مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۳/ شماره ٤/سال ۱۳۹۱/ص ۲٤-۱

# توسعهٔ مدل پویایی سیستم بهسازی شبکهٔ آبیاری با توجه به مشارکت کشاورزان و ارتقای مدیریت شبکه

**اکرم حاتم، محمدجواد منعم* و علی باقری****

* نگارنده مسئول، نشانی: دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت‌مدرس، ص. پ. ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵، تلفن: ۴۴۱۹۴۹۱۱(۰۲۱)، پیام‌نگار: monem_mj@modares.ac.ir

** به‌ترتیب: دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و استادیار گروه مهندسی سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۹/۱۸

## چکیده

**امروزه کیفیت زندگی بشر به صورت مستقیم تحت تأثیر چگونگی برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. سهم عمده‌ای از این منابع برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود و شبکه‌های آبیاری و زهکشی نقش بسزایی در استفادهٔ بهینه از آن دارند. از ساخت اولین شبکه‌های آبیاری سال‌ها می‌گذرد و عملکرد بیشتر آن‌ها به دلایل مختلف پایین است، از این رو بهسازی شبکه‌های آبیاری موجود برای بهبود عملکرد آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. به دلیل پیچیدگی مسائل شبکه‌های آبیاری و وجود تعاملات و وابستگی بین اجزای آن، بهبود عملکرد آن‌ها، نیاز به یک نگاه جامع، سیستمی، و آینده‌نگر دارد. یکی از ابزارهای مدیریتی برای این منظور، علم پویایی سیستم است. اخیراً رویکرد پویایی سیستم‌ها در بهسازی شبکه‌های آبیاری به کار گرفته شده است. با توجه به نتایج مثبت حاصل از به کارگیری این روش، مدل موجود پویایی سیستم بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین که در آن صرفاً بهسازی فیزیکی شبکه و کنترل تقاضای آب بررسی شده بود، با توجه به اهمیت نقش مشارکت کشاورزان و ارتقای مدیریت شبکه، تکمیل شد تا دامنهٔ گسترده‌تری از عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق علاوه بر مسائل فیزیکی، مسائل مدیریتی و اجتماعی نیز از طریق اعمال سیاست‌های مختلف جهت بهسازی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با ادامهٔ روند جاری، وضعیت عملکرد شبکهٔ آبیاری قزوین در آینده وخیم‌تر خواهد شد و به میزان حدود ۱۰ درصد در افق سال ۱۳۹۹ کاهش خواهد یافت. همچنین نشان داده شده است که با اجرای سیاست‌های مختلف شامل: بهبود فیزیکی و مدیریتی شبکه و افزایش مشارکت کشاورزان می‌توان عملکرد شبکه را ارتقاء بخشید. اثرگذاری سیاست‌های مختلف در افق سال ۱۳۹۹ متفاوت است بدین معنا که سیاست‌های بهبود فیزیکی و مدیریتی به ترتیب به میزان ۵ و ۳ درصد و افزایش مشارکت کشاورزان با بیشترین تأثیر به میزان ۱٤درصد موجب بهبود عملکرد شبکه خواهند شد.**

## واژه‌های کلیدی

**بهسازی، پویایی سیستم، راندمان، شبکه آبیاری و زهکشی قزوین، عملکرد**

## مقدمه

ایران کشوری است با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، که اکثر نقاط آن دارای وضعیت بحرانی کمبود آب است و برنامه‌ریزی صحیح و جلوگیری از تلفات آب به منظور استفادهٔ بهینه از منابع آب بسیار ضروری است. سهم عمده‌ای از منابع آبی موجود برای مصارف کشاورزی است و از این‌رو شبکه‌های آبیاری نقش بسزایی در استفادهٔ بهینه از این منابع دارند.

بسیاری از کشورها تاکنون بیشتر به ساخت شبکه‌های آبیاری جدید توجه کرده‌اند، اما امروزه در کنار احداث

تأسیسات جدید، لزوم بهسازی شبکه‌های آبیاری موجود بیشتر احساس می‌شود (Burt, 2011)، زیرا منابع آب و سرمایه برای احداث پروژه‌های جدید محدود است و عملکرد اکثر شبکه‌های آبیاری موجود هم مطلوب نیست (Mishra *et al*., 2001). در ایران نیز بخش وسیعی از شبکه‌های آبیاری و زهکشی بیش از ۳۰ سال قدمت دارند و با مشکلات زیادی همراه‌اند، از جمله پایین بودن راندمان آبیاری در اثر فرسودگی شبکه، مشارکت نداشتن کشاورزان، و بی‌توجهی به نیازهای بهره‌برداری شبکه.

در فرایندهای مورد استفاده در بهسازی شبکه‌های آبیاری، به ارتباط بین عوامل فیزیکی و مدیریتی کمتر توجه شده است (Burt, 2011). در مطالعات مختلف، برنامه‌های بهسازی عمدتاً شامل بهسازی فیزیکی شبکه‌ها است (Sohrab & Abbasi, 2009). اما مطالعات در برخی از کشورها نشان می‌دهد که پایین بودن عملکرد شبکه‌ها تا حد زیادی معلول مدیریت ضعیف بهره‌برداری از شبکه و نگهداری از آن‌هاست. بر این اساس، بهبود ساختار مدیریتی مدنظر قرار گرفته است (Plusquellec, 2002).به رغم تحقیقات گسترده در زمینهٔ بهسازی شبکه‌های آبیاری، عملکرد این شبکه‌ها هنوز پایین است و برای بهسازی آن‌ها به رویکردهای جدید نیاز خواهد بود (Burt, 2011). در رویکردهای گذشته، به‌رغم توجه به عوامل متنوع تأثیرگذار بر عملکرد شبکه، به مکانیزم شکل‌گیری رفتار سیستم ناشی از تأثیر عوامل مختلف کمتر پرداخته شده و نگرش‌ها بیشتر جزیی و مقطعی بوده است. اما در واقع، این عوامل تأثیرات متقابلی روی یکدیگر دارند و باید رفتار آن‌ها در تعامل با سایر اجزا و در درازمدت بررسی شود. بدین‌ترتیب به دلیل پیچیدگی مسائل شبکه‌های آبیاری و وجود تعاملات و وابستگی بین اجزای آن، نیاز به یک نگاه جامع، سیستمی، و آینده‌نگر خواهیم داشت؛ به طوری‌که همهٔ جنبه‌های مؤثر بر عملکرد شبکه مانند: عوامل فیزیکی، مدیریتی، سرمایه‌گذاری، و اجتماعی را در نظر بگیرد. در این‌باره، استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها[1] می‌تواند ابزاری مؤثر تلقی شود.

کاربردهای این رویکرد در زمینه‌های مختلف رو به گسترش است. طی سال‌های گذشته، محققانی چند در زمینه‌های متنوع مرتبط با آب، رویکرد پویایی سیستم‌ها را به شرح زیر به کار گرفته‌اند: در مدل‌سازی منابع آب (Simonovic, 2002; Beall *et al*., 2011; Masike, 2011)، حوزهٔ آبریز (Winz *et al*., 2009; Sánchez-Román *et al*., 2010)، مخازن ذخیرهٔ آب (Ahmad & Simonovic, 2000b; Jalali & Afshar, 2005) و سیلاب (Ahmad & Simonovic, 2000a; Li & Simonovic, 2002).

کاربرد پویایی سیستم‌ها در زمینهٔ آبیاری اندک است که از بین آن‌ها می‌توان به تحقیقات سایسل اشاره کرد. این محقق مدل دینامیکی ارزیابی زیست‌محیطی پروژه‌های بزرگ آبیاری سطحی را توسعه داده است (Saysel, 2004). علاوه بر آن، خان با استفاده از روش پویایی سیستم، بهره‌برداری از منابع آب در شبکه آبیاری را مدل کرده است (Khan, 2004). المهدی و همکاران برای بهبود راندمان تخصیص آب آبیاری از روش پویایی سیستم استفاده کردند (Elmahdi *et al*.,2007). واعظ‌تهرانی و همکاران مدلی را برای بهسازی شبکه‌های آبیاری با رویکرد پویایی سیستم‌ها ارائه دادند و مطلوبیت شبکه را معادل کفایت، راندمان، عدالت، و پایداری در نظر گرفتند. این محققان مدل را که شامل دو زیر سیستم اجرای طرح‌های بهسازی و تقاضای آب بود برای شبکهٔ آبیاری قزوین توسعه دادند. در تحقیقات آن‌ها تأثیر سه گزینه شامل: ثابت نگه داشتن سطح زیر کشت، کاهش برداشت از آب زیرزمینی، و سرمایه‌گذاری در جهت اجرای طرح‌های بهسازی بر مطلوبیت سیستم مورد بررسی قرار گرفت (Vaez-Tehrani *et al*., 2010). با توجه به این‌که این

1- The System Dynamics Approach

مدل، پایهٔ توسعهٔ مدل مورد نظر در این تحقیق است، در ادامهٔ متن از آن به عنوان مدل موجود یاد می‌شود. بررسی سوابق نشان می‌دهد که تحقیقات در زمینهٔ تحلیل مدیریت و بهسازی شبکه‌های آبیاری با رویکرد پویایی سیستم‌ها بسیار محدود است؛ بنابراین، با توجه به روند رو به گسترش و اثربخش استفاده از این رویکرد، لزوم توجه بیشتر به مسائل بهسازی شبکه‌های آبیاری نیز با این رویکرد احساس می‌شود. با توجه به اهمیت نقش مدیریت و مشارکت کشاورزان در فرایند بهسازی شبکه‌ها لازم است که این دو مقوله نیز در مدل موجود در نظر گرفته شوند تا بتوان سیاست‌های بیشتری را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق در نظر است ضمن بهره‌گیری از توانمندی‌های روش پویایی سیستم‌ها، مدل بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین با معرفی زیر سیستم‌های مشارکت کشاورزان و بهسازی مدیریت تکمیل شود. علاوه بر آن، در نظر است عوامل مؤثر بیشتری در زیر سیستم‌های اجرای طرح‌های بهسازی و تقاضای آب، بررسی شوند تا با آزمون سیاست‌های مرتبط، اثر بخشی سیاست‌ها در بهسازی شبکهٔ آبیاری نیز مشخص گردد. با انتخاب سیاست برتر می‌توان راهکارهای عملی‌تری را در جهت بهبود عملکرد شبکه در اختیار مدیران و مسئولین قرار داد.

## مواد و روش‌ها

### رویکرد پویایی سیستم‌ها

پویایی سیستم‌ها بخشی از تفکر سیستمیک است که در مقابل تفکر خطی به کار برده می‌شود. این نگرش مبتنی بر مکانیزم بازخوردهای پویا در سیستم‌ها است که با تکیه بر حلقه‌های علت و معلولی به توضیح چگونگی رخداد وقایع می‌پردازد (Sterman, 2000). به بیان دیگر، رویکرد پویایی سیستم‌ها یک تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی است که مخصوصاً برای مسائل مدیریتی طولانی‌مدت، مزمن، و پویا طراحی می‌شود. این روش بر درک چگونگی اندرکنش فرآیندهای فیزیکی، جریان اطلاعات، و سیاست‌های مدیریتی تمرکز می‌کند که به چه نحو این عوامل پویایی متغیرهای مورد نظر را ایجاد می‌کنند. مجموعه روابط این ترکیبات بیان‌کنندهٔ ساختار سیستم است (Vlachos *et al.*, 2007). مراحل مدل‌سازی با رویکرد پویایی سیستم‌ها عبارت است از: تعریف مسئله و توسعهٔ مدل مفهومی آن، تعیین مرز سیستم، تبیین فرضیه‌های دینامیکی، توسعهٔ مدل شبیه‌سازی، صحت‌سنجی مدل، و استفاده از مدل برای تحلیل سیاست‌ها (Stave, 2003).

### شبکهٔ آبیاری دشت قزوین

شبکهٔ آبیاری و زهکشی قزوین در حدود ۸۰۰۰۰ هکتار ناخالص از اراضی دشت را زیر پوشش قرار می‌دهد. طی حدود ۳۰ سال بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری قزوین، بر حسب شرایط در نحوهٔ مدیریت بهره‌برداری و نگهداری آن تغییراتی داده شده است و در حال حاضر ۱۵۸ تشکل، ۱۰ اتحادیه و یک کانون مرکزی فعال هستند و مدیریت شبکه را بر عهده دارند (Karimi *et al.*, 2008). بررسی‌ها، مطالعهٔ گزارش‌های موجود (Anon, 2007)، و مصاحبه با مسئولان شبکه نشان می‌دهد که مهم‌ترین مشکلات موجود شبکهٔ آبیاری قزوین شامل این موارد است: محدودیت در تأمین آب، راندمان پایین شبکه، تغییر در الگوی کشت و افزایش نیاز آبیاری، فرسوده شدن سازه‌ها و کانال‌ها، مشارکت نداشتن آب‌بران در نگهداری شبکه، مشکلات حقوقی و مدیریتی تشکل‌های آب‌بران نوپا، و افزایش سطح تحت پوشش شبکه.

## نتایج و بحث

### مدل بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین با رویکرد پویایی سیستم‌ها

اولین گام در بهبود عملکرد شبکه، شناخت عمیق وضع موجود آن است؛ از این‌رو لازم است عوامل مؤثر بر

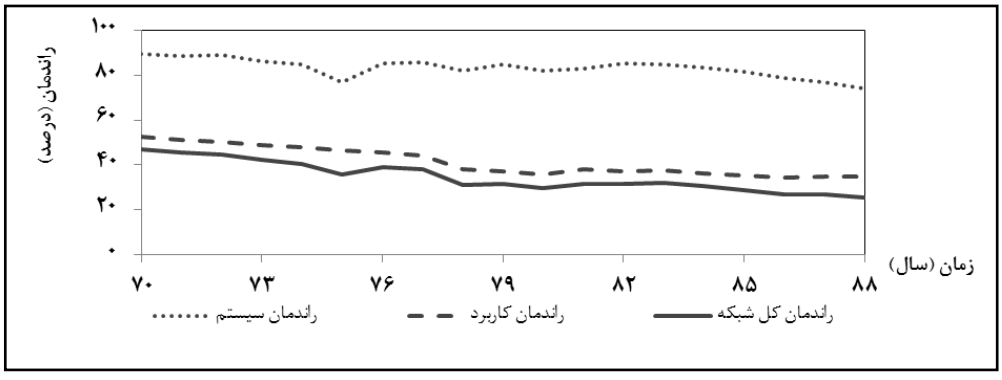
عملکرد آن به نحو شایسته شناسایی و تعامل بین این عوامل مشخص شود که در ادامه به تشریح آن خواهیم پرداخت.

**تعریف مسئله**

تعریف مسئله شامل بیان مشکل موجود در سیستم است که نهاد مربوط می‌خواهد آن را رفع کند. در شکل ۱ تغییرات راندمان کاربرد، راندمان سیستم، و راندمان کل شبکهٔ آبیاری قزوین از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۸ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که راندمان در حال کاهش است و بهبود آن باید مورد توجه قرار گیرد؛ لذا مسئله این تحقیق بررسی تأثیر اقدامات بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین بر عملکرد شبکه از دیدگاه راندمان است. راندمان انتقال و توزیع منعکس‌کننده تلفات آب در فرایند انتقال و توزیع در شبکه است و حاصلضرب آن‌ها به عنوان راندمان سیستم در نظر گرفته شده است. راندمان کاربرد نشانگر میزان تلفات در فرایند کاربرد آب در مزرعه و حاصلضرب راندمان سیستم و کاربرد، معرف راندمان کل شبکه است.

**تعیین مرز سیستم**

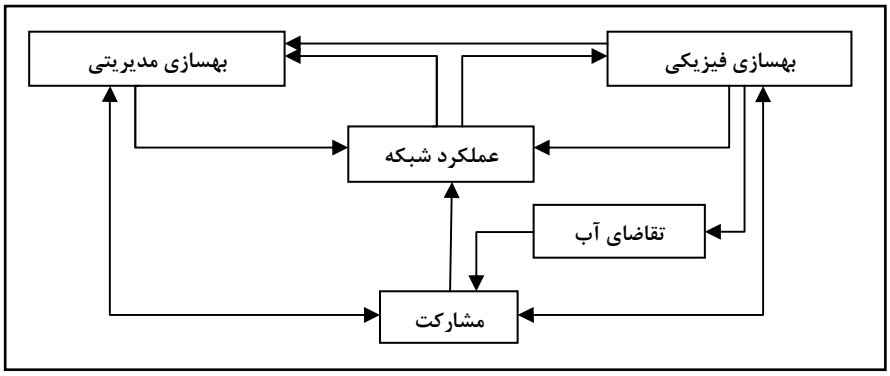
در این مرحله باید به صورت خاص بر مرزی از سیستم تمرکز کرد که ساختار مسئله‌ساز در آن شکل می‌گیرد. متغیرهای مؤثر بر رفتار متغیر مرجع را متغیرهای فرعی می‌نامند. در این مسئله، عملکرد شبکه که متأثر از راندمان آبیاری است به عنوان متغیر مرجع در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها در قالب پرسشنامه، مصاحبه، گزارش‌ها، و اسناد نشان می‌دهد که علاوه بر زیرسیستم‌های بهسازی فیزیکی و تقاضای آب، در نظر گرفتن زیر سیستم‌های بهسازی مدیریتی و مشارکت در مدل بهسازی شبکه ضروری است. همچنین، لازم است به منظور بالا بردن دقت مدل موجود، عوامل مؤثر دیگری را در زیر سیستم‌های موجود در نظر گرفت. بنابراین، متغیرهای فرعی مؤثر بر رفتار متغیر مرجع عبارت خواهند بود از: ۱- بهسازی فیزیکی شبکه‌ها؛ ۲- بهسازی مدیریتی؛ ۳- مشارکت؛ و ۴- تقاضای آب؛ لذا می‌توان گفت مرز سیستم شامل همه عواملی خواهد بود که در مدل معرفی شده بر این متغیرها تأثیر می‌گذارند و از آن‌ها تأثیر می‌پذیرند.




**شکل ۱- تغییرات راندمان کاربرد، راندمان سیستم و راندمان کل شبکه آبیاری قزوین.**

**تبیین فرضیه‌های دینامیکی**

بعد از تعیین مرز سیستم و متغیرهای فرعی تأثیرگذار بر متغیر مرجع، باید نحوهٔ تأثیرگذاری این متغیرها را با تعدادی حلقه‌های بازخوردی بیان کرد که نشان‌دهندهٔ اثر متقابل این اجزا بر یکدیگر هستند. برای این منظور مدل مفهومی بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین مطابق شکل ۲ توسعه داده شده است.




**شکل ۲- مدل مفهومی حاکم بر بهسازی شبکه آبیاری قزوین.**

زیرسیستم بهسازی فیزیکی نشان‌دهنده اقداماتی است که موجب بهبود وضعیت فیزیکی شبکه می‌شود. این اقدامات علاوه بر تأثیر در جهت بهبود عملکرد و افزایش میزان مشارکت کشاورزان در بهره‌برداری و نگهداری، موجب تغییر تقاضای آب کشاورزان و همچنین کاهش توجه به بهسازی مدیریتی می‌شود. بدین‌ترتیب با کاهش توجه به بهسازی مدیریتی، عملکرد شبکه و مشارکت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و کاهش می‌یابد. زیرسیستم مشارکت، معرف سطح مشارکت کشاورزان در عملیات بهره‌برداری و نگهداری از شبکه است. در پی رشد این بخش و افزایش مشارکت، وضعیت فیزیکی و مدیریتی شبکه بهبود می‌یابد و موجب بهبود عملکرد شبکه خواهد شد. از سوی دیگر، با بهسازی فیزیکی شبکه، زیرسیستم تقاضای آب فعال می‌شود و با افزایش تقاضا، بر زیرسیستم مشارکت اثر منفی گذاشته و موجب کاهش عملکرد شبکه می‌شود. به منظور شناسایی وضع موجود در قالب ساختار علی و معلولی، مکانیزم‌های فعال در شبکه آبیاری قزوین در شکل ۳ با توجه به مدل مفهومی شکل ۲ نشان داده شده است.

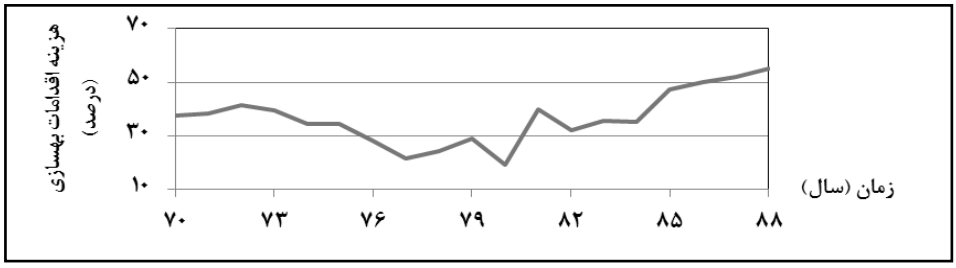
در این شکل، حلقه‌های B1، B2،R1، و R2 بیانگر مکانیزم بهسازی فیزیکی شبکه هستند. حلقه‌های B3 و R3 در ترکیب با حلقهٔ B1 مکانیزم بهسازی مدیریتی را نشان می‌دهند و حلقه‌های B4، R4، R5، و R6 در ترکیب با حلقهٔ B3، نشان‌دهندهٔ مکانیزم مشارکت هستند و حلقه‌های R8 و R7 در ترکیب با حلقهٔ B1 مکانیزم تقاضای آب را نشان می‌دهند. در این‌جا هر یک از مکانیزم‌ها تشریح خواهد شد.

**الف- مکانیزم بهسازی فیزیکی**

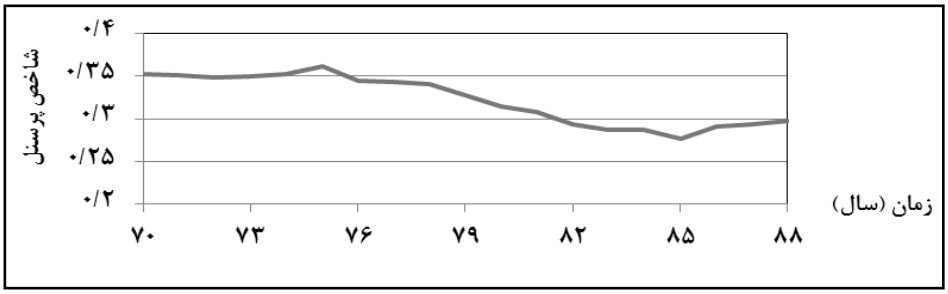
در مکانیزم بهسازی فیزیکی مدل موجود، تنها تأثیر سرمایه‌گذاری برای اجرای طرح‌های بهسازی روی راندمان بررسی شده است. در این تحقیق، عوامل دیگری مانند بهسازی شبکهٔ فرعی و تأثیر متقابل بهسازی فیزیکی و بهبود مدیریت نیز در نظر گرفته شده‌اند.

در شبکهٔ آبیاری قزوین به خصوص در ۱۰ سال اخیر برای افزایش راندمان و عملکرد شبکه، اقدامات بهسازی فیزیکی شبکه (که با شاخص درصد هزینه‌های بهسازی فیزیکی نسبت به کل هزینه‌های شبکه آبیاری قزوین نمایش داده شده) افزایش یافته است (شکل ۴)، که بیشتر به بهبود وضعیت فیزیکی شبکه اصلی توجه شده است. همچنین، بر اساس گفتگو با مدیران شبکهٔ قزوین، به دلیل این‌که به آموزش پرسنل فعال در شبکه توجه کافی نشده، مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکه افت کرده و عملکرد شبکه کاهش داشته است. شکل ۵ بی‌توجهی به بهبود شاخص پرسنل را نشان می‌دهد. شاخص پرسنل به صورت تابعی از تخصص، مسئولیت، و هزینهٔ پرسنلی است و به عنوان نمایندهٔ سطح مدیریت در نظر گرفته شده است.

**شکل ۳- ساختار علی و معلولی بهسازی شبکه آبیاری قزوین از دیدگاه راندمان.**




**شکل ٤- نمودار درصد هزینه‌های سالانه بهسازی فیزیکی.**

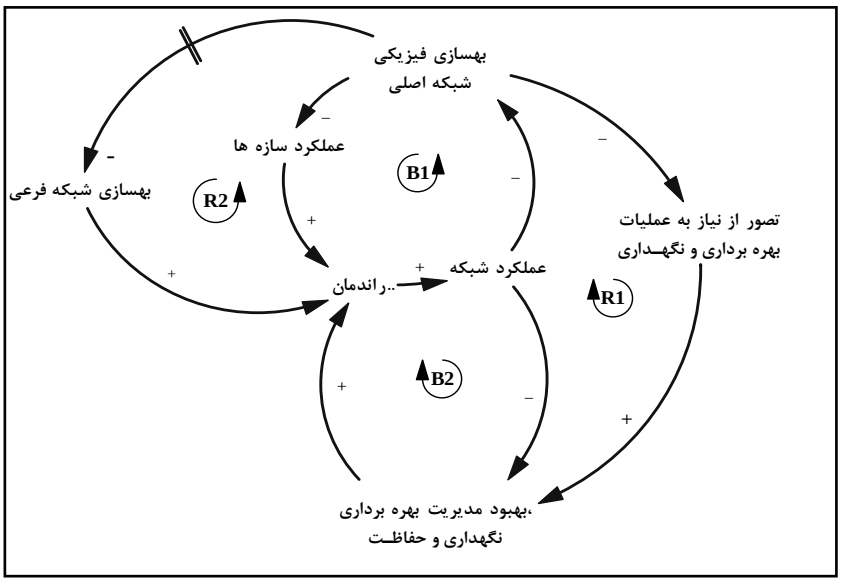



**شکل ٥- نمودار شاخص پرسنلی شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری قزوین.**

مکانیزم بهسازی فیزیکی شبکه در شکل ۶ نشان داده شده است. در پی کاهش راندمان آبیاری و ضعف عملکرد سیستم، برای بهسازی فیزیکی شبکهٔ اصلی اقدام (حلقهٔ B1) و مشکل به صورت موقت حل می‌شود. متعاقباً، این تصور به وجود می‌آید که نیاز به بهبود مدیریت بهره‌برداری و نگهداری وجود ندارد و بدین‌صورت سطح مدیریت بهره‌برداری و نگهداری کاهش می‌یابد و در جهت بهبود آن قدمی برداشته نمی‌شود (حلقهٔ R1). در نتیجه چندی بعد مشکل دوباره بروز می‌کند و عملکرد کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که شبکه هر اندازه از لحاظ فیزیکی مطلوب باشد، در صورت فقدان مدیریت صحیح، عملکرد خوبی نخواهد داشت و این همان الگوی رفتاری "انتقال بار مسئولیت[1]" است.

در این الگو برای رفع مشکلات به جای تفکر و رسیدن به راه‌حل‌های کامل، همیشه یک راه‌حل جزیی انتخاب می‌شود که به طور موقت مشکل را حل می‌کند و نتایج مطلوبی را نیز به صورت کوتاه‌مدت به دست می‌دهد، اما مشکلات به طور کامل حل نمی‌شوند و با وجود رفع مشکل در مقطعی از زمان، ابعاد آن بزرگ‌تر می‌شود. در این مکانیزم چون بهسازی نتایج موقتی خوبی داشته است، راه‌حل‌های موقت جای راه‌حل‌های اساسی و بلندمدت (بهبود مدیریت در حلقهٔ B2) را می‌گیرند. در نتیجه با این‌که سازه‌ها و کانال‌ها از لحاظ فیزیکی ارتقا یافته‌اند، اما به دلیل بی‌توجهی به سطح مدیریت بهره‌برداری و نگهداری، مشکلات دوباره بروز می‌کند و عملکرد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، در این مکانیزم ترکیب حلقهٔ B1 و R2، الگوی "راه‌حل‌های منجر به شکست[2]" را می‌سازند. این الگو به این‌صورت است که در برخورد با مشکل، یک راه‌حل مسکن (موقت) به کار گرفته می‌شود و به نظر می‌رسد نتایج مثبت و مطلوبی به دست دهد. اما پس از گذشت مدت‌زمانی، این راه‌حل به پیامدهای ناخواسته‌ای منجر می‌شود که مدنظر نیست و پس از چندی مشکل تشدید می‌شود. در این مکانیزم، توجه به بهسازی فیزیکی شبکهٔ اصلی موجب بی‌توجهی به بهسازی شبکه‌های فرعی می‌شود که علت اصلی پایین بودن عملکرد شبکه‌ها است (حلقهٔ R2).

1- Shifting the Burden
2- Fixes that Fail

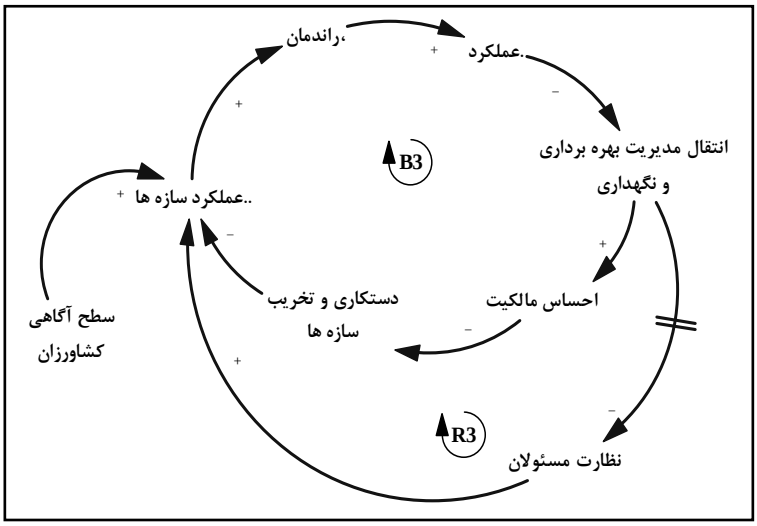



**شکل ٦ - مکانیزم بهسازی فیزیکی شبکه آبیاری قزوین.**

**ب- مکانیزم بهسازی مدیریتی**

به دلیل اهمیت مدیریت شـبکه‌هـا، ایـن مکـانیزم بـه مدل موجود اضافه شد کـه از الگـوی نمونـه "راه‌حـل‌هـای منجر به شکست"، تبعیت می‌کند و در شکل ۷ نشان داده شده است. در این مکانیزم با انتقال مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکه به آب‌بران، احساس مسئولیت آن‌ها نسـبت به تأسیسات شبکه تقویت می‌شود و با انگیزهٔ بهتر، عملیات بهره‌برداری و نگهداری را دنبال مـی‌کننـد؛ کـه در نتیجـه، عملکرد سازه‌ها بهبود می‌یابد و با کاهش تلفات آب، میزان راندمان افزایش خواهد یافت (حلقهٔ B3). امـا هنگـامی‌کـه فعالیـت حلقـهٔ تعـادلی B3 در جهـت انتقـال مـدیریت بهره‌برداری و نگهداری افزایش یابد، حلقهٔ کاهشـی نظـارت مسئولان در درازمدت فعال می‌شود (حلقـهٔ R3)، کـه یـک پیامد ناخواسته[1] از اجرای سیاست انتقـال مـدیریت اسـت. بنابراین با کاهش نظارت مسئولان بر عملیات بهره‌برداری و نگهداری که توسط آب‌بران انجام می‌گیرد، بـه دلیـل کـم-تجربگی آب‌بران، کیفیت عملیات و عملکرد سازه‌هـا پـایین می‌آید. در نتیجه، در صورت بی‌توجهی به حلقهٔ R3 و تنها توجه به راه‌حل مقطعی B3، شاهد کاهش عملکرد در طول زمان خواهیم بود. علاوه بـر آن، سـطح آگـاهی کشـاورزان عامل دیگری است که بر عملکرد سازه‌ها تأثیرگذار بـوده و به صورت متغیر برون‌زا وارد شده است.

1- Unintended Consequences




**شکل ۷- مکانیزم بهسازی مدیریتی (انتقال مدیریت) در شبکه آبیاری قزوین.**

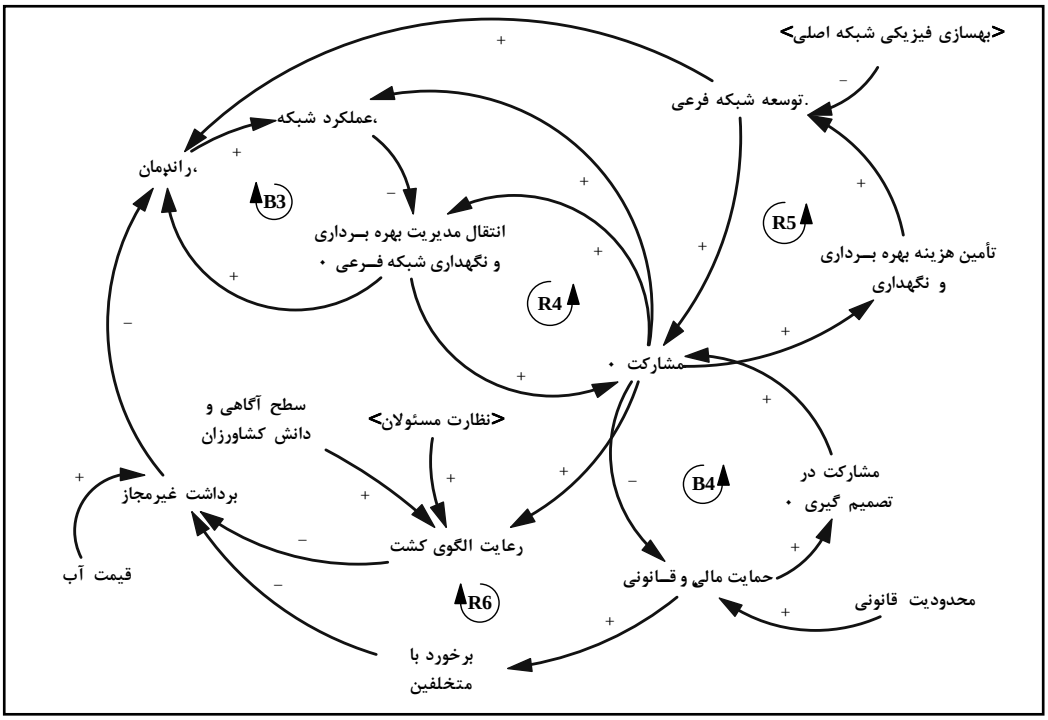
**ج- مکانیزم مشارکت**

با توجه به سیاست رو به گسترش افزایش مشارکت کشاورزان و اهمیت آن در بهسازی شبکه‌ها، این مکانیزم مطابق شکل ۸ برای تکمیل مدل موجود در نظر گرفته شده است. طبق بررسی‌های انجام شده و مصاحبه با مدیران و مسئولان شبکه، به‌رغم اقدامات انجام شده در زمینهٔ انتقال مدیریت به بهره‌برداران و ایجاد تشکل‌های آب‌بران، بنا به دلایلی طرح انتقال مدیریت شبکه کامل نیست و از این‌رو بخشی از بهبود عملکرد در شبکه، که انتظار می‌رفت در اثر جلب مشارکت کشاورزان به دست آید، محقق نشده است. برخی از دلایل و نواقص موجود در جلب مشارکت کشاورزان عبارت‌اند از: عدم بهسازی شبکهٔ فرعی قبل از انتقال مدیریت؛ استفاده نکردن از دیدگاه‌های بهره‌برداران در حین بررسی‌ها، در حین اجرا، و در حین تصمیم‌گیری‌ها؛ وجود خلأهای قانونی و حمایت نکردن دولت از تشکل‌های ایجاد شده؛ برگزار نکردن برنامه‌های آموزشی فراگیر بهره‌برداران برای افزایش سطح آگاهی آن‌ها؛ و نظارت نداشتن سالانه برای اجرای طرح کشت (Anon, 2007). در این مکانیزم، در حلقهٔ R4 در اثر انتقال مدیریت به تشکل‌های آب‌بران، مشارکت آن‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش مشارکت از طرق مختلف روی بهبود عملکرد سیستم تأثیر خواهد گذاشت؛ به طوری‌که با جلب رضایت آب‌بران، مشارکت آن‌ها در تأمین هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری بیشتر می‌شود و وضعیت فیزیکی شبکهٔ فرعی بهبود خواهد یافت (حلقهٔ R5) که این خود عاملی برای افزایش مشارکت و همچنین کاهش تلفات آب است.

با افزایش مشارکت، کشاورزان به اجرای الگوی کشت بیشتر توجه می‌کنند و در نتیجه در تأمین آب مورد نیاز پیش‌بینی شده در الگوی کشت مشکلی به وجود نخواهد آمد و به دلیل تناسب بین آب مورد نیاز و آب تأمین شده، برداشت غیرمجاز آب کاهش، و راندمان افزایش می‌یابد. گفتنی است که پیاده‌سازی الگوی کشت به سطح آگاهی کشاورزان و نظارت مسئولان در تحقق این امر بستگی دارد. مطابق مطالب فوق، با این‌که تشکل‌ها برای مشارکت تلاش می‌کنند، اما مشارکت آن‌ها به دلیل محدودیت‌های مالی و قانونی، در یک حدی متوقف یا حتی کم می‌شود (حلقهٔ B4). که این همان الگوی محدودیت رشد[1] است. در این الگو تحت شرایطی خاص، یک فرایند خودبه‌خودی دوره‌ای از رشد را به وجود می‌آورد. پس از این دوره،

1- Limits to Growth

آهنگ رشد در اثر شرایط محدودکننده شروع به کند شدن خواهد کرد و به صورت ناگهانی به سمت یک سکون حرکت می‌کند. در حلقهٔ R6 با کاهش حمایت‌های قانونی میزان برخورد با متخلفان در زمینه برداشت غیرمجاز آب نیز کاهش می‌یابد که منجر به افزایش تلفات آب می‌شود. عامل دیگری که در برداشت غیرمجاز آب تأثیر می‌گذارد، قیمت آب است. با افزایش قیمت آب، توان کشاورزان برای پرداخت آب‌بها کاهش می‌یابد، برداشت غیرمجاز آب افزایش، و راندمان کاهش خواهد یافت. بنابراین، اگر قبل از انتقال مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکهٔ آبیاری به کشاورزان، به بهبود وضعیت شبکه‌های فرعی و رفع محدودیت‌های مالی و قانونی تشکل‌ها توجه می‌شد، و آموزش‌های لازم در زمینهٔ مسئولیت‌های انتقال یافته به کشاورزان مدنظر قرار می‌گرفت، روند افزایشی مشارکت همزمان با روند انتقال مدیریت پیش می‌رفت، و در اثر آن عملیات بهره‌برداری و نگهداری شبکه بهبود و عملکرد افزایش می‌یافت.

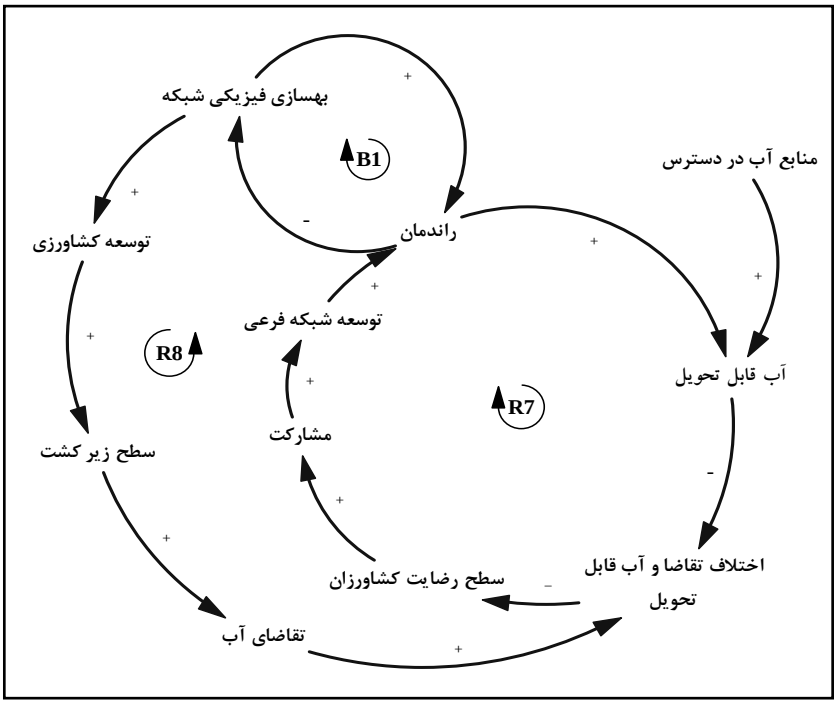



**شکل ۸- مکانیزم مشارکت در شبکه آبیاری قزوین.**

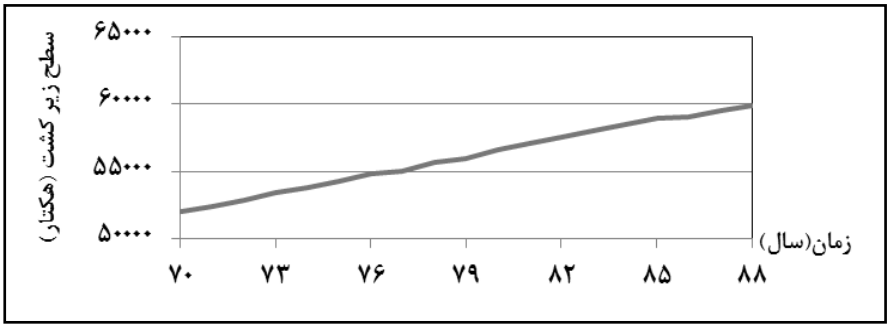
### د- مکانیزم تقاضای آب

در این مکانیزم که در شکل ۹ نشان داده شده است علاوه بر متغیرهایی مانند تقاضای آب، سطح کشت، و منابع آب که در مدل موجود در نظر گرفته شده بود، متغیرهایی مانند مشارکت، توسعهٔ شبکهٔ فرعی و سطح رضایت کشاورزان اضافه شده است. در این مکانیزم در پی افزایش بهسازی فیزیکی شبکه و در نتیجه افزایش راندمان (حلقهٔ B1)، آب قابل تحویل به کشاورزان افزایش و اختلاف آن با میزان تقاضای آب کشاورزان کاهش می‌یابد. بنابراین، مطابق حلقهٔ تقویتی R7 در اثر مطابقت آب قابل تحویل با آب مورد نیاز، سطح رضایت کشاورزان افزایش می‌یابد و کشاورزان با مشارکت در عملیات بهره‌برداری و نگهداری موجب بهبود وضعیت فیزیکی شبکهٔ فرعی می‌شوند که افزایش راندمان و عملکرد را در پی دارد.

از سوی دیگر، فعالیت‌های بهسازی بهبود شرایط را القا می‌کند و باعث توسعه کشاورزی می‌شود. در نتیجه، مطابق حلقهٔ R8 کشاورزان به کشت زمین‌های آیش روی می‌آورند و زمین‌های حاشیه شبکه را بهره‌برداری می‌کنند که در نتیجه آن سطح زیر کشت افزایش خواهد یافت. روند افزایشی سطح زیر کشت در شبکهٔ آبیاری قزوین در شکل ۱۰ ارائه شده است. در پی افزایش سطح کشت، تقاضای آب بالا می‌رود و با فرض ثابت بودن منابع آب در دسترس، که به عنوان یک محدودیت وارد می‌شود، اختلاف تقاضا و آب قابل تحویل افزایش و در نتیجه سطح رضایت کاهش می‌یابد و از رشد حلقهٔ R7 جلوگیری می‌کند. این مکانیزم از الگوی راه‌حل‌های منجر به شکست تبعیت می‌کند.




**شکل ۹ - مکانیزم تقاضای آب در شبکه آبیاری قزوین.**




**شکل ۱۰- تغییرات سطح زیر کشت در محدودهٔ تحت پوشش شبکهٔ آبیاری قزوین.**

## توسعه مدل بهسازی شبکه آبیاری قزوین

با توجه به مدل علی و معلولی معرفی شده و تدوین روابط کمّی میان عوامل مختلف، می‌توان مدل کمّی سیستم بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین را توسعه داد (این مدل در محیط نرم‌افزار Vensim PLE نسخه ۵/۷ شبیه‌سازی شده است). شکل ۱۱ شمایی کامل از مدل کمّی بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین منطبق بر نمودارهای علیتی است. روابط کمّی به کار گرفته شده در این مدل به شرح زیر است:

با توجه به عمر مفید شبکه قزوین (۵۰ سال)، ضریب فرسودگی سالانه شبکه ۲ درصد است و با توجه به گذشت ۲۰ سال از عمر شبکه در سال مبنا (۱۳۷۰)، عملاً ۴۰ درصد شبکه در این سال فرسوده شده است، از این‌رو مقدار اولیه عملکرد سازه‌ها در سال مبنا ($S_{p1}$) برابر با ۶۰ درصد (۰/۶) در نظر گرفته شده است. عملکرد سازه‌ها در سال‌های آتی برابر است با مجموع عملکرد سازه‌ها در سال مبنا و مجموع اختلاف بهبود و کاهش عملکرد سازه‌ها در هر سال و از رابطهٔ ۱ به دست می‌آید.

$$S_P = S_{P_1} + \sum_{t=1}^{n} \left( I_{P_t} - R_{P_t} \right) \qquad (۱)$$

که در آن،

$I_P$ = بهبود عملکرد سازه‌ها؛ و $R_P$ = کاهش عملکرد سازه‌هاست و از رابطهٔ ۲ و ۳ به دست می‌آیند.

بهبود عملکرد سازه‌ها مطابق مدل موجود، به صورت تابعی از فعالیت‌های بهسازی فیزیکی شامل فعالیت‌های نگهداری، تعمیرات و لایروبی تأسیسات شبکه آبیاری و عملکرد شبکه در نظر گرفته شده است (رابطه ۲).

$$I_P = \left(C_M + C_D\right) D_P \qquad (۲)$$

که در آن،

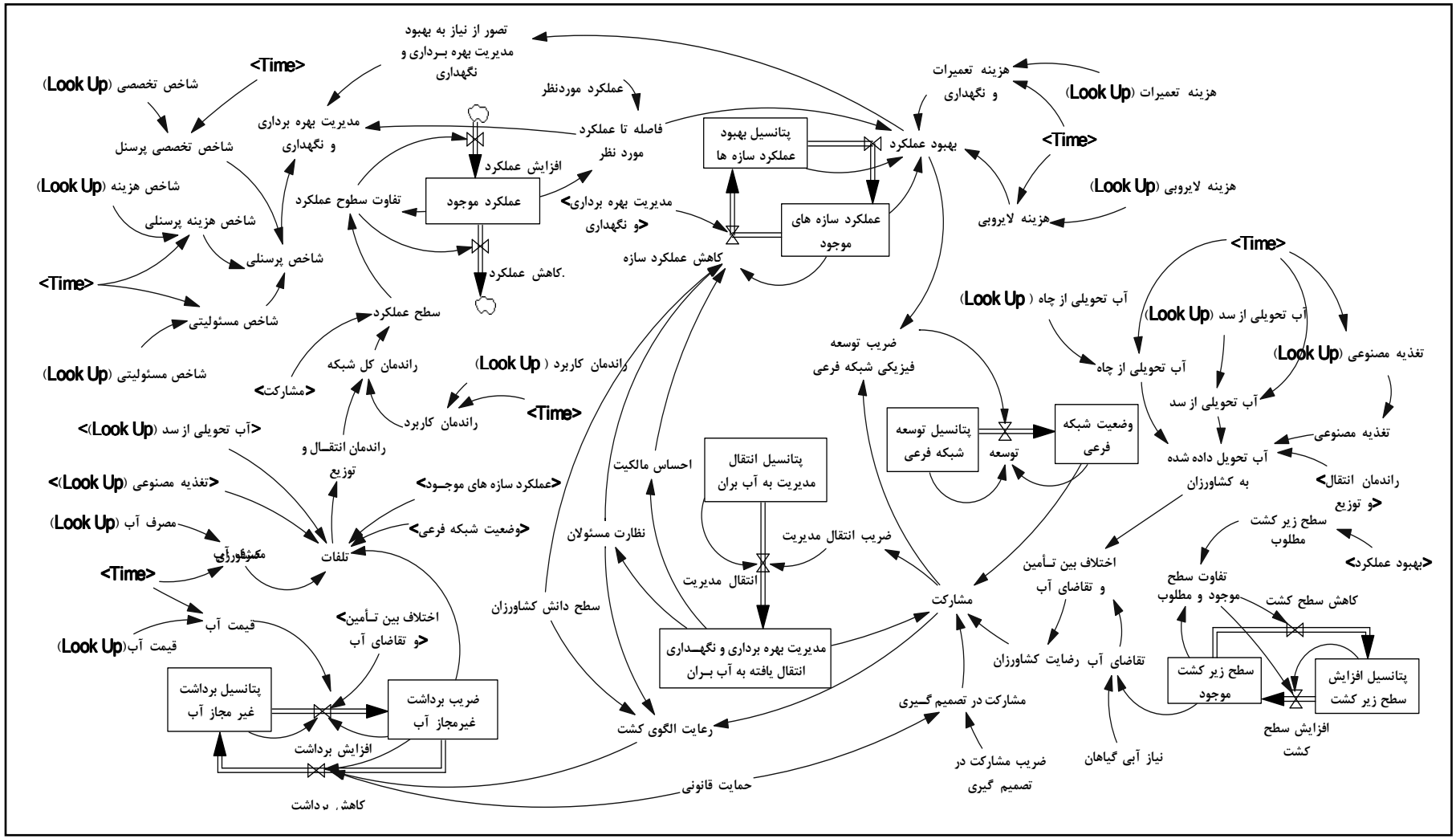
$CM$= درصد هزینهٔ نگهداری و تعمیرات؛ $CD$= درصد هزینهٔ لایروبی؛ و $DP$ = اختلاف عملکرد موجود و مطلوب است. هزینه‌های تعمیرات، نگهداری و لایروبی با استفاده از شاخص قیمت در سال‌های متفاوت بر مبنای سال پایه (سال ۱۳۷۶) محاسبه و به صورت درصدی از متوسط هزینهٔ سالانه شبکه در نظر گرفته شده‌اند. کاهش عملکرد سازه‌ها تابع عوامل متفاوتی مانند سطح مدیریت بهره‌برداری و نگهداری، نظارت مسئولان، احساس مالکیت، سطح دانش کشاورزان، و همچنین عملکرد فعلی سازه‌هاست و از رابطهٔ ۳ به دست می‌آید.

$$R_P = S_P \left( \frac{0.35}{M_{O\&M}} + \frac{0.3}{S_A} + \frac{0.175}{S_O} + \frac{0.175}{Kn_F} \right) \qquad (۳)$$

که در آن،

$S_P$= عملکرد سازه‌ها؛ $M_{O\&M}$= سطح مدیریت بهره‌برداری و نگهداری؛ $S_A$= سطح نظارت مسئولان؛ $S_O$= درصد احساس مالکیت؛ و $Kn_F$= سطح دانش کشاورزان است.

سطح دانش کشاورزان به صورت نسبت تعداد کشاورزان دارای دانش لازم در زمینهٔ اصول آبیاری و نحوهٔ کار با سازه‌ها به تعداد کل کشاورزان تعریف شده است و این نسبت در شبکهٔ قزوین ۰/۱۶۷ (Sotudehnia *et al.*, 2006) در نظر گرفته شده است.




**شکل ۱۱- مدل بهسازی شبکه آبیاری قزوین از دیدگاه راندمان.**

سطح مدیریت بهره‌برداری و نگهداری، تابعی از شاخص پرسنلی ($P_e$)، اختلاف عملکرد موجود و مطلوب شبکه ($D_p$)، و تصور از نیاز به بهبود مدیریت عملیات بهره‌برداری و نگهداری ($I_M$) است، که به صورت متوسط آن‌ها و طبق رابطهٔ ۴ بیان می‌شود.

$$M_{O\&M} = (P_e + D_P + I_M)/3 \qquad (۴)$$

شاخص پرسنلی ($P_e$) خود تابعی از تخصص پرسنل ($P_{e1}$)، مسئولیت آن‌ها ($P_{e2}$) و هزینهٔ پرسنلی ($P_{e3}$) است که به ترتیب از روابط ۵ تا ۷ به دست می‌آیند (Monem & Ghoddusi, 2004).

$$P_e = 0.56P_{e1} + 0.32P_{e2} + 0.12P_{e3} \qquad (۵)$$

$$P_{e1} = (27P_1 + 25P_2 + 20P_3 + 15P_4 + 13P_5)/100 \qquad (۶)$$

$$P_{e2} = (75P_6 + 25P_7)/100 \qquad (۷)$$

که در آن‌ها،

$P_1$ = تعداد پرسنل دارای مدرک فوق‌لیسانس؛ $P_2$ = تعداد پرسنل دارای مدرک لیسانس؛ $P_3$ = تعداد پرسنل دارای مدرک فوق‌دیپلم؛ $P_4$ = تعداد پرسنل دارای مدرک دیپلم؛ $P_5$ = تعداد پرسنل دارای مدرک زیردیپلم؛ $P_6$ = تعداد پرسنل اداری؛ و $P_7$ = تعداد پرسنل اجرایی است.

تصور از نیاز به بهبود مدیریت عملیات بهره‌برداری و نگهداری ($I_M$) تابعی از میزان بهبود عملکرد سازه‌ها ($I_P$) است، یعنی هرچه بهبود عملکرد سازه‌ها بیشتر باشد تصور از نیاز به بهسازی مدیریتی کاهش می‌یابد که در رابطهٔ ۸ معرفی شده است.

$$I_M = 1 - I_P \qquad (۸)$$

از طرفی، بهبود عملکرد سازه‌ها روی توسعهٔ شبکهٔ فرعی تأثیرگذار است. وضعیت شبکهٔ فرعی ($S_s$) به صورت رابطهٔ ۹ است. این مقدار برای سال مبنا ($S_{s1}$) با توجه به اطلاعات موجود برابر با ۰/۵ بوده است.

$$S_S = S_{S_1} + \sum_{t=1}^{n} D_{S_t} \qquad (۹)$$

که در آن،

$D_S$= مقدار توسعهٔ شبکهٔ فرعی بوده که از حاصل‌ضرب ضریب توسعهٔ شبکهٔ فرعی ($C_{DS}$) در وضعیت آن، مطابق رابطهٔ ۱۰، به دست می‌آید.

$$D_S = C_{DS} \times S_S \qquad (۱۰)$$

ضریب توسعهٔ شبکهٔ فرعی ($C_{DS}$) نیز مطابق رابطهٔ ۱۱ بیان می‌شود، زیرا همان‌طور که قبلاً گفته شد، تمرکز بر بهسازی سازه‌های شبکهٔ اصلی، موجب کاهش توجه به توسعه شبکه فرعی است و افزایش مشارکت کشاورزان موجب بهبود آن می‌شود.

$$C_{DS} = P / I_P \qquad (۱۱)$$

که در آن،

$P$ = نسبت مشارکت کشاورزان؛ و $I_P$ = بهبود عملکرد سازه‌ها است.

متغیر دیگری که متأثر از بهبود عملکرد سازه‌ها خواهد بود، سطح زیر کشت مطلوب ($D_{AC}$) از نظر کشاورزان است. هرچه عملکرد فیزیکی شبکه بالاتر باشد، تمایل به افزایش سطح زیر کشت از طرف کشاورزان افزایش می‌یابد. با توجه به سطح زیر کشت اولیه (۵۲۰۰۰ هکتار)، سطح زیر کشت مطلوب به صورت رابطهٔ ۱۲ بیان شده است. با توجه به طراحی شبکهٔ آبیاری قزوین، حداکثر سطح زیر کشت مطلوب ۸۰۰۰۰ هکتار است که در فرایند مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

$$D_{AC} = 52000(1 + I_P) \qquad (۱۲)$$

سطح زیر کشت مطلوب مطابق رابطهٔ ۱۳روی کاهش یا افزایش سطح زیر کشت موجود ($A_C$) تأثیرگذار خواهد بود. میزان افزایش و کاهش سطح زیر کشت ($I_{AC}$ و $R_{AC}$) به صورت اختلاف سطح زیر کشت مطلوب ($D_{AC}$) و سطح زیر کشت موجود ($A_C$) تعریف می‌شود. چنانچه سطح زیر کشت مطلوب از سطح زیر کشت موجود بیشتر باشد، موجب تمایل به افزایش سطح زیر کشت می‌شود و بالطبع کاهش سطح زیر کشت صفر خواهد بود و بالعکس.

$$If\left(A_C - D_{AC}\right)\rangle 0 \;\; Then \;\; R_{AC} = \left|A_C - D_{AC}\right| \;\; And \;\; I_{AC} = 0 \;\; Else \;\; I_{AC} = \left|A_C - D_{AC}\right| \;\; And \;\; R_{AC} = 0 \qquad (۱۳)$$

مقدار سطح کشت موجود در سال‌های مختلف از مجموع سطح زیر کشت اولیه ($A_{C1}$) و مجموع اختلاف افزایش و کاهش سطح زیر کشت در سال‌های متوالی مطابق رابطهٔ ۱۴ به دست می‌آید.

$$A_C = A_{C_1} + \sum_{t=1}^{n}\left(I_{AC_t} + R_{AC_t}\right) \qquad (۱۴)$$

با مشخص شدن میزان سطح کشت شبکه، تقاضای آب کشاورزی ($W_D$) در هر سال مطابق رابطهٔ ۱۵محاسبه می‌شود (میزان نیاز آبی در هر هکتار برابر ۱۰۵۶۷ متر مکعب است (Anon, 2007).

$$W_D = \left(10567 A_C\right)/10^6 \qquad (۱۵)$$

از طرفی، آب تحویلی به کشاورزان در سر مزرعه از طریق آب تحویلی از سد ($D_W$) و چاه‌های تلفیقی ($W_W$) تأمین می‌شود (که بخشی از آن صرف تغذیهٔ مصنوعی ($U_R$) خواهد شد) که با احتساب راندمان انتقال و توزیع ($E_S$)، از رابطهٔ ۱۶ به دست می‌آید.

$$S_W = \left(D_W + W_W - U_R\right)/E_S \qquad (۱۶)$$

اکنون با مشخص شدن تقاضا و آب قابل تحویل، درصد اختلاف میزان تقاضای کشاورزان و آب قابل تحویل ($D_{D\&S}$) از رابطهٔ ۱۷ قابل محاسبه است.

$$D_{D\&S} = \left(W_D - S_W\right)/W_D \qquad (۱۷)$$

همان‌طور که در مدل بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین (شکل ۱۱) مشخص شده است، اختلاف بین تأمین و تقاضای آب ($D_{D\&S}$) روی سطح رضایت‌مندی کشاورزان ($S_F$) تأثیرگذار است. مطابق رابطهٔ ۱۸، هرچه این اختلاف بیشتر باشد سطح رضایت کمتر می‌شود.

$$S_F = 1 - D_{D\&S} \qquad (۱۸)$$

سطح رضایت‌مندی کشاورزان ($S_F$) به همراه متغیرهای وضعیت شبکهٔ فرعی ($S_S$)، مدیریت بهره‌برداری و نگهداری انتقال یافته به آب‌بران ($M_T$)، و مشارکت در تصمیم‌گیری ($P_D$) روی مشارکت کشاورزان تأثیرگذار خواهد بود. میزان مشارکت کشاورزان ($P$) از رابطهٔ ۱۹ قابل محاسبه است.

$$P = \left(S_F + S_S + M_T\right)P_D/3 \qquad (۱۹)$$

درصد مشارکت در تصمیم‌گیری‌ها ($P_D$) به صورت تابعی از ضریب حمایت قانونی ($C_L$) و ضریب مشارکت کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها ($C_P$) مطابق رابطهٔ ۲۰ تعریف شده است. در این‌جا فرض شده است که میانگین ضریب حمایت‌های قانونی و ضریب مشارکت در تصمیم‌گیری، سطح مشارکت دادن کشاورزان در تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد که طبق بررسی‌ها، در شبکهٔ قزوین هر کدام از این ضرایب ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

$$P_D = \left(C_L + C_P\right)/2 \qquad (۲۰)$$

متغیر دیگری که بر مشارکت تأثیرگذار است، مدیریت بهره‌برداری و نگهداری انتقال یافته به آب‌بران ($M_T$) است که برابر با مجموع مدیریت انتقال یافته در سال مبنا ($M_{TI}$) و میزان انتقال مدیریت ($T_M$) در هر سال خواهد بود و از رابطهٔ ۲۱ به دست می‌آید. مدیریت انتقال یافته در سال مبنا با توجه به حجم مسئولیت‌های واگذار شده به آب‌بران که صرفاً شامل لایروبی کانال‌های درجه ۳ بوده است، حدود ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

$$M_T = M_{T_1} + \sum_{t=1}^{n} T_{M_t} \qquad (۲۱)$$

میزان مدیریت انتقال یافته ($M_T$) در هر سال از حاصل‌ضرب ضریب انتقال مدیریت ($C_{MT}$) در پتانسیل انتقال مدیریت ($P_T$) در هر سال طبق رابطهٔ ۲۲ به دست می‌آید.

$$T_M = C_{MT} \times P_T \qquad (۲۲)$$

ضریب انتقال مدیریت ($C_{MT}$) در شبکه آبیاری قزوین تابع نسبت مشارکت ($P$) و فاصلهٔ عملکرد موجود و مطلوب ($D_P$) است، که با افزایش هر یک از آن‌ها ضریب انتقال مدیریت در شبکه افزایش می‌یابد. این ضریب به صورت رابطهٔ ۲۳ بیان شده است.

$$C_{MT} = P \times D_P \qquad (۲۳)$$

پتانسیل انتقال مدیریت ($P_T$) مطابق رابطهٔ ۲۴ به صورت اختلاف مدیریت انتقال یافته ($M_T$) و حداکثر مدیریت قابل انتقال است که با توجه به شرایط شبکهٔ آبیاری قزوین ۱۰۰ درصد فرض شده است.

$$P_T = 1 - M_T \qquad (۲۴)$$

طبق شکل ۱۱، انتقال مدیریت بهره‌برداری و نگهداری به آب‌بران باعث تغییراتی در احساس مالکیت کشاورزان ($S_O$) نسبت به اجزای شبکه و همچنین نظارت مسئولان ($S_A$) در عملیات بهره‌برداری و نگهداری این شبکه‌ها می‌شود. با توجه به روند تغییرات مشاهده شده این متغیرها نسبت به سطح مدیریت انتقال یافته در شبکهٔ آبیاری قزوین، این متغیرها به ترتیب به صورت روابط ۲۵ و ۲۶ در نظر گرفته شده‌اند.

$$S_O = M_T^{\,0.7} \qquad (۲۵)$$

رابطهٔ ۲۵ پس از آزمون فرم‌های مختلف رابطه (خطی، نمایی) و مقادیر مختلف نمای تابع و صحت‌سنجی نتایج، حاصل گردیده است.

$$S_A = 1 - M_T \qquad (۲۶)$$

در رابطهٔ ۲۶ هر چه سطح مدیریت انتقال یافته بیشتر باشد، نظارت مسئولان کمتر می‌شود تا آن‌جا که با انتقال کامل مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های فرعی به آب‌بران، نظارت مسئولان به طور کامل قطع خواهد شد.

در ادامه، با مشخص شدن سطح مشارکت کشاورزان ($P$) و میزان نظارت مسئولان ($S_A$) می‌توان میزان رعایت الگوی کشت ($P_C$) توسط کشاورزان را طبق رابطهٔ ۲۷ به دست آورد.

$$P_C = \left(P + S_A + Kn_F\right)/3 \qquad (۲۷)$$

که در آن،

$Kn_F$ = سطح دانش کشاورزان است.

از طرفی، مجموع درصد اجرای الگوی کشت ($P_C$) و ضریب حمایت قانونی ($C_L$) باعث کاهش برداشت غیرمجاز آب ($R_{UW}$) می‌شود. با افزایش حمایت قانونی، زمینهٔ برخورد تشکل‌ها با افراد متخلف فراهم می‌شود و برداشت غیرمجاز کاهش می‌یابد. با اجرای الگوی کشت نیز نیاز به آب اضافی کاهش می‌یابد و تخلفات آب دزدی کم می‌شود.

میزان کاهش ضریب برداشت غیرمجاز آب از رابطهٔ ۲۸ به دست می‌آید.

$$R_{UW} = (C_L + P_C)/2 \qquad (۲۸)$$

از طرفی آنچه باعث افزایش برداشت غیرمجاز آب ($I_{UW}$) می‌شود، قیمت آب ($P_W$) و مازاد تقاضا نسبت به تأمین آب ($D_{D\&S}$) است که با افزایش این متغیرها، برداشت غیرمجاز آب بیشتر خواهد شد. این میزان افزایش از رابطهٔ ۲۹ قابل محاسبه است.

$$I_{UW} = 0.25P_W + 0.75D_{D\&S} \qquad (۲۹)$$

با مشخص شدن میزان افزایش و کاهش برداشت غیرمجاز آب، میزان ضریب برداشت غیرمجاز آب از رابطهٔ ۳۰ قابل محاسبه خواهد بود.

$$C_{UW} = C_{UW_1} + \sum_{t=1}^{n}\left(I_{UW_t} - R_{UW_t}\right) \qquad (۳۰)$$

با توجه به این‌که آب در سال مبنا محدودیت نداشت، مقدار اولیه این متغیر ($C_{uw1}$) ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در نهایت تلفات آب (L) در مسیر انتقال و توزیع از رابطهٔ ۳۱ به دست می‌آید.

$$L = (D_W - W_U - U_R)\left(1 + \frac{C_{UW}}{(S_P + D_S)}\right) \qquad (۳۱)$$

که در آن،

$D_W$ = آب تحویلی از سد؛ $W_U$ = مصرف آب کشاورزی؛ $U_R$ = تغذیهٔ مصنوعی؛ $D_S$ = درصد توسعهٔ شبکهٔ فرعی؛ و $S_P$ = عملکرد فیزیکی سازه‌هاست. با مشخص شدن تلفات در مسیر انتقال و توزیع آب در شبکه، راندمان سیستم ($E_S$) و راندمان کل شبکه ($E_P$) به ترتیب از رابطهٔ ۳۲ و ۳۳ قابل محاسبه خواهند بود.

$$E_S = 1 - (L / S_W) \qquad (۳۲)$$

$$E_P = E_S \times E_A \qquad (۳۳)$$

که در آن‌ها،

$S_w$ = آب تحویلی به شبکه؛ و $E_A$= راندمان کاربرد است.

سطح عملکرد شبکه ($P_S$) که به صورت حاصل‌ضرب راندمان ($E_P$) و مشارکت ($P$) در نظر گرفته شده است، از رابطهٔ ۳۴ تعیین می‌شود.

$$P_S = E_P \times P \qquad (۳۴)$$

برای تعیین مقدار افزایش ($I_{PS}$) یا کاهش ($R_{PS}$) عملکرد شبکه، متوسط سطح عملکرد موجود شبکه ($A_{PS}$) با سطح عملکرد شبکه ($P_S$) در آن سال مقایسه و طبق رابطهٔ ۳۵ قابل عمل می‌شود.

با مشخص شدن مقدار افزایش یا کاهش عملکرد در هر سال، مقدار متوسط عملکرد موجود ($A_{PS}$) طبق رابطهٔ ۳۶ محاسبه می‌شود.

$$If\ (P_S - A_{PS}) \langle 0\ \ Then\ \ R_{PS} = |P_S - A_{PS}|\ \ And\ \ I_{PS} = 0\ \ Else\ \ I_{PS} = |P_S - A_{PS}|\ \ And\ \ R_{PS} = 0 \qquad (۳۵)$$

$$A_{PS} = S_{PS_1} + \sum_{t=1}^{n}\left(I_{PS_t} - R_{PS_t}\right) \qquad (۳۶)$$

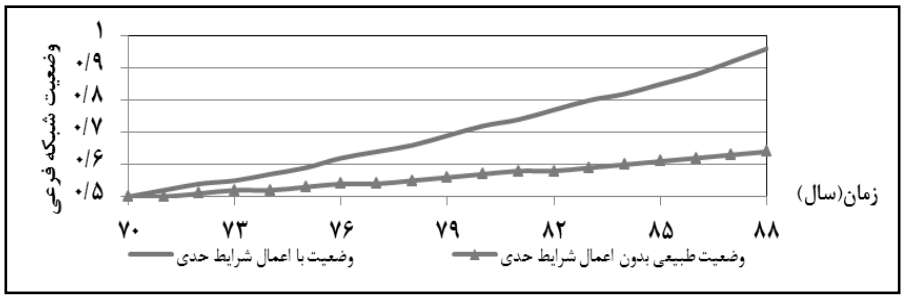
بنا بر اطلاعات موجود، مقدار اولیهٔ این متغیر ($A_{PS1}$) در سال مبنا ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در آخر با مقایسهٔ سطح عملکرد موجود شبکه ($A_{PS}$) با مقدار عملکرد مطلوب آن ($O_P$)، که از اهداف احداث شبکه است، فاصلهٔ عملکرد موجود و مطلوب ($D_P$) از رابطهٔ ۳۷ به دست می‌آید.

$$D_P = O_P - A_{PS} \qquad (۳۷)$$

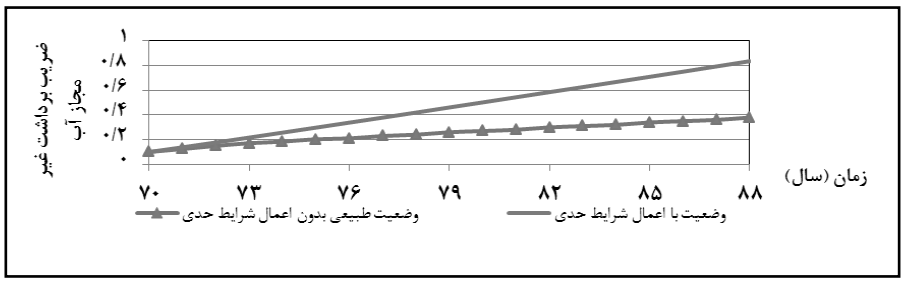
از آن‌جا که هدف از ساخت شبکه‌های آبیاری رسیدن به حداکثر عملکرد است، مقدار سطح عملکرد مطلوب شبکه، ۱ در نظر گرفته شده است.

## صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت مدل

برای اطمینان از عملکرد صحیح مدل، رفتار آن تحت شرایط حدی[1] و تکرار رفتار[2] آزمایش شد. آزمون شرایط حدی روی متغیر وضعیت شبکهٔ فرعی (در صورت افزایش مشارکت) و متغیر ضریب برداشت غیرمجاز آب (در صورت بالا رفتن تفاوت تقاضا و تأمین آب) اجرا و در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.




**شکل ۱۲- روند تغییرات وضعیت شبکه فرعی.**

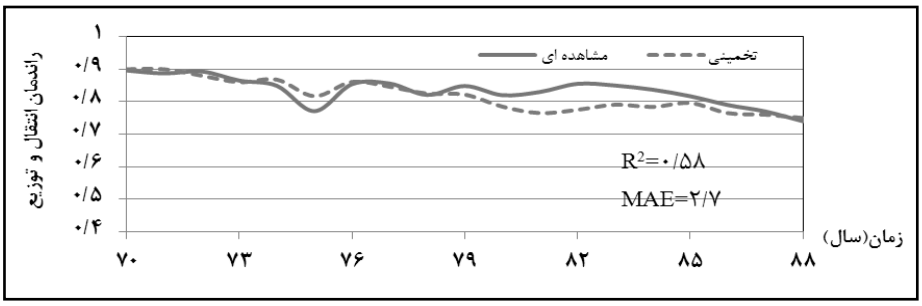



**شکل ۱۳- روند تغییرات ضریب برداشت غیرمجاز آب.**

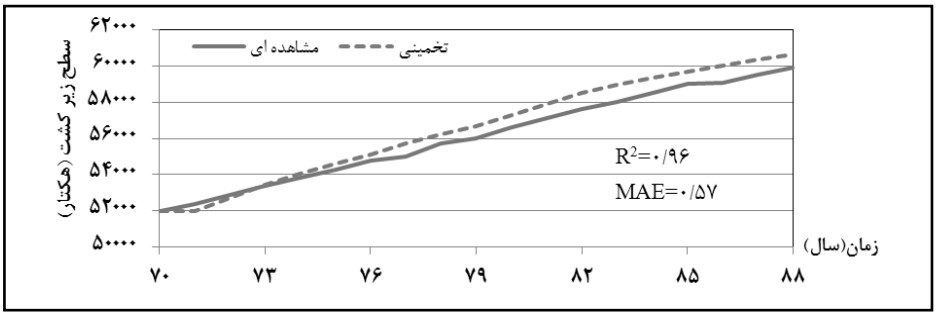
در آزمون تکرار رفتار، دو متغیر راندمان و سطح زیر کشت بررسی شده‌اند و نتایج آن در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. با توجه به این آزمون‌ها می‌توان گفت که مدل توسعه‌یافته تطابق قابل قبولی با رفتار واقعی شبکه دارد.

حساسیت مدل نسبت به تغییرات توابع انتخابی آن تحلیل می‌شود. برای این منظور به طور نمونه تابع ضریب توسعهٔ شبکهٔ فرعی (رابطهٔ ۱۱) با سه مقدار ضریب ۰/۵، ۱، و ۲ در نظر گرفته و تغیر رفتار عملکرد شبکه به ازای این سه مقدار در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بر اساس این آزمون، عملکرد شبکه نسبت به تغییرات مقدار تابع ضریب توسعهٔ شبکه حساسیت زیادی نشان نمی‌دهد.

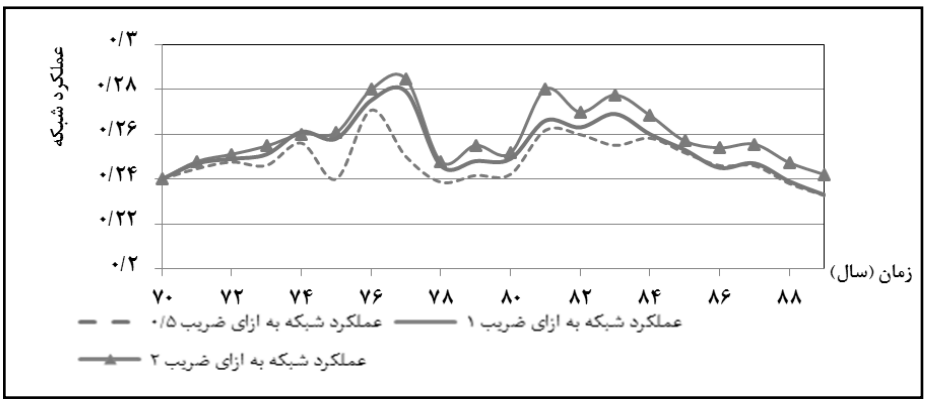
1- Extreme Conditions Tests
2- Behavior Reproduction Tests




**شکل ١٤- داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی راندمان انتقال و توزیع در شبکهٔ آبیاری قزوین.**




**شکل ١٥- داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی سطح زیر کشت در شبکهٔ آبیاری قزوین.**




**شکل ١٦- رفتار عملکرد شبکه به ازای حالت های مختلف تابع ضریب توسعه شبکهٔ فرعی (رابطهٔ ١١).**

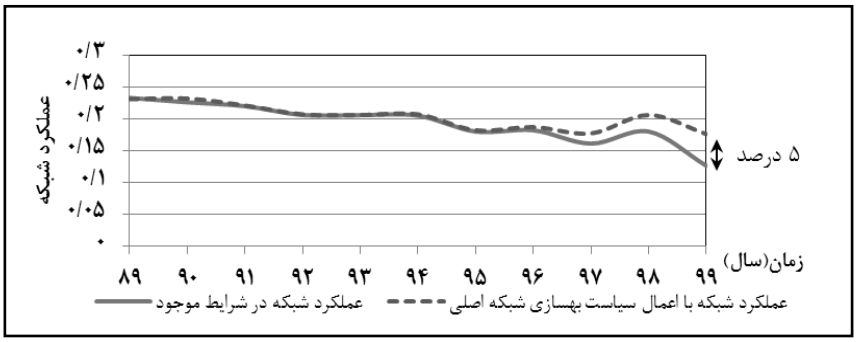
## اجرای مدل و تحلیل سیاست‌های اتخاذی

پس از توسعهٔ مدل بهسازی شبکه آبیاری قزوین با استفاده از داده‌های موجود (۱۳۸۸-۱۳۷۰)، مدل مورد نظر برای سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۸۹ شبیه‌سازی شد. برای نشان دادن توانایی مدل، ۳ سیاست بهسازی شبکه مورد آزمون قرار گرفته است:

### ۱- سیاست سرمایه‌گذاری در جهت بهسازی فیزیکی شبکهٔ اصلی

با توجه به روند سرمایه‌گذاری‌های موجود برای بهسازی شبکهٔ اصلی قزوین و رویکرد فعلی مدیران در جهت افزایش این سرمایه‌گذاری‌ها، این سیاست عیناً مطابق تحقیق واعظ‌تهرانی و همکاران در نظر گرفته شده

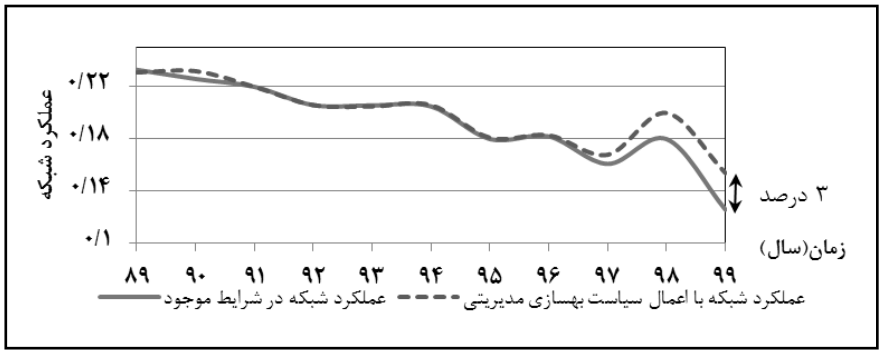
است، تا نتایج حاصل از آن در آینده در مدل کنونی مشخص شود. نتیجهٔ اعمال این سیاست در شکل ۱۷ نشان می‌دهد که با ادامهٔ وضع موجود در آینده، به‌رغم اعمال سیاست و بهبود وضعیت شبکهٔ اصلی، میزان عملکرد به روند کاهشی خود ادامه می‌دهد و تنها از شدت کاهش آن کاسته می‌شود. دلیل این امر آن است که اگر به بهبود دیگر عوامل مؤثر بر عملکرد توجه نشود و تنها بهسازی فیزیکی عملی شود، باز هم عملکرد در گذر زمان کاهش خواهد یافت. همچنین دیده می‌شود که تنها با بهسازی شبکهٔ اصلی، میزان عملکرد افزایش چندانی نیافته است و با وجود سرمایه‌گذاری زیاد برای بهسازی شبکهٔ اصلی، عملکرد آن نهایتاً در سال ۹۹ به میزان ۵ درصد نسبت به ادامهٔ روند موجود، بهبود خواهد داشت. دلیل این موضوع کم‌توجهی به بهسازی مدیریتی (حلقهٔ B2 در الگوی" انتقال بار مسئولیت") و همچنین بی‌توجهی به بهسازی شبکهٔ فرعی (حلقهٔ R2 در الگوی" راه‌حل‌های منجر به شکست")، به وجود آمده که از رشد حلقهٔ B1 کاسته است.




**شکل ۱۷- رفتار عملکرد شبکه در شرایط اعمال کردن و اعمال نکردن سیاست بهسازی شبکه اصلی طی سال‌های ۱۳۹۹ – ۱۳۸۹.**

## ۲- سیاست ارتقای پرسنل بهره برداری

پرسنل بهره‌برداری و نگهداری شبکهٔ اصلی نقش مؤثری در وضعیت عملکرد شبکه دارند، از این‌رو افزایش توانایی آن‌ها (که منجر به بهبود سطح مدیریتی شبکه خواهد شد) می‌تواند اثر زیادی روی بهبود شرایط داشته باشد. بنابراین، برای مشخص شدن اثر بهبود سطح مدیریت شبکه بر عملکرد آن در آینده، این سیاست ارزیابی شده است. اجرای این سیاست از طریق بهبود شاخص پرسنلی است که با بالا بردن سطح سواد پرسنل بهره‌برداری، افزایش مهارت‌های شغلی، و افزایش حقوق و مزایای آن‌ها شکل می‌گیرد. این سیاست با فرض ثابت ماندن تعداد پرسنل در نظر گرفته و نتایج آن در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند کاهشی عملکرد با وجود اعمال سیاست برطرف نشده و در سال ۹۹ میزان تأثیر آن بر بهبود عملکرد شبکه فقط ۳ درصد است و بدین معنی است که با بهسازی مدیریتی شبکهٔ اصلی و عدم توجه به عوامل دیگر، عملکرد شبکه افزایش چندانی نخواهد یافت، زیرا هر چقدر هم که مدیریت شبکهٔ اصلی از لحاظ عملیات بهره‌برداری و نگهداری کامل باشد، اگر تجهیزات و تأسیسات شبکهٔ اصلی و فرعی مناسب نباشند و کشاورزان در نگهداری از آن مشارکت نداشته باشند یا با اصول آبیاری و عملیات توزیع آب در شبکهٔ فرعی آشنا نباشند، نتیجهٔ مطلوب به دست نخواهد آمد.

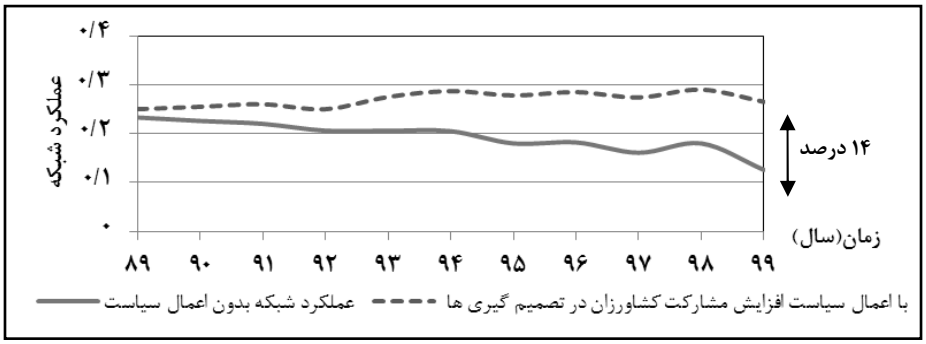



**شکل ۱۸- رفتار عملکرد شبکه در شرایط اعمال کردن و اعمال نکردن سیاست بهسازی مدیریتی شبکه طی سال‌های ۱۳۹۹ – ۱۳۸۹.**

## ۳- سیاست مشارکت دادن کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها

رضایت‌مندی کشاورزان نقش مؤثری بر مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های بهره‌برداری و نگهداری شبکه دارد. از این‌رو برای رفع الگوی محدودیت رشد در حلقهٔ B4، این سیاست ارزیابی شده است. در این سیاست فرض شده که سعی شود در تصمیم‌گیری‌ها از دیدگاه‌های کشاورزان بیشتر استفاده شود. این سیاست با تغییر ضریب مشارکت در تصمیم‌گیری از ۰/۵ به ۰/۷ اعمال شده است، یعنی فرض شده که در ۷۰ درصد تصمیم‌گیری‌ها از دیدگاه‌های کشاورزان استفاده شود. نتایج اعمال این سیاست در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

این شکل نشان می‌دهد که با اعمال این سیاست، میزان ارتقای عملکرد شبکه از سال‌های اولیهٔ شبیه‌سازی آغاز شده و با شیب بیشتری ادامه پیدا می‌کند و روند آن به صورت افزایشی تغییر می‌یابد. به طوری‌که میزان این ارتقا در سال آخر شبیه‌سازی به ۱۴ درصد می‌رسد که بدین معنی است که با ارزش بخشیدن به کشاورزان و به کارگیری تجربیات آن‌ها در ت تصمیماتی که دربارهٔ شبکه و در حوزهٔ فعالیت آن‌ها گرفته می‌شود، می‌توان گام مؤثری در بهبود عملکرد شبکه برداشت.




**شکل ۱۹- رفتار عملکرد شبکه در شرایط اعمال کردن و اعمال نکردن سیاست افزایش مشارکت کشاورزان طی سال‌های ۱۳۹۹ – ۱۳۸۹.**

## نتیجه‌گیری

نتیجهٔ حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- ارتقای عملکرد شبکه‌های آبیاری مستلزم توجه به تعامل مجموعه عوامل تأثیرگذار، الگوهای حاکم بر پدیده، و تغییر رفتارها طی زمان است.

۲- با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها نشان داده شد که برای پایداری اقدامات برای بهبود عملکرد شبکه‌ها نباید به صورت یک‌جانبه به موضوع پرداخت، بلکه در کنار این موضوع دینامیک‌هایی وجود دارند و یا ممکن است فعال شوند که در درازمدت، به‌رغم نیت اولیهٔ برنامه‌ریزان، پیامدهایی ناخواسته داشته باشند که از ابتدا مدنظر نبوده‌اند.

۳- نتایج نشان می‌دهد که طراحی سیستمیک علاوه بر مدل‌سازی دینامیک‌های حاکم بر بهسازی شبکه‌های آبیاری، قادر است به عنوان یک سیستم تصمیم‌یار، امکان ارزیابی سیاست‌های مختلف را با دقت و سرعت بالایی فراهم آورد.

۴- با توسعهٔ مدل موجود بهسازی شبکهٔ آبیاری قزوین و در نظر گرفتن تعداد بیشتری از عوامل مؤثر، نه تنها عملکرد شبکه به صورت همه‌جانبه و دقیق‌تر بررسی می‌شود بلکه امکان آزمون سیاست‌های بیشتری برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آید.

۵- با ادامهٔ وضع موجود در شبکهٔ آبیاری قزوین و بدون اقدامات اصلاحی، پس از چند سال شاهد کاهش حدود ۱۰ درصدی میزان عملکرد در افق سال ۱۳۹۹ خواهیم بود. با اعمال سیاست‌های بهبود فیزیکی و مدیریتی، تا حدودی عملکرد شبکه بهبود خواهد یافت، اما مانع روند کاهشی آن در درازمدت نخواهد شد.

۶- بیشترین تأثیرپذیری عملکرد از سیاست‌های اعمال شده، ناشی از سیاست افزایش مشارکت کشاورزان در تصمیم‌گیری‌هاست. با نظرخواهی از کشاورزان در مسائل مرتبط با آن‌ها، می‌توان احساس مسئولیت و انگیزه مشارکت کشاورزان را نسبت به شبکه بالا برد. کشاورزان با افزایش مشارکتشان در مسائل بهره‌برداری و نگهداری شبکه، از طرق مختلف موجب بهبود عملکرد آن خواهند شد.

## مراجع


Ahmad, S. and Simonovic, S. P. 2000a. Analysis of economic and social impacts of flood management policies using system dynamics. Proceeding of International Conference of Atmospheric, Surface and Subsurface Hydrology and Interactions. Nov. 5-8. American Institute of Hydrology. Research Triangle Park. North Carolina.

Ahmad, S. and Simonovic, S. P. 2000b. System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. J. Comput. Civil. Eng. 14(3): 190-198.

Anon. 2007. Modernization Report of Ghazvin Irrigation Network. Pandam Consulting Engineering Co. Tahran. Iran. (in Farsi)

Beall, A., Feidler, F., Boll, J. and Cosens, B. 2011. Sustainable water resource management and participatory system dynamics. Case study: developing the Palouse basin participatory model. Sustainability. 3(5): 720-742.

Burt, C. M. 2011. The Irrigation Sector Shift from Construction to Modernization : What is required for success?. Proceeding of the 21st International Congress on Irrigation and Drainage (ICID). Oct. 15-23. Tehran. Iran.

Elmahdi, A., Malano, H. and Etchells, T. 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. Evironmentalist. 27(1): 3–12.

Jalali, M. and Afshar, A. 2004. System dynamics simulation of hydroelectiric storage energy. Proceedings of the 1st Conference of Iran Water Resources Management. Tehran University. Nov. 17-18. Tehran. Iran. (in Farsi)

Karimi, M., Heydari, N. and Gomrokchi, U. 2008. Studying problems of Management transfer plan to farmers in Ghazvin irrigation network. Proceedings of the 2nd Conference, Management of Irrigation and Drainage networks. Shahid Chamran University. Jan. 28-30. Ahvaz. Iran. (in Farsi)

Khan, S. 2004. China's Irrigation Development, Rational Allocation of Water Resources and Food Security (Country Policy Support Programee (CPSP)). Chinese National Committee on Irrigation and Drainage (CNCID).

Li, L., and Simonovic, S. P. 2002. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American Prairie watersheds Hydrol. Process. 16, 2645-2666.

Masike, S. 2011. Application of system dynamics approach for water planning and decision making under water scarcity at Jwaneng diamond mine. J. Geogr. Reg. plan. 4(5): 251-260.

Mishra, A., Anand, A., Singh, R. and Raghuwanshi, N. S. 2001. Hydraulic modeling of kangsabati main canal for performance assessment. J. Irrig. Drain. E- ASCE. 127(1): 27-34.

Monem, M. J. and Ghoddusi, H. 2004. Evaluation and improvement of irrigation networks performance with sensitivity analysis in data envelopment analysis. J. Agric. Sci. Nat. Resour. 11(1): 69-77. (in Farsi)

Plusquellec, H. 2002. How Design, Management and Policy Affect the Performance of Irrigation Projects (Emerging Modernization Procedures and Design Standadrds). FAO. Bangkok Regional Office. Bangkok. Thailand.

Sánchez-Román, R. M., Folegatti, M. V., Orellana González, A. M. G. 2010. Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiaí river basins: A dynamic systems approach. J. Water Resour. Manag. 24(4): 761-773.

Saysel, A. K. 2004. System Dynamics Model for Integrated Environmental Assessment of Large-Scale Surface Irrigation. Technical Report 2. The System Dynamics Group, Department of Information Science. University of Bergen. Norway.

Simonovic, S. P., 2002. Global water dynamics: Issues for the 21st century. J. Water Sci. Technol. 45(8): 53-64.

Sohrab, F. and Abbasi, F. 2009. Evaluating on irrigation efficiency in Iran and show of irrigation efficiency map. Proceeding of the 12th Congress of Iranian National Committee of irrigation and Drainage (ICID). Feb. 24-25. Tehran. Iran. (in Farsi)

Sotudehnia, A., Asgari, M., Kakagi, A. and Sheykh-Hoseini, M. 2006. Transfer Strategies of Irrigation Network's Management to Association (Irrigation Network of Ghazvin). Applied Research Plan. Iran Water Resources Management Company. Tehran. Iran. (in Farsi)

Stave, K. 2003. A system dynamic models to facilitate public understanding of water management options in las Vegas. J. Environ. Manag. 67, 303-313.

Sterman, J. D. 2000. Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill Higher Education. Jerrey J. Shelstad Pub.

Vaez-Tehrani, M., Monem, M. J. and Bagheri, A. 2010. System dynamics model to assess irrigation networks. J. Agric. Eng. Res. 11(4): 35-56. (in Farsi)

Vlachos, D., Georgiadis, P. and Iakovou, E. 2007. A System dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. Comput. Oper. Res 34(2): 367-394.

Winz, I., Brierley, G. and Trowsdale, S. 2009. The use of system dynamics simulation in water resources management. Water Resour. Manag. 23(7): 1301-1323.

*Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.13/No.4/2013/P:1-24*

# System Dynamics Model Development for Irrigation Network Rehabilitation, Considering Farmers Participation and Personnel Promotion

**A. Hatam, M. J. Monem* and A. Bagheri**

* Corresponding Author: Associate Professor, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14155-4838, Tehran, Iran. E-Mail: monem_mj@modares.ac.ir
Received: 26 February 2012, Accepted: 8 December 2012

The quality of human life is directly affected by water resources planning and management. Major portion of this resources used for agricultural purposes. Irrigation networks that are built to provide water needed for agriculture, have significant role in efficient use of water resources. Many years have passed since the construction of the irrigation networks, most of them have shown low performance; Therefore, improvement of existing irrigation networks to improve their performance is essential. Involvement of so many components in irrigation networks rehabilitation and their complex interactive relation on system performance, requires a long term, integrated and systemic. Recently, system dynamics approach have been used for irrigation networks rehabilitation studies. Considering the importance of farmrs' participation and management improvement on performance of irrigation networks, in this paper, the system dynamics model of Qazvin irrigation network was completed with regard to these issues. In addition to physical aspects of irrigation networks, managerial and social issues through various policies for the improvement of irrigation networks are considered. The results showed that with the current trend continues, performance of Qazvin irrigation network will be worse in the future and will be declined about 10% by the year 1399. Various policies such as physical and managerial improvement or increasing farmers participation has different impacts of performance improvement. Physical and managerial policies have improved the performance about 5% and 3% by the year 1399. Farmers participation showed highest impact on performance improvement which is about 14% by the year 1399.

**Key words:** Efficiency, Performance, Qazvin irrigation and drainage network, Rehabilitation, System dynamics