, S5C, S6C, S11C and S12C S9C, S7C, S8C,

شکل ۱۲- جبهه بهینه پارتو، میزان کاهش سود کشاورزان در مقابل میزان کاهش افت سطح ایستابی برای سناریوهای S2C، S3C، S5C، S6C، S11C و S12C، S9C، S7C، S8C، در دشت قزوین

در دشت قزوین، باعث ایجاد اشتغال زیادی شده است. بنابراین مدیریت و برنامه‌ریزی آبخوان به‌گونه‌ای که با شرایط مناسب‌تری در آینده، نیاز ذینفعان را تأمین کند حائز اهمیت است.

در این پژوهش سناریوهای مختلف مدیریت تأمین آب و اصلاح الگوی کشت با شبیه‌سازی آبخوان دشت قزوین از طریق پویایی سیستم موردبررسی قرار گرفت. پویایی سیستم شامل ۲ زیرسیستم کشاورزی-اقتصادی و منابع آب است. نتایج اجرای سناریوهای مدیریتی در دشت قزوین نشان داد که اختصاص آب انتقالی از سد طالقان به دشت، مانع افت حدود ۱۰ متر سطح ایستابی نسبت به شرایط موجود شده است. از طرف دیگر افزایش ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ مقدار آب انتقالی سطح ایستابی را به‌اندازه ۳۸/۲۶، ۳/۲ و ۵/۴۷ متر افزایش خواهد داد. افزایش میزان آب تخصیص‌یافته تغذیه آبخوان از سد طالقان به‌صورت سه و پنج برابر شرایط کنونی، باعث کاهش ۱/۵ متر افت سطح ایستابی شد. در سناریوهای بعدی حذف سطح زیر کشت محصولات زراعی و غیراستراتژیک یک‌به‌یک و به‌صورت ترکیبی و همچنین سناریو پیشنهادی جهاد کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال این سیاست‌ها با توجه به کاهش سطح زیر کشت، میزان سطح ایستابی افزایش می‌یابد درحالی‌که باعث کاهش درآمد کشاورزان می‌شود. در ادامه منحنی پارتو سناریوهای غالب تهیه شد و با استفاده از روش‌های حل تضاد نش، کالای و اسمردینسکای، مساحت یکنواخت و راه‌حل ضررهای یکسان، نقطه تعادل بین دو هدف اقتصادی و حفظ آبخوان محاسبه گردید.

با توجه به اینکه این محصولات، در نوبت دوم کشت می‌شوند و بیشترین نیاز آبی آن‌ها در فصل تابستان است، زمانی که میزان ریزش‌های جوی صفر و منابع آب سطحی حداقل است، کشت این محصولات به‌شدت مقدار آب موجود در آبخوان را تحت شعاع قرار می‌دهد. از طرفی به دلیل پایین بودن قیمت محصولات و هزینه بالا کاشت، داشت و برداشت سودآوری کمی با توجه به مقدار آب مصرفی دارند.

سناریوی جهاد کشاورزی (S12C) درآمد کشاورزان را در حدود ۴۴٪ نسبت به شرایط موجود کاهش می‌دهد و باعث افزایش سطح ایستابی به‌اندازه ۲۶ متر می‌شود. با توجه به حل بازی به‌صورت همکارانه به صورتی که هر دو هدف به یک نقطه تعادل از ضرر و سود خودشان برسند، سناریوی جهاد کشاورزی حتی با افزایش درجه اهمیت هدف کاهش افت سطح ایستابی به‌عنوان نقطه تعادل انتخاب نمی‌شود. بنابراین این سناریو از پشتوانه اقتصادی قابل قبولی برای کشاورزان همراه نیست.

۴- جمع‌بندی

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آب در دشت قزوین محسوب می‌گردد و از طرفی به دلیل خشک‌سالی‌های پی‌درپی و افزایش برداشت توسط بخش کشاورزی، سطح آب زیرزمینی در این دشت با افت ۲۰/۸ متر در طول ۱۵ سال همراه بوده است. از طرفی کشاورزی

Table 4- Computational results of the four methods with varying weight selections
 جدول ۴- نتایج محاسبات از روش‌های مختلف حل اختلاف با درجه اهمیت‌های متفاوت

		Area monotonic solution			Kalai-Smorodinsky solution		
Economics weight	Groundwater level weight	Scenario	Change in farmers' income (%)	Decrease in drawdown groundwater (m)	Scenario	Change in farmers' income (%)	Decrease in drawdown groundwater (m)
0.10	0.90	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.20	0.80	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.30	0.70	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.40	0.60	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.50	0.50	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.60	0.40	S5C	90.00	7.22	S8C	71.35	15.97
0.70	0.30	S5C	90.00	7.22	S8C	71.35	15.97
0.80	0.20	S5C	90.00	7.22	S11C	81.84	7.83
0.90	0.10	S5C	90.00	7.22	S11C	81.84	7.83
		Equal loss solution			Nash solution		
Economics weight	Groundwater level weight	Scenario	Change in farmers' income (%)	Decrease in drawdown groundwater (m)	Scenario	Change in farmers' income (%)	Decrease in drawdown groundwater (m)
0.10	0.90	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.20	0.80	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.30	0.70	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.40	0.60	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.50	0.50	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.60	0.40	S8C	71.35	15.97	S8C	71.35	15.97
0.70	0.30	S11C	81.84	7.83	S8C	71.35	15.97
0.80	0.20	S5C	90.00	7.22	S11C	81.84	7.83
0.90	0.10	S2C	95.68	2.26	S5C	90.00	7.22

Arshadi M and Bagheri A (2014) A system dynamic approach to sustainability analysis in Karun River Basin. *Iran-Water Resources Research* 9(3):15-31 (In Persian)

Asadi E, Keramat zadeh A, and Eshraghi F (2018) Determining the optimal exploitation of groundwater resources by using game theory (Case study: Gorgan county). *Journal of Water and Soil Conservation* 25(3):129-144 (In Persian)

Brown L and Flavin C (1999) A new economy for a new century. *State of the World* 3-21

Chen Z and Wei S (2014) Application of system dynamics to water security research. *Water Resources Management* 28(2):86-300

Darvishi E, Hoshmand A, Alizadeh H, and Izadpanah Z (2018) Evaluation of the effect of cropping pattern on groundwater resources of Mehran Plain using the

نتایج نشان داد در صورتی که هر دو هدف درجه اهمیت یکسانی داشته باشند، سناریو حذف محصولات زراعی غیراستراتژیک (S8C) به‌عنوان سناریوی تعادلی توسط هر چهار روش انتخاب می‌شود. از طرف دیگر با تغییر درجه اهمیت هدف اقتصادی در سه روش کالای و اسمردینسکای، مساحت یکنواخت و راه‌حل ضرر یکسان همچنان سناریو S8C به‌عنوان سناریوی تعادلی انتخاب می‌شود.

۵- مراجع

Abkhan Consulting Engineers (2013) Water budget of Qazvin plain. Ministry of energy 71pp (In Persian)

Alami MT, Farzin S, Ahmadi MH, and Aghabalae B (2014) System Dynamics modeling of dam and groundwater for optimal water management (Case study: Golak Dam). *Journal of Civil and Environmental Engineering* 44(1):1-11

- determination of allowable use of Tabriz plain. Science journal of Kharazmi University 13(4):937-950 (In Persian)
- Nash J (1953) Two-person cooperative games. Journal of Econometrica 21(1):128-140
- Rahimikhoob H and Sotoodehnia A (2015) Impact climate change on water- crop indicators using system dynamics in Hashtgerd Plain. Master Thesis, Imam Khomeini International University
- Rouhparvar M, Mazandaranzadeh H, and Nasirzadeh F (2014) Quantitative risk allocation in construction projects: a fuzzy-bargaining game approach. International Journal of Industrial Engineering & Production Research 25(2):83-94
- Salazar R, Szidarovszky F, Coppola E Jr and Rojano A (2007) Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico. Environmental Management 84:560-571
- Sharawat I, Dahiya RP, Dahiya R, and Kumari S (2014) System dynamics approach: A novel water resource management tool. Environmental Research and Development 4(4):297-302
- Simonovic SP and Rajasekaram V (2004) Integrated analyses of Canada's water resources: A system dynamics approach. Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques 29(4):223-250
- Taraghi M, Motaseri M, Zarghami M, and Mianabadi H (2017) Conflict resolutions for sustainable water resource management; Case study. Agricultural Economics 11(3):131-160 (In Persian)
- Winz I, Brierley G, and Throwsdale S (2008) The use of system dynamics simulation in water resources management. Journal of Water Resource Manage 23:1301-1323
- Zarghami M and Akbariye S (2012) System dynamic modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. Resources, Conservation and Recycling 60:99-106
- system dynamics approach under scenarios of energy price changes. Water and Soil Resources Conservation 8(2):122-133 (In Persian)
- Ebrahimi Sarindizaj E and Zarghami M (2019) Technical note comparing effects of restoration policies under climate change by using system dynamics; Case study Urmia Lake ecosystem. Iran-Water Resources Research 13(4):184-189 (In Persian)
- Ebrahimzadeh A, Zarghami M, and Nourani V (2019) Evaluation of earth dam overtopping risk by system dynamics, monte-carlo simulation and Latin hypercube sampling methods (Case study: hajilarchay dam, iran). Iran-Water Resources Research 15(1):15-31 (In Persian)
- Forrester J W (1997) Industrial dynamics. Journal of the Operational Research Society 48(10):1037-1041
- Fotookian MR, Safari N, and Zarghami M (2017) Using system dynamics modeling to develop the operation policy for Yamchi Reservoir (Iran) by applying optimum cropping pattern. Iran-Water Resources Research 13(3):1-16 (In Persian)
- Haji Rajabi F and Mazandarani Zadeh H (2018) Multi-objective optimization of drainage depth based on fair benefits division; Short-term versus long-term environmental effects. Iran-Water Resources Research 13(4):144-153 (In Persian)
- Kalai E and Smorodinsky M (1975) Other solutions to Nash's bargaining problem. Econometrica 43:513-518
- Lane SN, Richards KS, and Chandler JH (1994) Distributed sensitivity analysis in modeling environmental systems. Proceedings of the Royal Society, Series A 447:49-63
- Mehr Azar A, Masah Boyani A, Mashal M, and Rahimi Khob (2016) Modeling integrated water resources, agriculture and economic-society using system dynamics in Hashtgerd Plain. Water and Irrigation Management 6(2):263-279 (In Persian)
- Naseri HR, Adienh Vand R, and Salavi Tbar A (2013) The use of system dynamics to forecast behavior and