

The Impact of Water Tariffs in the Agricultural Sector on Resource Efficiency and Sustainability: From Theory to Practice

E. Ebrahimi Sarindizaj^{1*}

Abstract

Water pricing is recognized as an effective tool in reducing demand and achieving the goals of productivity, sustainability and managing the costs of water resources management. Here the positive mathematical programming method has been used for evaluating the various effects of water pricing, with an emphasis on Urmia Lake basin. The complex social, economic and political dimensions of increasing the water tariffs and the challenges the policy implementation faces, are acknowledged and by analyzing the mechanisms governing the system and feedback relationships, the water pricing policy in conjunction with irrigation system modifications have been analyzed for water consumption efficiency and resource sustainability. Any constructive change must be determined and implemented through affecting the loops constituting the system behavior. The findings indicated the significant impact of water subsidies on agricultural profits and the obligation to increase water tariffs taking into account also the rebound effect and water crisis. While increasing irrigation efficiency is among the selected scenarios of the mathematical modeling, it can trigger the behavioral pattern of fixes that fail and alongside the limit to growth pattern, contributes to the worsening of water scarcity. The results provide insight to avoid reliance on short-term solutions and promotes deeper understanding of the resource sustainability. To avoid the tensions of abrupt increases in water tariffs, selecting the appropriate strategies mentioned in this study, along with a gradual increase in water prices, should be implemented to balance the benefits and costs of this policy to move towards social and economic efficiency and water resource sustainability in the region.

Keywords: Water Tariff, Efficiency, Positive Mathematical Programming, Sustainability, Water Resource Management.

Received: December 17, 2024
Accepted: April 6, 2025

تأثیر تعرفه آب در بخش کشاورزی بر بهره‌وری و پایداری منابع: از نظریه تا عمل

الهام ابراهیمی سرین دیزج^{۱*}

چکیده

قیمت‌گذاری آب به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در کاهش تقاضا و دستیابی به اهداف بهره‌وری، پایداری و مدیریت هزینه‌های سیستم‌های منابع آب مطرح می‌شود. در این مقاله برای ارزیابی تأثیرات مختلف قیمت‌گذاری آب، از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، با تأکید بر مناطق حوضه آبریز دریاچه ارومیه، استفاده شده است. با توجه به ابعاد پیچیده اجتماعی، اقتصادی و سیاسی افزایش تعرفه آب و چالش‌های اجرایی در پیاده‌سازی سیاست‌ها، ضمن ارائه سازوکارهای حاکم بر سامانه و تحلیل روابط بازخوردی، سیاست قیمت‌گذاری آب در رقابت با تغییر سامانه آبیاری برای بهره‌وری مصرف آب و پایداری منابع تحلیل شده است. هر تغییر سازنده‌ای بایستی با تأثیر بر حلقه‌های تشکیل‌دهنده رفتار سامانه، تعیین و سپس اجرایی شود. نتایج مطالعه حاکی از تأثیرات قابل توجه یارانه آب بر سود بخش کشاورزی و التزام افزایش تعرفه آب، در کنار توجه به اثر بازگشتی و بحران آب است. هرچند که افزایش راندمان آبیاری جزو سناریوهای منتخب منتج از روش مدل‌سازی ریاضی است، اما می‌تواند سبب فعال‌سازی الگوی رفتاری راهکارهای منجر به شکست شود و در کنار الگوی محدودیت رشد، به وخامت کم‌آبی کمک کند. نتایج مقاله حاضر، بینشی برای جلوگیری از اتکا به راه‌حل‌های موقتی و درک صحیح‌تری از مسیر حرکت به سمت پایداری منابع ارائه می‌کند. به منظور جلوگیری از تنش‌های افزایش ناگهانی تعرفه آب، انتخاب راهبردهای مناسب ذکر شده در این مطالعه در کنار افزایش تدریجی آب‌بها باید با هدف تعادل‌بخشی مزایا و هزینه‌های ناشی از این سیاست برای حرکت به سوی بهره‌وری اجتماعی و اقتصادی و پایداری منابع آب در منطقه انجام شود.

کلمات کلیدی: تعرفه آب، بهره‌وری، برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، پایداری، مدیریت منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۹/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱/۱۷

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Email: e.ebrahimi@urmia.ac.ir
*- Corresponding Author
Doi: [10.22034/iwrr.2025.494562.2814](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.494562.2814)

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

راهبرد افزایش تولید با استفاده بیش از حد از منابع طبیعی، منجر به بحران‌های جدی، به خصوص در زمینه مدیریت محیط زیست می‌شود. این وضعیت، عرصه‌های مربوط به آب و غذا را که جزو مهم‌ترین اهداف کلان ملی و امنیت آبی کشور محسوب می‌شوند، به خطر انداخته است. در نتیجه، این نگرش به منابع، تهدیدات جدی برای امنیت و پایداری منابع آب و غذایی کشور ایجاد کرده است (Kamali et al., 2023). در بیشتر کشورها، آب به عنوان یک کالای فراوان و در دسترس در نظر گرفته می‌شود؛ اما با اثرات تغییر اقلیم، رشد شهرنشینی و در نتیجه افزایش تقاضا با قیمت پایین، آب از دسته‌بندی کالای "رایگان" به کالای "کمیاب" تغییر کرده است. افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به غذا که به موازات افزایش درک اهمیت حفظ منابع و محیط زیست رخ داده است، ضرورت اصلاح برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی را تشدید می‌کند. این مسئله با وجود انواع مختلف مصرف‌کنندگان (جمعیت، جانوران، بخش کشاورزی، صنایع و غیره) با منافع متضاد تشدید می‌شود. به طور خلاصه، در جهان امروز، عدم دسترسی به منابع آبی قابل بهره‌برداری باعث ایجاد عدم تعادل بین عرضه و تقاضا شده و رقابت شدیدی برای تأمین آب جوامع در حال رشد ایجاد کرده است. به طور کلی، حمایت از بخش کشاورزی به دلیل اهمیت امنیت غذایی و ریسک‌های بالاتر نسبت به سایر بخش‌ها، همواره در دستور کار دولت‌ها قرار داشته است (Layani et al., 2023). برای یافتن راهکارهای مناسب در مواجهه با چالش‌های متناظر با این تنش‌ها، تصمیم‌گیران نیاز به اطلاعاتی درباره جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی مربوط به پایداری و تخصیص آب دارند (George et al., 2011). در این زمینه، اهمیت استفاده از ابزارهای اقتصادی- به ویژه تعرفه‌ها- مطرح شده است که هدف آن جلب توجه‌ها به کمیابی منابع آب، عموماً از طریق تخصیص قیمت مناسب برای تشویق به استفاده منطقی است (Araujo et al., 2019). از این رو، اقتصاددانان برای افزایش بهره‌وری آب پیشنهاد افزایش قیمت برای توازن عرضه و تقاضا را مطرح می‌کنند؛ اما دلایل مختلف سیاسی، فرهنگی و غیره سبب عدم پذیرش این موضوع از جانب سیاست‌گذاران می‌شود؛ بنابراین، با توجه به چالش‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و محیط زیست، نیاز به روشی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهبود وضعیت روش‌های برنامه‌ریزی کنونی وجود دارد. شایان ذکر است که سیاست تغییر تعرفه آب بایستی به صورت افزایش تدریجی بهای آب، با هدف تعادل بخشی مزایا و هزینه‌های ناشی از این سیاست انجام شود تا به حرکت به سوی بیشترین بهره‌وری اجتماعی و اقتصادی و پایداری منابع آب منجر شود.

عموماً مدل‌های هیدرولوژیکی- اقتصادی در سامانه‌های منابع آب برای مدیریت سیاست‌ها و ارزیابی ارزش‌های اقتصادی به کار می‌روند (Booker et al., 2012). به دلیل اینکه قسمت اعظمی از مصرف آب در بخش کشاورزی است (به خصوص در کشورهای در حال توسعه)، تمرکز تحقیقات عمدتاً به این بخش معطوف شده است. از روش‌های پرکاربرد در مدیریت اقتصادی منابع آب کشاورزی، مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) هستند (Howitt, 1995). این مدل‌ها با توجه به درآمد و هزینه‌های یک سال پایه، رفتار کشاورزان در انتخاب کشت را مدل‌سازی می‌کنند.

قیمت‌گذاری آب به مکانیزمی اشاره دارد که هزینه‌های خدمات مختلف آب را با پرداخت مبلغ معینی به ازای هر واحد آب مصرفی (یا تخلیه شده) توسط کاربران پوشش می‌دهد. با قیمت‌گذاری منعکس‌کننده هزینه خدمات آب، شرکت‌های آب می‌توانند سیگنال‌های قیمتی واضحی به مشتریان ارسال کنند و به آن‌ها اجازه دهند الگوی مصرف خود را تغییر دهند (Sahin et al., 2018). قیمت‌گذاری آب و محدودیت‌های استفاده از آب دو مکانیزم کلیدی مدیریت تقاضا برای کارایی و حفظ آب هستند که نتایج متفاوتی به همراه دارند. با توجه به عرضه محدود آب، مدیریت تقاضا و استفاده از ابزارهای مدیریتی مناسب، از جمله سیاست‌های قیمت‌گذاری آب در بخش کشاورزی، از راه‌حل‌های مهم برای مقابله با کم‌آبی هستند. در این راستا (Medellan-Azuara et al., 2011) در مطالعه‌ای با فرض حداکثرسازی سود از سرمایه‌گذاری در تکنولوژی آبیاری، با استفاده از مدل PMP واکنش کشاورزان در کالیفرنیا به سیاست‌های قیمت‌گذاری، سهمیه‌بندی آب و حذف یارانه‌ها بررسی شد. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که یارانه تکنولوژی کارآمد بوده و سهمیه‌بندی آب ممکن است تأثیر اندکی روی زمین و آب مصرفی داشته باشد؛ بنابراین، پایداری منابع آب به سیاست‌های تشویقی دیگری نیاز داشته و سیاست شبیه‌سازی افزایش قیمت ۲۰ درصدی آب، می‌تواند به افزایش حدود ۴۳ درصدی بهره‌وری آب کشاورزی منجر شود. (Howitt et al., 2012) نیز از مدل تولیدات کشاورزی ایالتی برای بررسی نقش بازارهای انتقال آب در کالیفرنیا استفاده کردند. آن‌ها از تابع هزینه نمایی و تابع تولید با کشش جانشینی ثابت در مدل PMP برای تحلیل سیاست ارزیابی انتقال آب بالقوه در شرایط خشکسالی بهره بردند. نتایج نشان داد که تخصیص آب در الگوی کشت بهینه بر اساس مکانیزم بازار می‌تواند زیان‌های درآمدی ناشی از کم‌آبی را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. مطالعات مذکور تنها به کاربرد روش PMP در تحلیل ریاضیاتی سود کشاورزی پرداخته و کاربردهای عملیاتی سیاست‌های منتج از این مدل‌سازی‌ها را ارزیابی ننموده‌اند. در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آب در ایران، از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مثبت نیز در مواردی بهره گرفته شده است. (Gharaghani

et al. (2009) تأثیر کاهش آب آبیاری و افزایش قیمت آب بر الگوی کشت در شهرستان اقلید را بررسی کرده و گزارش نمودند که کاهش آب مصرفی تغییر محسوسی در الگوی کشت ایجاد نکرده و حتی افزایش دوبرابری قیمت آب نیز تأثیری بر مقدار مصرف آن نخواهد داشت. (Jafari Sani et al., 2024) به بررسی اثرات اصلاح نظام قیمت‌گذاری آب با استفاده از روش PMP، بر بهره‌وری در بخش کشاورزی با تأکید بر توسعه پایدار در دشت عجب‌شیر پرداختند. ایشان با مصاحبه با زارعان منطقه و استفاده از شاخص میانگین سود خالص به ازای هر قطره، وضعیت محصولات عمده زراعی شامل گندم، جو، سیب‌زمینی و پیاز، محصولات عمده باغی شامل انگور، بادام و گردو را ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج مطالعه ایشان، مدیریت بهینه تقاضای آب می‌تواند از طریق افزایش قیمت آب و اصلاح الگوی کشت محقق شود. این رویکرد در نظر گرفتن ارکان توسعه پایدار، به دنبال افزایش بهره‌وری آب است.

بر اساس مطالعات پیشین، PMP قادر به بررسی اثرات سیاست‌های اقتصادی و تغییرات در دسترسی به منابع بوده؛ اما به فرایندهای بازخوردی در سامانه‌های کشاورزی توجهی ندارند. از آنجا که پیچیدگی‌های سامانه‌ای باعث بروز مسائل پیچیده‌ای نظیر مقاومت اجتماعی در برابر اعمال موفق سیاست‌ها می‌شود (Sterman, 2000)، این سیاست‌ها و آثار متناظر با آنها و به عبارت دیگر، نتایج مدل‌هایی همچون PMP می‌توانند آسیب‌پذیر و گاهی غیر قابل اعتماد باشند. مقاومت در برابر سیاست‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که اقدامات سیاستی، بازخوردهایی ایجاد نمایند که سیاست را تضعیف نموده و گاهی حتی مشکل اساسی را به ویژه در سامانه‌های پیچیده با حلقه‌های بازخوردی و تأخیرهای طولانی تشدید می‌نماید (Sterman, 2000)؛ بنابراین، ابزارهای سنتی بدون تحلیل بازخوردی، ممکن است در پیش‌بینی اقدامات سیاستی موفق عمل نکرده و نتایج دقیقی ارائه ندهند (Layani et al., 2023). برای نیل به اهداف توسعه پایدار و مدیریت چالش‌های متناظر با بخش کشاورزی، رویکردی جامع که شامل برنامه‌ریزی اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی مورد نیاز است (Streimikis & Baležentis, 2020). با وجود اینکه سیاست‌های حمایتی دولت در بخش کشاورزی ممکن است برخی از اهدافی را که سیاست‌گذاران در نظر دارند، برآورده کنند؛ اما احتمال عدم کارایی‌های محیط زیستی، اجتماعی و گاهی اقتصادی صفر نیست؛ بنابراین، تحلیل سیاست نه تنها نیاز دارد تا از دیدگاه مؤلفه‌های اقتصادی به بررسی اثربخشی این سیاست‌ها بپردازد، بلکه در یک نگاه جامع‌تر، باید تأثیر این سیاست‌ها را بر جنبه‌های دیگر مانند جوانب مختلف پایداری ارزیابی کند. این برنامه‌ریزی‌ها باید بر استفاده بهینه از منابع متمرکز شود تا به صورت بلندمدت نیز قابلیت سودآوری داشته باشند. عدم وجود راهبردها و سیاست‌های بلندمدت و منسجم از چالش‌های اساسی

است که همواره مورد تأکید سیاست‌گذاران این بخش بوده است (Layani et al., 2023). در این خصوص (Ebrahimi (2022) به ارزیابی مجانب‌های رشد و پایداری در سامانه‌های آبی و محیط زیستی حوضه آبریز طشک- بختگان پرداخت. ایشان از مدل پویایی‌های سامانه (SD)^۲ برای نشان دادن اندرکنش‌های غیر خطی متغیرهای تأثیرگذار بر سامانه استفاده نمود و با کمی‌سازی شاخص‌های مختلف آبی- محیط زیست، اقتصادی و اجتماعی، شاخص آسیب‌پذیری برای سنجش پایداری سامانه ارائه نمود.

در مطالعه دیگری، (Layani et al., 2023) برای بررسی تأثیر اصلاحات سیاست‌های کشاورزی بر الگوی کشت و پایداری منابع آبی در حوضه سد درودزن در استان فارس، یک مدل ترکیبی از PMP و SD توسعه داده شد. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که استفاده از قیمت‌های جهانی موجب افزایش کشت محصولات پرآب‌بر (مانند برنج) می‌شود. در نتیجه، اصلاح سیاست‌های دولتی و حذف یارانه‌ها می‌تواند سبب کاهش کمبود آب در حوضه شود. عموماً در تلفیق مدیریت منابع آب با مباحث اقتصادی، از اثرات بر محیط‌زیست و پایداری چشم‌پوشی می‌شود. شایان ذکر است که مطالعات مختلفی در زمینه تحلیل پایداری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان مطالعه موردی مطالعه حاضر، انجام شده و برخی از شاخص‌های مختلف مرتبط با پایداری در منطقه مذکور محاسبه شده اند که همگی حاکی از وضعیت نامناسب حوضه دریاچه ارومیه بوده و نیاز به کاهش برداشت‌ها از منابع آب این منطقه را گزارش نموده‌اند (Moghaddasi et al., 2019; Jabbari Gharabagh et al., 2021; Behboudian et al., 2022; Faryadi, 2024). اما با توجه به شرایط خاص منطقه مذکور و پیچیدگی‌های مختلف بین رشته‌ای و بین سازمانی، هنوز هم نیاز به ارزیابی‌های دقیق‌تر بخش‌های مختلف سامانه‌های منطقه وجود دارد.

به طور کلی، در پژوهش‌های پیشین، کمتر به روش برنامه‌ریزی ریاضی با ارزیابی هم‌زمان سود کشاورز و تحلیل تأثیرات علت و معلولی عوامل تأثیرگذار توجه شده است. در این راستا، این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات قیمت آب بر سود کشاورز با توجه به وضعیت منابع آب قابل بهره‌برداری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (به عنوان یکی از مناطق مواجه با کم‌آبی) می‌پردازد. برای تحقق این امر، از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مثبت برای بهبود وضعیت منابع و مصارف در کشاورزی استفاده شده است. به منظور لحاظ هرچه بیشتر پیچیدگی‌های زیرسامانه‌ها و اندرکنش سامانه‌های مختلف هیدرولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، برای مدل‌سازی و تحلیل بهتر، از روش‌های مبتنی بر کشف رابطه بین متغیرهای مؤثر در رفتار سامانه مورد بررسی، استفاده شده است و به عنوان نوآوری مقاله حاضر، با توجه به آب به عنوان یک

کالای اقتصادی، نسبت به استخراج سازوکارهای حاکم در رابطه با مصرف و تعرفه آب اقدام شده است. در ادامه، توضیحات روش تحقیق ارائه شده، سپس مطالعه موردی و نتایج ارزیابی مطرح شده و در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مواد و روشها

تعاملات بین عرضه، تقاضا و زیرساخت‌ها پیچیده و پویا بوده و بسیاری از اهرم‌های فشار، سامانه را به سمت ناپایداری می‌برند؛ اما جامعه از طریق سیاست‌های محیط زیستی و اقتصادی به این تغییرات و تأثیرات مربوط به فعالیت‌های انسانی واکنش نشان می‌دهد. قیمت‌گذاری مناسب آب می‌تواند با مدیریت تقاضای آب کشاورزی، زمینه توسعه پایدار را فراهم کند. تقاضای زیاد آب در کشاورزی به دلیل اختلاف بالای قیمت تمام‌شده آب با ارزش تولید آن بوده و کشاورزان برای افزایش سود خود، از منابع آب بیش از حد استفاده می‌کنند. این روش قیمت‌گذاری باعث اتلاف آب در مناطق کم‌آب و تخصیص ناکارآمد منابع می‌شود. از این رو با توجه به ماهیت بین رشته‌ای برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست و منابع آب، توجه به مسائل هیدرولوژیکی همراه با مطالعات اجتماعی در مقیاس حوضه و تلاش برای افزایش سود بهره‌برداران، به ویژه کشاورزان (به عنوان پرمصرف‌ترین گروه‌داران سامانه منابع آب)، ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین، مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی می‌تواند به بهبود چالش کم‌آبی (به دلایل عدم رعایت اصول بهره‌برداری، برداشت بی‌رویه و خشکسالی)، کمک کند. دشواری بررسی سیاست‌های کشاورزی در شرایط آزمایشگاهی از چالش‌های اصلی در این حوزه مطالعاتی است. موفقیت یک سیاست تا حد زیادی به واکنش بهره‌برداران بستگی دارد که این واکنش‌ها نیز به شرایط کشت و رفتارهای فردی و اجتماعی آنان مرتبط است؛ بنابراین، داشتن آگاهی نسبی از نتایج اجرای سیاست‌ها در بخش کشاورزی برای سیاست‌گذاران بسیار مطلوب است. برای ارزیابی تأثیرات بالقوه سیاست‌ها در دوره‌های زمانی قبل، حین و بعد از اجرای سیاست، از مدل‌های برنامه‌ریزی استفاده می‌شود. حرکت تعرفه آب به سمت واقعی شدن، می‌تواند به توزیع بهینه منابع و در نهایت افزایش بهره‌وری منجر شود. از منظر اقتصادی، برای مدیریت آب کشاورزی از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مثبت استفاده می‌شود. توجه به اندرکنش متغیرهای مهم و تأثیرگذار در این حرکت و نیز اثرات متقابل قیمت، تقاضا و منابع آب در دسترس برای کاربردی و عملیاتی شدن محاسبات تئوریک می‌تواند راهگشا باشد. مدل‌سازی علی می‌تواند با

ارائه تصویر مشخص و درک مشترک از آثار برخی از سیاست‌های احتمالی، سبب صرفه‌جویی در منابع شده و از تمرکز بر راه‌حل‌های کوتاه‌مدت جلوگیری کند. هرگونه تغییر سازنده بایستی در داخل سامانه و با تأثیر بر حلقه‌های تشکیل‌دهنده رفتار سامانه، تعیین و سپس اجرایی شود. شکل ۱ چارچوب روش پژوهش این مطالعه را نشان می‌دهد.

۳- برنامه‌ریزی ریاضی مثبت در اقتصاد آب

در مواردی که برنامه‌ریزی ریاضی به عنوان ابزار تحلیل سیاست استفاده می‌شود، به دلایل مختلف مانند کمبود داده‌ها، تحلیل نادرست تابع هدف یا محدودیت‌ها و انتخاب فرضیات غیر واقعی برای مدل، نتایج می‌توانند منعکس‌کننده واقعیت نباشند. ساده‌سازی‌ها و افزودن محدودیت‌های خطی، می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن نتایج مدل سبب غیر واقعی شدن آن‌ها شود (Buysse et al., 2007). برای رفع این مشکل، (Howitt (1995) دیدگاه متفاوتی از برنامه‌ریزی ریاضی را پیشنهاد کرد که از الزامات انعطاف‌پذیرتری نسبت به محدودیت‌های خطی سنتی استفاده می‌کند و بر اساس استخراج توابع عملکرد غیرخطی از داده‌های سال پایه و کالیبراسیون، داده‌های عملکرد محصول در دوره‌های قبلی با یک روش سه‌مرحله‌ای به دست می‌آید. در این راستا، یک مسئله بهینه‌سازی کاربرد سیاست‌های کشاورزی را می‌توان به صورت زیر نوشت (Howitt, 1995):

$$\text{Max } Z = R_x - C_x$$

s.t :

$$\begin{aligned} Ax &\leq b & [\lambda] \\ x &\leq x_0 + \varepsilon & [p] \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن Z تابع هدف (سود)، R بردار $(n \times 1)$ درآمد ناشی از فعالیت، x بردار $(n \times 1)$ سطوح زیر کشت، C بردار $(n \times 1)$ هزینه هر واحد فعالیت، A ماتریس $(m \times n)$ ضرایب مربوط به محدودیت منابع، b بردار $(m \times 1)$ منابع در دسترس، x_0 بردار $(n \times 1)$ غیرمنفی از سطوح مشاهده شده فعالیت، ε برداری $(n \times 1)$ متشکل از اعداد مثبت کوچک است تا از وابستگی خطی بین محدودیت‌های ساختاری و واسنجی جلوگیری شود، λ برداری $(m \times 1)$ از متغیرهای دوگان متناظر با محدودیت منابع و p برداری $(n \times 1)$ از متغیرهای دوگان متناظر با محدودیت‌های کالیبراسیون است.

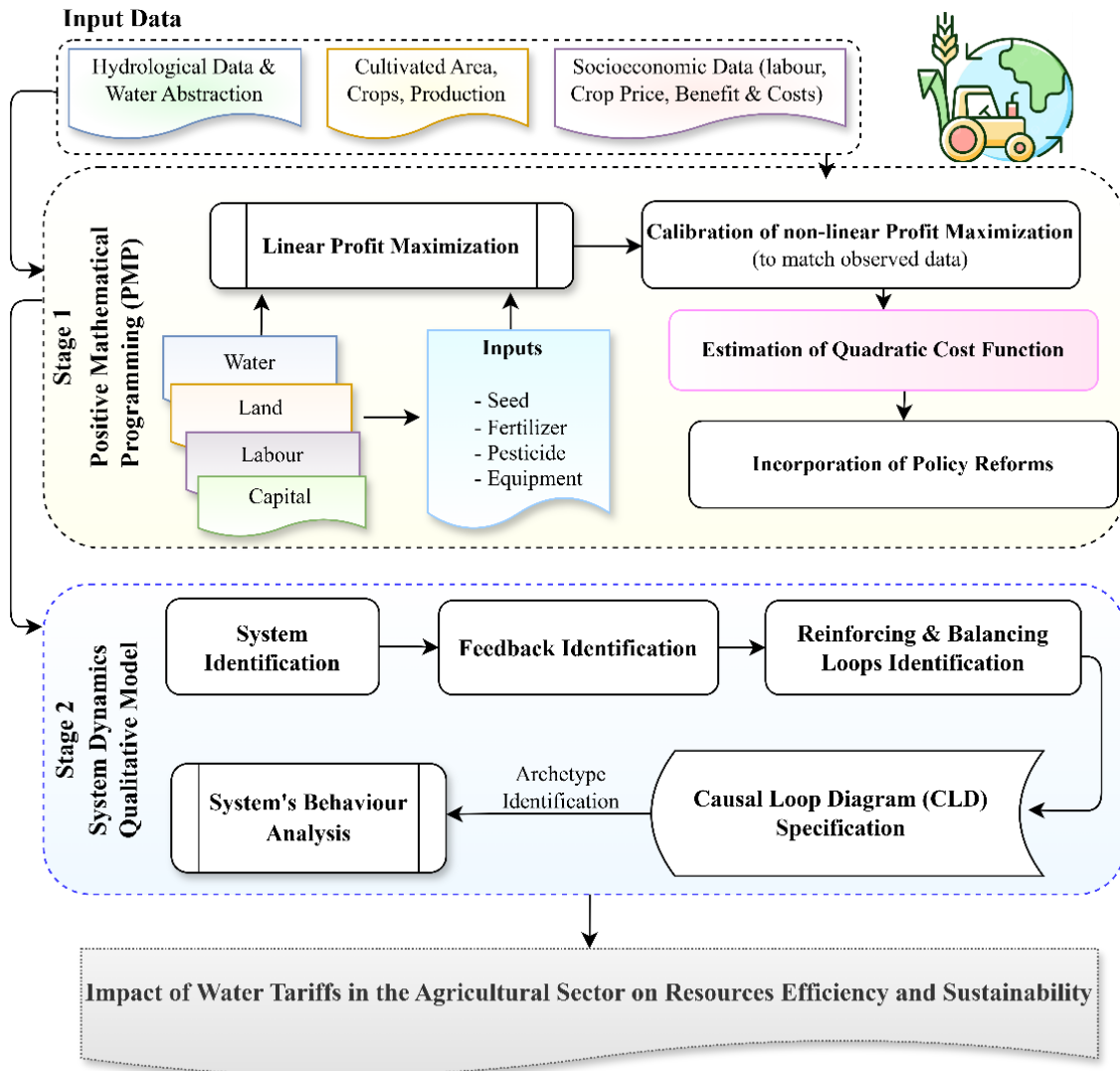


Fig. 1- Impact of water tariffs in the agricultural sector on water resource productivity and sustainability
 شکل ۱- تأثیر تعرفه آب در بخش کشاورزی بر بهره‌وری و پایداری منابع آب

$$MC^v(x) = \nabla C^v(x)'_{x_0} = d + Qx_0 = C + p \quad (3)$$

که در آن $\nabla C^v(x)$ که بردار گرادیان $(n \times 1)$ از مشتقات مرتبه اول $C^v(x)$ برای $x = x_0$ است. در گام سوم الگوی غیرخطی برآورد شده در گام دوم، در تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته و سیاست‌ها شبیه‌سازی می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= R'x - \hat{d}x - \hat{x}Qx/2 \\ \text{s. t:} & \\ Ax &\leq b \quad [\lambda] \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

در گام دوم، از مقادیر محدودیت‌های این الگو و اطلاعات دوگان مرحله قبل استفاده می‌شود تا یک تابع هدف درجه دوم الگوی غیرخطی جدید برای شرایط سال پایه ارائه و کالیبراسیون انجام شود (Sefidgari & Ebrahimi, 2024):

$$C^v(x) = \hat{d}x + \hat{x}Qx/2 \quad (2)$$

در این تابع، d برداری $(n \times 1)$ متشکل از پارامترهای جزء خطی تابع هزینه، Q ماتریسی $(n \times n)$ که از پارامترهای درجه دوم تابع هزینه است که مثبت، نیمه‌معین و متقارن است. در ادامه، بردار هزینه نهایی متغیر متناظر با تابع هزینه درجه دوم (MC^v) ، برابر با مجموع هزینه تولید C و بردار هزینه نهایی تفاضلی p به صورت زیر محاسبه می‌شود:

۴- پویایی‌های سامانه و روابط علی

غالباً مفاهیم اقتصادی برای تنظیم تقاضای آب و حفاظت از منابع با ذهنیت مصرف‌کنندگانی که از تعرفه پایین آب بهره‌مند می‌شوند، همخوانی ندارد. در عمل، مقاومتی در برابر افزایش تعرفه آب کشاورزی وجود دارد، درحالی‌که قیمت آب کشاورزی بسیار کمتر از قیمت آب برای خانوارها و صنایع است. زمانی که آب کمیاب شود، ارزش نهایی آن افزایش می‌یابد و از دیدگاه اقتصادی، هنگامی که عرضه آب فراوان می‌شود، این ارزش تقریباً به صفر می‌رسد. برای دستیابی به اهداف این مطالعه، مدل PMP در مرحله اول مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل ماهیت ایستای نتایج PMP که در آن به بازخورد در سامانه کشاورزی و آب توجه نمی‌شود، در مرحله دوم، یک مدل پویایی‌های سامانه توسعه یافت. پویایی‌های سامانه یک رویکرد برای مدل‌سازی شبیه‌سازی استراتژیک و سیاستی بر اساس نظریه سامانه‌های بازخورد است. این رویکرد کمک می‌کند تا مزایا و معایب گزینه‌های مختلف احتمالی، بهتر ارزیابی شوند.

یکی از دلایل اصلی برای استفاده از SD در پروژه‌های مدیریت منابع آب و محیط زیست، توانایی آن در ثبت و توضیح رفتار سامانه است. SD به آشکارسازی و شبیه‌سازی تأثیر روابط پیچیده بین عناصر سامانه کمک می‌کند. با استفاده از این رویکرد می‌توان شبیه‌سازی‌هایی تولید نمود که به پژوهشگران امکان ارزیابی موارد «چه می‌شود اگر» و آزمایش سیاست‌ها در شرایط مختلف را می‌دهد. برای مطالعه و مدیریت سامانه‌های بازخورد پیچیده مدل‌سازی SD می‌تواند با ارائه درکی از تعاملات بین اجزای مختلف سامانه و رفتارها استفاده شود و سیاست‌های مدیریتی جایگزین را ارزیابی کند. به عبارت دیگر این مدل‌ها، سکویی مبتنی بر بازخورد را فراهم می‌کنند تا زمینه مناسب‌تری برای تصمیم‌گیری‌های انعطاف‌پذیر فراهم کنند. حلقه‌های بازخورد با نمایش تعامل شفاف اجزای یک سامانه، از مزایای اصلی مدل‌های SD هستند که می‌توانند رفتار سامانه را تحت طیف معینی از شرایط به طور دقیق توصیف کرده و آن‌ها را برای یافتن راه‌حل‌های قابل قبول ترکیب کنند (Ebrahimi & Karamouz, 2022). در علم پویایی‌های سامانه، نمودار حلقه‌های علت و معلولی (CLD)³، تکنیکی کیفی برای بررسی دامنه و ساختار مسئله است که شامل روابط متقابل متغیرها، بازخوردها و حلقه‌های بسته می‌شود (Karamouz et al., 2021). هدف اصلی از نمودارهای علی، نشان دادن فرایندهای بازخورد در یک سامانه است. توسعه CLDها برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات و ارائه یک درک مشترک از مسئله، ضروری است. CLD به عنوان یک روش کیفی، می‌تواند برای ترسیم ساختار مسئله (متغیرها، روابط و حلقه‌های بازخورد) مورد استفاده قرار گیرد. CLDها شامل متغیرهایی هستند که با پیکان‌ها به هم متصل و با علائم مثبت/ منفی نشانه‌گذاری شده‌اند تا رابطه علی بین متغیرهای سامانه را نشان دهند.

که در آن، بردار d و ماتریس Q پارامترهای کالیبره شده تابع غیرخطی می‌باشند. الگوی غیرخطی کالیبره شده، سطوح فعالیت مشاهده شده در سال پایه و مقادیر دوگان محدودیت منابع را باز تولید کرده و برای شبیه‌سازی تغییرات در پارامترهای مطلوب آماده می‌کند. در این مقاله، مدل‌سازی برای سال پایه با استفاده از نرم‌افزار GAMS 24 انجام شده و بر اساس مؤلفه‌های آب، سطح زیر کشت، نیروی کار و نهاده‌های کشاورزی (شکل ۱)، سود بهینه کشاورز به دست می‌آید (Ebrahimi, 2022):

$$B_{Ag_k} = \sum_{g=1}^z \sum_{i=1}^c (P_{kig} \times Y_{kig} - C_{kig}) \times X_{kig} \quad (5)$$

که در آن B_{Ag_k} سود کشاورزان (ریال) در سال k ام، X_{kig} سطح تخصیص یافته برای محصول i در منطقه g و در سال k ام (هکتار)، P_{kig} قیمت محصول i در منطقه g و در سال k ام (ریال/کیلوگرم)، Y_{kig} تابع عملکرد کالیبره شده برای محصول i در منطقه g و در سال k ام (کیلوگرم/هکتار)، C_{kig} مقدار هزینه متغیر برای محصول i در منطقه g و در سال k ام (ریال/هکتار) و z و c به ترتیب تعداد کل محدوده‌های مطالعاتی و محصولات هستند. دو دسته کلی محدودیت‌های تولید، کالیبراسیون و منابع (شامل اراضی، آب، نیروی کار، نهاده‌های کشاورزی)، به شرح زیر نمایش داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{s. t:} \\ \sum_{i=1}^c X_{kig} &\leq A \quad \forall g, \forall k \\ \sum_{g=1}^z \sum_{i=1}^c W_{kig} X_{kig} &\leq AIN_{ki} \quad \forall k \\ \sum_{g=1}^z \sum_{i=1}^c L_{kig} X_{kig} &\leq AL_{ki} \quad \forall k \\ \sum_{g=1}^z \sum_{i=1}^c IN_{kig} X_{kig} &\leq AIN_{ki} \quad \forall k \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن X_{kig} اراضی تخصیص یافته (هکتار) برای منطقه g ، A اراضی قابل کشت (هکتار)، AIN_{ki} منابع آب در دسترس (مترمکعب) و W_{kig} نیاز آبی محصول (مترمکعب/هکتار) است. AL_{ki} نیروی کار (نفر روز کار) و L_{kig} نیروی کار مورد نیاز فعالیت کشاورزی ((کار روز نفر)/هکتار) هست. AIN_{ki} نهاده‌های در دسترس (کیلوگرم) و IN_{kig} نهاده‌های مورد نیاز (کیلوگرم/هکتار) هستند. اندیس‌های k ، i و g به ترتیب نشان‌دهنده سال، محصول و منطقه بوده و z و c به ترتیب نشانگر تعداد کل محدوده‌های مطالعاتی و محصولات هستند.

و امکان نمایش دقیق تر پاسخ سامانه به شرایط متغیر را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، تعامل بین عناصر مختلف، از جمله جمعیت، کشاورزی، متغیرهای اقلیمی، عرضه آب و تقاضای آب بررسی می‌شود.

۵- مطالعه موردی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه (مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 30'$ تا $35^{\circ} 40'$ شرقی شمالی)، با 51786 کیلومترمربع مساحت در شمال غرب ایران قرار گرفته است. این حوضه آبریز و ایستگاه‌های پایش آن در شکل ۲ نشان داده شده است (Ebrahimi & Zarghami, 2019).

علامت مثبت نشان‌دهنده این است که تغییرات علت و اثر در یک جهت رخ می‌دهند (و برعکس).

ترکیب روابط مثبت و منفی می‌تواند منتج به تشکیل حلقه‌های بازخوردی شود. حلقه‌های بسته بازخوردی ممکن است تقویتی $(R)^+$ یا تعادلی $(B)^0$ باشند که بر اساس آن اثر تغییر هر متغیر توسعه‌یافته و متغیر را تقویت می‌کند یا بالعکس (Sterman, 2000). در یک حلقه تقویتی، تأثیر تغییر هر متغیر، متغیر دیگر را تقویت می‌کند. در حالی که در یک حلقه تعادلی، عکس این قضیه برقرار است (Karamouz et al., 2021). در مطالعه حاضر، این مدل برای مطالعه رفتار سامانه آب در بلندمدت به عنوان نتیجه اصلاح سیاست‌های کشاورزی طراحی شده است. کاربرد این روش سبب سازگاری بیشتر با جهان واقعی شده

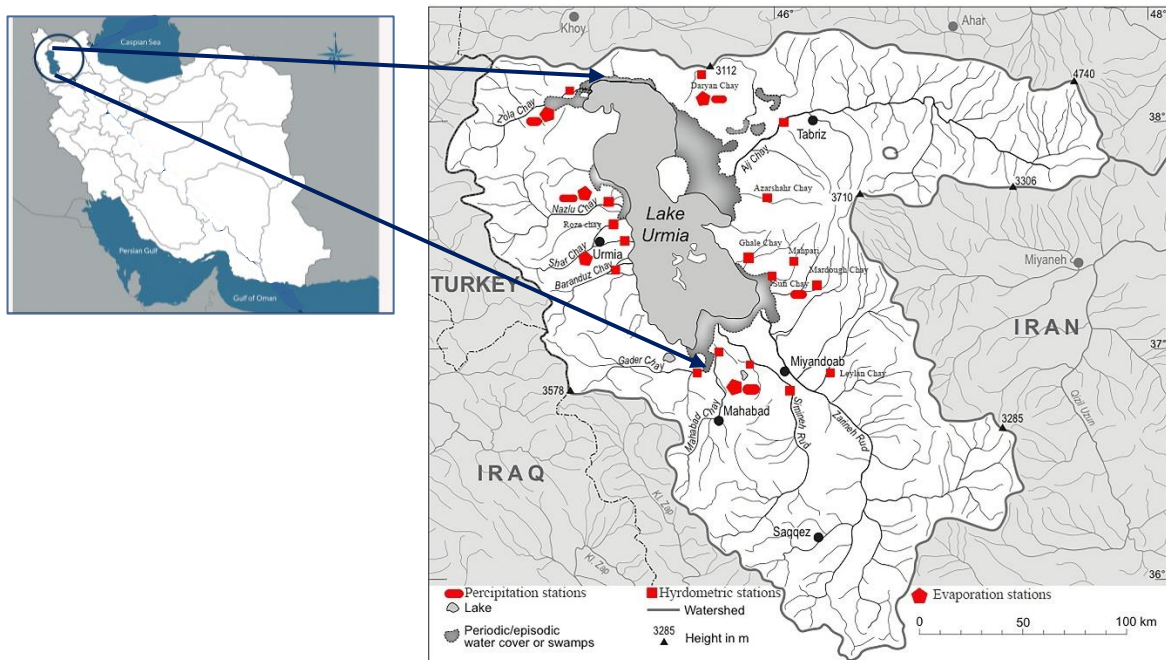


Fig. 2- Hydrological characteristics of the Urmia Lake Watershed

شکل ۲- مشخصات هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مورد بررسی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد (Sefidgari & Ebrahimi, 2024).

بر اساس آمار، حدود ۷۰ درصد از سطوح زیر کشت این حوضه آبریز را اراضی زراعی (با راندمان آبیاری حدود ۳۷ درصد) و بقیه را اراضی باغی (با راندمان آبیاری حدود ۴۵ درصد) تشکیل می‌دهند (Ebrahimi & Zarghami, 2017). محصولات زراعی غالب (محصولات با سطح زیر کشت بالا یا محصولات پرآب‌بر) در منطقه مورد مطالعه (به تفکیک در دو استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی) در جدول ۱ نشان داده شده‌اند (Statistical Center of Iran, 2023).

محصولات غالب شامل گندم، جو، یونجه، چغندر قند و سیب‌زمینی هستند (جدول ۱). جدول ۲ مقادیر ورودی مدل‌سازی برای محصولات

Table 1- Dominant agricultural products in the Urmia Lake Watershed

جدول ۱- محصولات زراعی غالب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

Barley		Alfalfa		Potato		Sugar Beet		Wheat		Crop
Production	Area	Production	Area	Production	Area	Production	Area	Production	Area	Region
21171	15450	847398	86173	45200	1440	1666193	32260	112954	70775	West Azerbaijan
18849	22340	302252	51589	152103	4579	7402	163	69054	55187	East Azerbaijan

۶- نتایج و تحلیل نتایج

آب در کشاورزی به دلیل اختلاف بالای قیمت تمام شده آب با ارزش تولید آن بوده و کشاورزان برای افزایش سود خود، از منابع آب بیش از حد استفاده می‌کنند، این مساله در تحلیل وضعیت و سیاستگذاری‌ها لحاظ شده است. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، هفت سناریو شامل افزایش تعرفه آب (از قیمت پایه ۳۰۰ ریال)، افزایش راندمان آبیاری (با تغییر سامانه آبیاری از حالت غرقابی با راندمان ۴۰ درصدی به مکانیزه) در مقیاس‌های مختلف و ترکیبی از این دو بررسی شد تا اثر تغییرات بر سود کشاورزی برآورد شود. سناریوهای هفتگانه به شرح زیر هستند: (۱) افزایش ۱۰۰ درصدی تعرفه آب؛ (۲) افزایش ۱۰۰۰ درصدی تعرفه آب؛ (۳) افزایش ۲۰۰۰ درصدی تعرفه آب؛ (۴) افزایش ۳۰ درصدی راندمان آبیاری؛ (۵) افزایش ۵۰ درصدی راندمان آبیاری؛ (۶) ترکیب سناریوهای ۲ و ۴؛ (۷) ترکیب سناریوهای ۳ و ۵. شکل ۳، تأثیر اعمال سناریوهای مدیریتی بر سود کشاورزی را نمایش می‌دهد.

در مطالعه حاضر به منظور تحلیل ریاضیاتی تأثیرات تغییر تعرفه آب بر مصارف و سودآوری، از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت استفاده شده است تا سود کشاورزان با کالیبراسیون تابع تولید، به گونه‌ای که بتوان اثرات سیاست‌های مختلف، مانند افزایش یا کاهش قیمت محصولات کشاورزی یا هزینه‌های تولید، بر سطح زیر کشت محصولات را تحلیل نمود، محاسبه شود. جدول ۳ داده‌های مالی و قیمت متغیرهای ورودی مدل‌سازی برای محصولات مورد بررسی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. استخراج اطلاعات، از داده‌های سالنامه آماری سازمان آمار کشور و داده‌های جهاد کشاورزی انجام شده است (Statistical Center of Iran, 2023). در مواردی که داده‌های آماری کافی در دسترس نبوده، محاسبات بر اساس روند داده‌های قبلی انجام شده است. بر اساس جدول ۳، سود کشاورزی در این منطقه، برابر با ۴۶۷ هزار میلیارد تومان برآورد شده است. از آنجمله که عموماً تقاضای زیاد

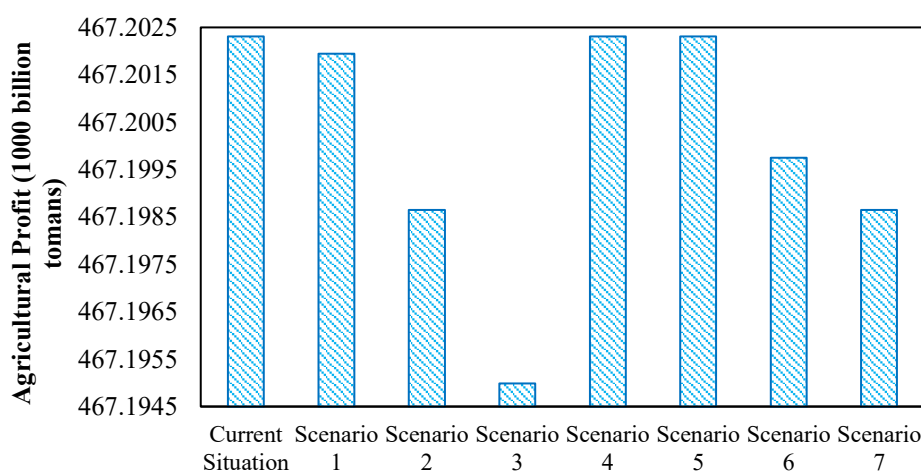


Fig. 3- Changes in agricultural profit corresponding to management scenarios in the study area

شکل ۳- تغییرات سود کشاورزی متناظر با سناریوهای مدیریتی در منطقه مطالعاتی

Table 2- Input values for modeling of examined products per unit area in the study area
جدول ۲- مقادیر ورودی مدل‌سازی برای محصولات مورد بررسی در واحد سطح منطقه مطالعاتی

Sugar Beet				Potato				Alfalfa				Barley				Wheat			
Labor (person.day)	Capital (kg)	Water (m ³)	Cultivated Area (ha)	Labor (person.day)	Capital (kg)	Water (m ³)	Cultivated Area (ha)	Labor (person.day)	Capital (kg)	Water (m ³)	Cultivated Area (ha)	Labor (person.day)	Capital (kg)	Water (m ³)	Cultivated Area (ha)	Labor (person.day)	Capital (kg)	Water (m ³)	Cultivated Area (ha)
44	134	17486	163	68	2856	15135	4579	29	212	17928	51588	16	280	4793	22340	18	374	6883	55187
44	134	16811	32260	24	2179	14568	1440	18	208	17559	86173	11	346	4423	15450	11	343	6405	70757
																East Azerbaijan			
																West Azerbaijan			

Table 3- Financial data (Rials) of input factors for modeling of examined products in the study area

جدول ۳- داده‌های مالی (ریال) عوامل ورودی مدل‌سازی برای محصولات مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

Sugar Beet				Potato				Alfalfa				Barley				Wheat			
Labor	Capital	Water	Land	Labor	Capital	Water	Land	Labor	Capital	Water	Land	Labor	Capital	Water	Land	Labor	Capital	Water	Land
2850666	3230038	300	24780900	2850666	334646	300	28180000	2850666	528854	300	16361537	2850666	253739	300	8445000	2850666	278193	300	11225800
2355769	3230038	300	13810000	2355769	262713	300	15708000	2355769	444278	300	9118000	2355769	119195	300	4001000	2355769	281860	300	3121000
																East Azerbaijan			
																West Azerbaijan			

Table 4- Output data and level of agricultural profit analyzed in the study area
جدول ۴- داده‌های خروجی و میزان سود کشاورزی مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

Scenario 7	Scenario 6	Scenario 5	Scenario 4	Scenario 3	Scenario 2	Scenario 1	Current Status
Scenario 3,5	Scenario 2, 4	Efficiency Increase	Efficiency Increase	× 2000 tariff	× 1000 tariff	× 100 tariff	Flood Irrigation
50	30	50	30	0	0	0	0
600000	30000	300	300	600000	300000	30000	300
467.19865	467.19975	467.2023	467.20231	467.19499	467.19865	467.20195	467.2023
							Efficiency Increase (%)
							Water Tariff (Rials)
							Agricultural Profit (10¹³ Rials)

روابط علت و معلولی و تشخیص بازخوردهای مختلف حاکم بر سامانه مورد مطالعه و اندرکنش آنها پرداخته است. شکل ۴ نمودار حلقه‌های علت و معلولی را برای مسئله مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حلقه‌های علت و معلولی نشان داده شده در شکل ۴، متشکل از بازخوردهای مثبت و منفی هستند. برای نمایش بهتر وضعیت متغیرهای تأثیرگذار، تلاش شده است تا با رنگ‌بندی‌های قرمز برای حلقه‌های تعادلی و سبز برای حلقه‌های تقویتی، ارتباطات بین حلقه‌ها مشخص‌تر ارائه شود. بر اساس شکل ۴ و تحلیل اندرکنش‌های بین حلقه‌های بسته تعادلی و تقویتی موجود، با تمرکز بر تأثیر تغییر تعرفه آب بر متغیرهای مختلف مؤثر بر بهره‌وری و پایداری منابع آب، می‌توان کهن‌الگوهای^۹ تعیین‌کننده رفتار سامانه را شناسایی و مورد بررسی قرار داد. متغیرهای ارائه شده در شکل ۴ و واحدشان در جدول ۵ ارائه شده است.

سناریوی سوم و سناریوی هفتم (شامل افزایش تعرفه آب به صورت حدی) غیرعملیاتی بوده و سناریوی پنجم و ششم (سناریوهای منتخب در این پژوهش)، شامل افزایش تعرفه آب و تبدیل سامانه آبیاری غرقابی در حدود نیمی از اراضی تحت کشت به آبیاری مکانیزه است. در این سناریوها، تعرفه آب تا ۳۰۰۰ تومان و تبدیل نصف اراضی غرقابی به آبیاری مکانیزه مدنظر قرار گرفته است. به منظور تفسیر بهتر و بررسی دقیقتر نتایج مدلسازی ریاضی، به ارزیابی سازوکار سامانه پرداخته شده است. از منظر تحلیل رفتار سامانه‌های پیچیده و بغرنج، مانند بیشتر مسائل مربوط به پایداری محیط زیستی و منابع آب، و سایر حالت‌های رفتاری متداول (از جمله راه‌حل‌های منجر به شکست^۶، محدودیت رشد^۷، محدودیت رشد با نوسان و فروپاشی^۸) از فعل و انفعالات غیرخطی ساختارهای بازخورد اساسی (منفی، مثبت و تأخیر در صورت وجود)، ناشی می‌شوند. بر همین اساس، پژوهش حاضر به بررسی و استخراج

Table 5- Governing variables in the studied system and in Causal Loop Diagrams (CLDs)

جدول ۵- متغیرهای تأثیرگذار در سامانه مورد مطالعه و موجود در حلقه‌های علت و معلولی

Variable	Dimension	Variable	Dimension
Water Stress	Dmnl	Supply Augmentation	MCM
Available Water	MCM	Farmers' Water Cost	Rials
Irrigation Water Use	MCM	Unregulated Irrigation Water Use	MCM
Demand Management	Dmnl	Tariff Hike Acceptance	Dmnl
Irrigation Efficiency	Dmnl	Cultivated Area	ha
Irrigation Water Demand	MCM	Arable Area	ha
Irrigation Water Tariff	Rials	Budget Shortfall	Rials
Regulation and Enforcement	Dmnl	Pressure to Increase Water Supply	Dmnl
Total Water Supply	MCM	Irrigation Use Revenue	Rials
Investment in Efficient Irrigation Technologies	Rials	Public Water Use Saving Incentive	Dmnl
Agricultural Production	ton	Pressure to Decrease Water Use	Dmnl
Agricultural Income	Rials	Possible Water Service Gains	Dmnl

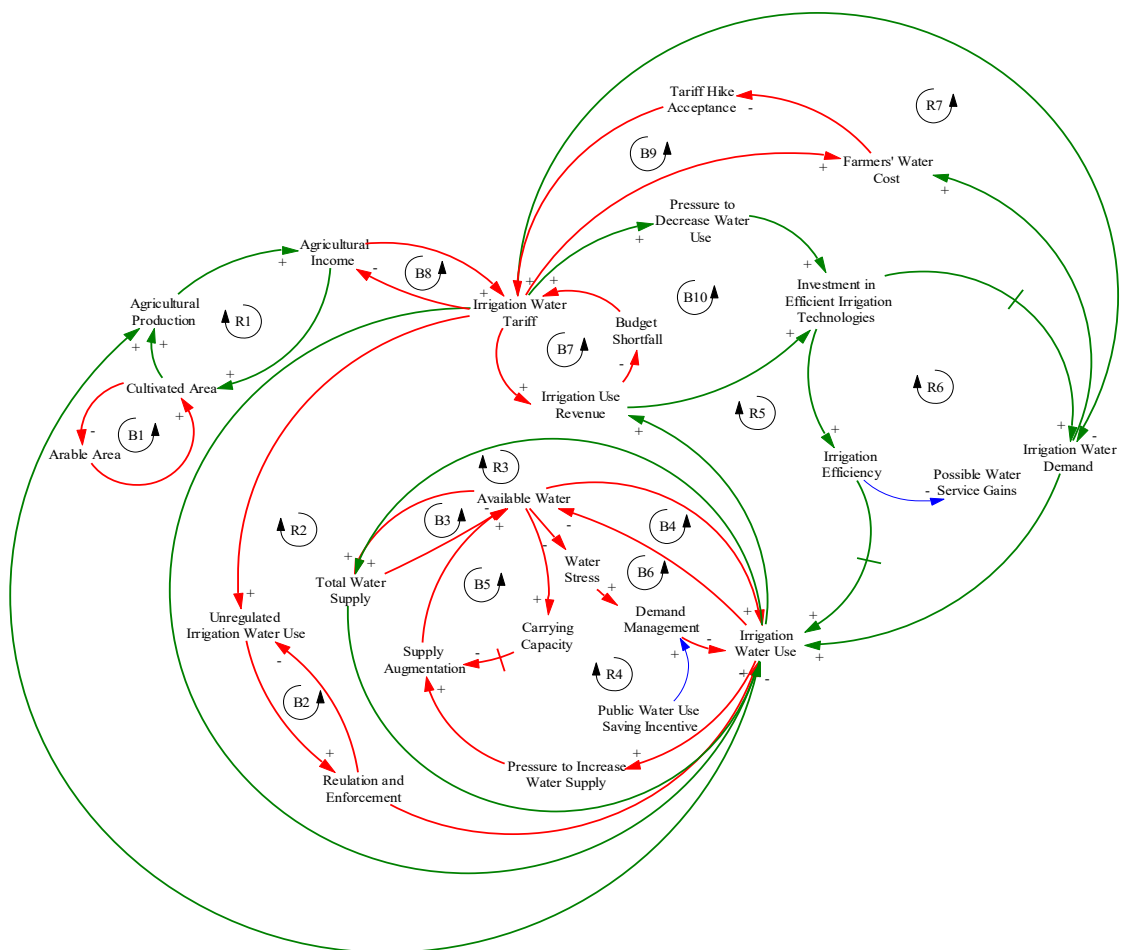


Fig. 4- Causal loops governing the studied system; impact of water tariffs on water resource sustainability
 شکل ۴- حلقه‌های علت و معلولی حاکم بر سامانه مورد مطالعه؛ تأثیر تعرفه آب بر پایداری منابع آب

R3: هرچه مصرف آب در بخش کشاورزی بیشتر شود، تأمین آب بیشتر می‌شود و تأمین آب بیشتر خود سبب افزایش مصرف آب (به دلیل القای ذهنیت آب همیشه هست و تأمین خواهد شد)، می‌شود.
 R4: هرچه آب در دسترس بیشتر باشد، مصرف آب در کشاورزی بیشتر می‌شود. مصرف بیشتر آب منجر به افزایش فشار برای عرضه هرچه بیشتر آب شده و تلاش برای افزایش امنیت آبی (و استفاده بهتر از منابع) را افزایش می‌دهد و این افزایش منجر به افزایش آب در دسترس خواهد شد.
 R5: افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب سبب سرمایه‌گذاری بیشتر روی تکنولوژی‌های افزایش راندمان می‌شود. این سرمایه‌گذاری منجر به افزایش راندمان آبیاری شده و با افزایش راندمان کشاورزی، مصرف آب در بخش کشاورزی افزایش می‌یابد (اثر بازگشتی^۱).
 افزایش مصرف آب آبیاری سبب افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب شده و این چرخه ادامه می‌یابد.

حلقه‌های موجود در شکل ۴ را می‌توان به شرح زیر در دو دسته حلقه‌های تقویتی و تعادلی خلاصه نمود. تشریح روابط عملکردی و کهن‌الگوهای حاکم بر سامانه با استفاده از حلقه‌های تقویتی شامل R1 تا R7 ارائه شده است:
 R1: افزایش تولیدات کشاورزی در منطقه، افزایش درآمد بخش کشاورزی را به دنبال دارد. افزایش درآمد سبب افزایش سطح زیر کشت برای حصول تولید بیشتر و درآمد بیشتر می‌شود.
 R2: افزایش تعرفه منجر به افزایش مصارف غیرمجاز می‌شود که این خود سبب تقویت قوانین مرتبط برای جلوگیری از مصارف غیر مجاز می‌شود. با افزایش قوانین سخت‌گیرانه، مصرف آب در بخش کشاورزی کاهش می‌یابد. از آنجاکه هرچه آب بیشتری مصرف شود درآمد سازمان‌های تخصیص آب افزایش بیشتری پیدا می‌کند و افزایش درآمد آنها منجر به کاهش کسری بودجه سازمان‌های تخصیص آب می‌شود، هر چه کسری بودجه بیشتری در سازمان وجود داشته زمینه بیشتری برای افزایش تعرفه آب فراهم خواهد شد.

R6: افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب سبب سرمایه‌گذاری بیشتر روی تکنولوژی‌های افزایش راندمان می‌شود. این سرمایه‌گذاری منجر به افزایش تقاضای آب شده (رجوع به توضیح حلقه R5) و افزایش مصرف آب آبیاری منجر به افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب می‌شود.

R7: تعرفه آب بیشتر باشد، سبب کاهش تقاضای آب در بخش کشاورزی می‌شود. هرچه کشاورز تقاضای آب بیشتری داشته باشد مصرف آب بیشتری دارد و از آنجا که هرچه مصرف آب بیشتر، درآمد سازمان‌های تخصیص آب بیشتر، افزایش درآمد آنها منجر به کاهش کسری بودجه سازمان‌های تخصیص آب می‌شود، هرچه کسری بودجه سازمان بیشتر، زمینه بیشتری برای افزایش تعرفه آب فراهم خواهد بود.

تشریح روابط عملکردی و کهن‌الگوهای حاکم بر سامانه بر اساس حلقه‌های تعادلی (B1 تا B10) به صورت زیر است:

B1: با افزایش هر چه بیشتر سطوح زیر کشت، اراضی قابل کشت منطقه کمتر می‌شود.

B2: با افزایش مصارف غیرمجاز، قوانین سخت‌گیرانه افزایش می‌یابند.

B3 و B4: با افزایش تأمین، آب در دسترس کاهش می‌یابد و هرچه آب در دسترس بیشتر، مصرف آب بیشتر.

B5: کاهش منابع آب در دسترس منجر به کاهش ظرفیت برد شده و کاهش ظرفیت برد سبب توجه بیشتر به امنیت آبی برای افزایش منابع آب در دسترس می‌شود.

B6: کاهش منابع آب در دسترس سبب افزایش تنش آبی شده و سامانه را به سمت مدیریت تقاضا پیش می‌برد. مدیریت تقاضا سبب کاهش مصرف شده که افزایش منابع آب در دسترس را به دنبال خواهد داشت.

B7: افزایش تعرفه منجر به افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب شده و این خود باعث کاهش کسری بودجه می‌شود. هرچه کسری بودجه بیشتر، تعرفه آب بیشتر.

B8 و B9: افزایش تعرفه سبب کاهش درآمد شده و درآمد بیشتر موجبات افزایش بیشتر تعرفه آب را فراهم می‌کند.

B10: افزایش تعرفه آب سبب افزایش فشار برای کاهش مصرف آب می‌شود، این افزایش فشار سبب افزایش سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی‌های آبیاری با راندمان بالا می‌شود. با افزایش سرمایه‌گذاری، راندمان آبیاری افزایش یافته و مطابق با اثر بازگشتی، سبب افزایش مصرف آب می‌شود. مصرف آب بیشتر، با افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب شده و این باعث کاهش کسری بودجه می‌شود. هرچه کسری بودجه بیشتر، تعرفه آب بیشتر.

در منطقه مورد مطالعه، با توجه به سوابق تاریخی و سیاست‌گذاری‌های ملی و منطقه‌ای، مطلوبیت کشاورزی در این محدوده افزایش یافته است. افزایش تقاضا برای کشاورزی و به تبع آن افزایش سطح زیر کشت مستقیماً باعث افزایش مصرف آب شده است؛ لذا یک حلقه تقویتی مرتبط با رشد کشاورزی با هدف توسعه و افزایش درآمد در محدوده وجود دارد. این حلقه تقویتی باعث بهره‌برداری روزافزون سطح قابل کشت و مصرف آب شده است؛ اما به دلیل محدودیت منابع طبیعی، سطح قابل کشت و منابع آب در دسترس آن را با محدودیت مواجه نموده‌اند. حال آنکه با توجه به هدف این مطالعه و تحلیل اثر افزایش تعرفه آب بر مدیریت منابع آب منطقه مطالعاتی، افزایش تعرفه آب به طور مستقیمی بر درآمد کشاورزی (منتج از توسعه بیشتر کشاورزی و تولیدات بیشتر) اثر گذاشته و رشد آن را محدود می‌کند. لذا، نظر به فعال شدن حلقه تعادلی محدودیت منابع در دسترس و زمین‌های قابل کشت، در حال حاضر و با تعرفه‌های فعلی، روند برداشت از منابع و توسعه کشت در حال توسعه است (الگوی رفتاری محدودیت رشد).

بعد دیگر افزایش تعرفه آب، افزایش درآمد سازمان‌های تخصیص آب (وزارت نیرو) است. این افزایش درآمد می‌تواند روی کسری بودجه تأثیر گذاشته و تمایل به ایجاد بستر مناسب برای افزایش تعرفه را فراهم نماید. از سوی دیگر، سرمایه‌گذاری‌های روی راهکارها و تکنولوژی‌های افزایش بهره‌وری با بهبود وضعیت بودجه وزارت نیرو می‌تواند در دستور کار قرار بگیرد. با افزایش راندمان سامانه‌های آبیاری، با فعال شدن اثر بازگشتی، مصرف آب در بخش کشاورزی افزایش می‌یابد (افزایش توانایی استحصال آب با استفاده از تکنولوژی و مکانیزاسیون). سازوکار رشد در بخش کشاورزی تولید درآمد و همچنین افزایش مصرف آب را به دنبال دارد. در این الگو حلقه تقویتی بخش کشاورزی منجر به تأمین هرچه بیشتر آب مصرفی در این بخش می‌شود و در کنار حلقه تعادلی، نشان‌دهنده تأثیر محدودکننده منابع موجود بر این رشد است. با این حال، در چنین مدل‌سازی‌هایی فرض بر این است که متغیرهای تعیین‌کننده در این مسئله، دائماً بر مدیران و مصرف‌کنندگان آب که مسئولیت تصمیم‌گیری را برعهده دارند، فشار وارد می‌کنند. بنابراین آنها تمایل به جستجوی راه‌حل‌های سریع برای این مسئله دارند (Aslani et al., 2023). در این زمینه، از سوی دیگر با گسترش استفاده از راه‌حل‌های تکنولوژیکی (با هدف افزایش راندمان و یا افزایش عرضه)، وضعیت منابع آب در دسترس با تشدید تنش آبی، محتمل است. با تأمین هرچه بیشتر آب، مصرف و تقاضای آب روند افزایشی داشته و راهکارهای تأمین آب در بلندمدت باعث تقویت فرایندهای رشد شده‌اند. در واقع راهکارهای تکنولوژیکی که به عنوان راه‌حل کاهش تنش آب مطرح شده بودند، در بلندمدت سبب تقویت تنش آب می‌شوند (الگوی رفتاری راه‌حل‌های منتج به شکست).

نظر به بازخوردهای موجود بین متغیرهای مؤثر بر سامانه و با توجه به ابعاد پیچیده اجتماعی، اقتصادی و سیاسی افزایش تعرفه آب، به نظر می‌رسد که افزایش شدید تعرفه آب همچنان نمی‌تواند در مقایسه با تغییر سامانه آبیاری و افزایش راندمان آن، برای بهره‌وری مصرف آب و پایداری منابع، مؤثرتر باشد؛ بنابراین، سناریوی پنجم (تغییر سامانه آبیاری در نصف اراضی زیرکشت از حالت غرقابی به مکانیزه)، همچنان به عنوان سناریوی برتر معرفی می‌شود. این نتیجه با یافته‌های مطالعه (Ebrahimi (2022) در منطقه حوضه آبریز طشک بختگان نیز همخوانی دارد. با این حال، باید توجه داشت که افزایش راندمان آبیاری بدون برنامه‌ریزی دقیق می‌تواند منجر به اثر بازگشتی شود و به منابع آب آسیب بیشتری وارد کند. در حالت اثر بازگشتی، نه تنها مصرف آب افزایش می‌یابد (درحالی‌که انتظار کاهش آن می‌رفت)، بلکه می‌تواند تأثیرات منفی قابل توجهی بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی داشته باشد. پژوهش حاضر، تعدیل قیمت با هدف اساسی کاهش تقاضا (و تعرفه بالاتر جدید) را برای تأمین کنندگان آب (به ویژه در دوره‌های کمیابی آب) ارائه می‌کند. هرچند که با توجه به پیچیدگی‌های مسائل مربوط به مدیریت منابع آب و محیط زیست، در کنار دشواری‌های اجرایی ساختن سیاست‌ها، تحلیل‌های دقیق‌تری در خصوص تغییر تعرفه آب مورد نیاز است. مدل‌سازی علی با ارائه تصویری از آثار سیاست‌های مختلف، سبب احتراز از اتکا به راه‌حل‌های کوتاه‌مدت و حرکت به سمت پایداری منابع شود. به طور کلی، تغییرات زمانی می‌توانند واقعاً سازنده باشند که در داخل سامانه و با تأثیر بر عناصر کلیدی، رفتار سامانه را دستخوش تغییر (به سمت راه‌حل) بنمایند؛ بنابراین شناسایی متغیرهای تعیین‌کننده رفتار سامانه در برای شناسایی راه‌حل‌های مناسب و اجرایی نمودن آنها، نقش اساسی دارد. توجه به تأثیرات احتمالی افزایش تعرفه آب، از یک سو افزایش درآمد وزارت نیرو و کاهش کسری بودجه آن سازمان و از سوی دیگر، کاهش سود کشاورز و اصلاح الگوی مصرف و افزایش بهره‌وری آب که دارای جوانب مختلف و گاه متناقض است، می‌تواند به فهم بهتر مسئله و ارائه راه‌حل‌های عملی مناسب‌تری کمک کند. این بازنگری‌ها و تحلیل‌های همه‌جانبه، می‌تواند به کاهش پیچیدگی‌ها کمک کند و منجر به افزایش سودآوری در بخش کشاورزی و بهبود امنیت آبی منطقه شوند (Jafari Sani et al., 2024).

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مناطقی که از دوره‌های مداوم تنش آبی رنج می‌برند (مانند حوضه آبریز دریاچه ارومیه)، استفاده از قیمت‌های جدید (مبتنی بر کمیابی و با هدف حرکت به سوی پایداری منابع آب) می‌تواند راهی بسیار مؤثر

برای قیمت‌گذاری صحیح استفاده از آب باشد. در مطالعه حاضر، با لحاظ تعرفه‌های بیشتر برای آب (و لحاظ شرایط حدی و تعرفه‌های بسیار زیاد)، تأثیر تغییر تعرفه آب در بخش کشاورزی بر وضعیت منابع آب، به تنهایی و در ترکیب با سایر سیاست‌های مدیریتی بررسی شد. همچنین با توجه به وضعیت منحصر به فرد حوضه دریاچه ارومیه و سامانه‌های پیچیده مختلف اقتصادی، اجتماعی و سیاسی، تعیین دقیق ریشه مسائلی که منطقه با آنها مواجه است بسیار دشوار بوده و نمی‌توان با مدل‌سازی‌های صرفاً ریاضی (نظیر روش PMP)، پاسخ منطقه به تغییرات را مدل‌سازی نمود. به این منظور در مطالعه حاضر سعی شد تا با افزودن دیدگاه پویایی‌های سامانه، دریچه‌ای به افق متفاوتی از ارزیابی‌های مصرف آب در بخش کشاورزی برای منطقه مورد مطالعه ارائه شود.

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که قیمت فعلی آب در مقایسه با سایر هزینه‌های کشاورزی بسیار پایین است و از دیدگاه سامانه‌ای، در حال حاضر و با تعرفه‌های فعلی، روند برداشت از منابع و توسعه کشت در حال توسعه بوده (الگوی رفتاری محدودیت رشد)، از این رو نمی‌توان از آن انتظار صرفه‌جویی و بهبود بهره‌وری آبی داشت. افزایش شدید تعرفه آب نمی‌تواند به اندازه تغییر سامانه آبیاری و افزایش راندمان آن، برای بهره‌وری مصرف آب و پایداری منابع مؤثر باشد؛ بنابراین، سناریوی پنجم به عنوان سناریوی برتر معرفی می‌شود. بررسی دقیق‌تر سناریوی سوم (افزایش بسیار زیاد و غیرقابل اجرای تعرفه آب) و سناریوی هفتم (ترکیب سناریوی سوم و تغییر سامانه آبیاری) نشان‌دهنده تفاوت قابل توجهی در سود کشاورزی است. به نظر می‌رسد با ادامه روند فعلی، منطقه در آینده نزدیک با فروپاشی منابع آب مواجه خواهد شد؛ بنابراین، نیاز به اجرای سیاست‌های مدیریت و تقاضای آب، به یک اقدام اضطراری تبدیل شده است. بر اساس نتایج ابزارهای مدیریت تقاضا، مانند تعرفه‌های جدید مبتنی بر حرکت به سوی پایداری، می‌تواند در کاهش مصرف آب در کوتاه‌مدت مؤثر باشند، اما در شرایط خشکسالی و سامانه تأمین آب فعلی، به هیچ عنوان کافی نیستند. به طور کلی، با توجه به وضعیت نگران‌کننده بیلان آب در نقاط مختلف کشور و به ویژه حوضه دریاچه ارومیه، نمی‌توان کم بودن هزینه واحد آب را نادیده گرفت. از سوی دیگر، سیاست‌های مدیریتی مانند کاهش سطح زیر کشت، آبیاری مکانیزه و نظایر آن، در حفظ تأمین آب و جلوگیری از فروپاشی منابع آب منطقه می‌توانند مؤثر باشند. شایان ذکر است که توجه به سیاست‌های تأمین آب انتقال آب بین حوضه‌ای و تأکید بیشتر بر تغییر سامانه آبیاری از غرقابی به مکانیزه، سامانه رفتار متناظر با راه‌حل‌های منجر به شکست را ارائه خواهد نمود. از این رو، تلاش همه‌جانبه برای رسیدن به نگرش بین بخشی و بین رشته‌ای بحران آب موجود، استفاده از سیاست‌های مذکور به ویژه در ترکیب با تعرفه‌های جدید

پی‌نوشت‌ها

- 1- Positive Mathematical Programming (PMP)
- 2- System Dynamics (SD)
- 3- Causal Loop Diagram (CLD)
- 4- Reinforcing Loops
- 5- Balancing Loops
- 6- Fixes that Fail
- 7- Limit to Growth
- 8- Oscillating Overshoot
- 9- Archetypes
- 10- Rebound Effect

می‌تواند در پیشگیری از افول روزافزون منابع آب و محیط زیست و کمک به تغییر مسیر موجود به مسیر پایداری، مفید باشد. به منظور جلوگیری از تنش‌های احتمالی ناشی از افزایش ناگهانی قیمت آب، سیاست‌گذاران می‌توانند با بهره‌گیری از نتایج مطالعه و متناسب با اهداف مورد نظر خود، راهبردهای مناسبی برای دستیابی به هدف خود برگزینند. نظر به پیچیده بودن مدیریت منابع آب، اقتصاد محیط زیست و حتی عملیاتی نمودن سیاست‌های اتخاذشده، همچنان پیشنهاد می‌شود با بررسی دقیق‌تر تغییر تعرفه آب، برای کاهش این پیچیدگی‌ها گام برداشت تا شاید بتوان انتظار داشت منطقه، سودآوری در بخش کشاورزی و افزایش امنیت اقتصادی و آبی منطقه را شاهد باشد. هرچند که طیف‌های مختلفی از تعرفه آب در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت؛ اما پیشنهاد می‌شود تغییر آب‌بها با مطالعه دقیق و ملحوظ نمودن ارزش اقتصادی آب برای پوشش کامل هزینه‌ها در مناطق مختلف انجام گیرد. تصمیم‌گیری در خصوص بازتخصیص منابع آب بر مبنای تحلیل هزینه‌فرصت استفاده از منابع آب در دسترس در بخش‌های مختلف مصرفی (مانند صنعت و یا خدمات) نیز می‌تواند ضمن بهبود وضعیت سازمان‌های تخصیص‌دهنده آب، آورد مالی مناسبی ارائه نموده و بخش کشاورزی را با سطوح تعرفه پایین‌تر آماده سطوح تعرفه جدید بنماید. برای بهبود مدل‌سازی و اعتمادپذیری بیشتر نتایج، بررسی اشکال مختلف ساختارهای قیمت‌گذاری آب تعدیل‌شده برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. توجه به اثرات محیط زیستی توسط سیاست‌های مختلف تأمین آب که در بیشتر موارد مانعی برای اجرای آن‌ها است نیز نیازمند بررسی بیشتر است. استفاده از داده‌های دقیق‌تر برای ایجاد مدل ریاضیاتی پویایی‌های سامانه و نمودارهای ذخیره و جریان، در ادامه این پژوهش مدنظر قرار گرفته است. با اینکه مطالعه بر روی حوضه دریاچه ارومیه انجام شد، نتایج آن می‌تواند با لحاظ ویژگی‌های مناطق دیگر، برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مشابه نیز مؤثر باشد تا اثرات عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب را کاهش دهد.

۸- سپاسگزاری

این مقاله نسخه تکمیل شده مقاله ارائه شده در چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران که در خردادماه سال ۱۴۰۳ در شهر زنجان برگزار شد، هست.

- Araujo W, Oliveira Esquerre K P, & Sahin O (2019) Building a system dynamics model to support water management: a case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. *Water* 11(12):2513
- Aslani M, Monem M J, & Bagheri A (2023) Development of the conceptual model for water, food, and energy chain (Nexus) in water management in irrigation networks using systems dynamics approach. *Journal of Watershed Management Research* 14(28):16-36 (In Persian)
- Behboudian M, Kerachian R, and Mahjourimajd N (2022) Evaluating the resilience of water resources management projects in river basins considering stakeholder's characteristics. *Iran-Water Resources Research* 18(1):180-207 (In Persian)
- Booker J F, Howitt R E, Michelsen A M, & Young R A (2012) Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling* 25(1):168-218
- Buyse J, Van Huylenbroeck G, & Lauwers L (2007) Normative, positive and econometric mathematical programming as tools for incorporation of multifunctionality in agricultural policy modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120(1):70-81
- Ebrahimi E (2022) Evaluation of limit to growth in agricultural sector of a hydroenvironmental system. Doctoral Dissertation, University of Tehran (In Persian)
- Ebrahimi E & Karamouz M (2022) Dynamic water balance accounting-based vulnerability evaluation considering social aspects. *Water Resources Management* 36(2):659-681
- Ebrahimi E & Zarghami M (2017) Comparing effect 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)
- Ebrahimi E & Zarghami M (2019) Sustainability assessment of restoration plans under climate change by using system dynamics: application on Urmia Lake, Iran. *Journal of Water and Climate Change* 10(4):938-952
- Faryadi M (2024) Legal status of the bed of Lake Urmia after drying up. *Iran-Water Resources Research* 19(5):157-170 (In Persian)
- George B, Malano H, Davidson B, Hellegers P, Bharati L, & Massuel S (2011) An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development. *Agricultural Water Management* 98(5):733-746
- Gharaghani F, Boostani F, & Soltani G (2009) Assessing the impact of reducing irrigation water and increasing its price on cropping pattern by positive mathematical programming model: A case study of eghlid in fars province. *Agricultural Economics Research* 1(1):57-74 (In Persian)
- Howitt R E (1995) Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77(2):329-342
- Howitt R E, Medellin-Azuara J, MacEwan D, & Lund R (2012) Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Science of the Environmental Modeling and Software* 38:244-258
- Jabbari Gharabagh S, Rezaie H, & Bagheri A (2021) Application of Indicator-Based Approach in Water Security Assessment of Lake Urmia Basin. *Iran-Water Resources Research* 17(2):100-113 (In Persian)
- Jafari Sani M, Zarghami M, Shekaari A, Asgharpur H, Safari S, & Mahdilo A (2024) Effect of pricing system reform on water productivity in agricultural sector from the perspective of sustainable development (Case study: Ajabshir Plain, Iran). *Iran-Water Resources Research* 20(2):105-120 (In Persian)
- Kamali M, Azarnivand H, Malekian A, & Mosaffaei J (2023) Developing management solutions for Alolak watershed in the Qazvin province using the DPSIR approach. *Watershed Management Research Journal* 14(28):148-162 (In Persian)
- Karamouz M, Barkhordari H, & Ebrahimi E (2021) Dynamics of water allocation: Tradeoffs between allocator's and farmers' benefits of irrigation practices. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 147(6):04021017
- Layani G, Mehrjou S, & Farajzadeh Z (2023) Effects of government policies reform on environmental sustainability: An integrated approach of PMP and system dynamics simulation model. *Journal of Cleaner Production* 426:138985
- Medellan-Azuara J, Harou J J, & Howitt R E (2011) Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. *Science of the Agricultural Water Management* 108(1):73-82
- Moghaddasi M, Morid S, Delavar M, & Hosenni Safa H (2019) Challenges and compromises of agricultural

- water supply and environmental water right in the Lake Urmia Basin. *Iran-Water Resources Research* 15(2):26-38 (In Persian)
- Sahin O, Bertone E, Beal C, & Stewart R A (2018) Evaluating a novel tiered scarcity adjusted water budget and pricing structure using a holistic systems modelling approach. *Journal of Environmental Management* 215:79-90
- Sefidgari A & Ebrahimi E (2024) Evaluation of the effect of price on water demand and the profit of the agricultural sector. In *Proceedings of the 14th National Congress of Civil Engineering, Zanjan, Iran (In Persian)*
- Statistical Center of Iran (2023) <https://www.amar.org.ir>
- Sterman J D (2000) *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. MacGraw-Hill Company
- Streimikis J & Baležentis T (2020) Agricultural sustainability assessment framework integrating sustainable development goals and interlinked priorities of environmental, climate and agriculture policies. *Sustainable Development* 28(6):1702-1712