



وزارت جہاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



دستنامه فنی

مدل پویایی سامانه و کاربرد آن در مدیریت حوزه‌های آبخیز

نویسندگان:

ابراهیم کریمی سنگچینی، سید حسین آرامی، ایرج ویسکرمی، الهام داودی

شماره ثبت: ۶۷۷۰۴

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان

دستنامه فنی:

مدل پویایی سامانه و کاربرد آن در مدیریت حوزه‌های آبخیز

نویسندگان:

ابراهیم کریمی سنگچینی، سید حسین آرامی، ایرج ویسکرمی، الهام داودی

شماره ثبت:

۶۷۷۰۴

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان

عنوان: مدل پویایی سامانه و کاربرد آن در مدیریت حوزه‌های آبخیز
نام و نام خانوادگی نویسندگان: ابراهیم کریمی سنگچینی، سید حسین آرامی، ایرج ویسکرمی، الهام داودی

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان
صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق
ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۴

این اثر در مورخه ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ با شماره ۶۷۷۰۴ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جدول‌ها، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
۱- مقدمه.....	۲
۲- مدیریت جامع حوزه آبخیز.....	۳
۳- ارکان مدیریت جامع حوزه آبخیز.....	۵
۴- معرفی مدل پویایی سامانه.....	۶
۵- معرفی نرم افزار Vensim.....	۷
۶- مفاهیم نظری و اساسی در پویایی سامانه.....	۹
۷- مراحل اجرای مدل پویایی سامانه.....	۹
۷-۱- ریاضیات حاکم بر مسأله پویایی سامانه.....	۱۰
۷-۲- الگوهای سامانه‌ای.....	۱۱
۷-۳- نمودارهای علی و معلولی.....	۱۱
۷-۴- حلقه‌های بازخوردی.....	۱۳
بازخورد مثبت.....	۱۳
بازخورد منفی.....	۱۳
نمونه‌هایی از حلقه‌های بازخوردی.....	۱۴
جمعیت - اقتصاد.....	۱۴
بیان آب-جمعیت.....	۱۵
اقتصاد - کمیت و کیفیت آب.....	۱۵
اقتصاد-فرسایش و رسوب.....	۱۶
اقتصاد-بیان آب.....	۱۷
۷-۵- رسم نمودارهای مرجع.....	۱۸
۷-۶- تعریف زیرسامانه‌ها.....	۱۸
۷-۷- تعریف ارتباط اجزای زیرسامانه‌ها.....	۱۸
زیرسامانه فیزیکی.....	۱۸
زیرسامانه اقتصادی.....	۱۹
زیرسامانه اجتماعی.....	۲۰
زیرسامانه اکولوژیکی.....	۲۰
۷-۸- تهیه مدل مفهومی، نمودار ذخیره و جریان و اجرای مدل.....	۲۱
۷-۹- آزمونهای صحت‌سنجی مدل.....	۲۵
آزمون شرایط حدی.....	۲۵
آزمونهای رفتار (عملکرد) مدل.....	۲۵
۸- بحث و نتیجه‌گیری.....	۲۶
منابع.....	۲۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱- نمودار شماتیک مدل جریان-ذخیره ۱۰
- شکل ۲- نمودار ارتباط مؤلفه‌های مطرح در نمودار جریان ۱۲
- شکل ۳- نمودار نشان‌دهنده حلقه بازخوردی مثبت ۱۳
- شکل ۴- نمودار نشان‌دهنده حلقه بازخوردی منفی ۱۴
- شکل ۵- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- جمعیت ۱۴
- شکل ۶- توالی و اجزای حلقه بازخوردی جمعیت- بیلان آب ۱۵
- شکل ۷- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- کمیت و کیفیت آب ۱۶
- شکل ۸- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- فرسایش و رسوب ۱۷
- شکل ۹- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- بیلان آب ۱۷
- شکل ۱۰- نمونه‌ای از نمودار نمایش زیرسامانه‌های مدیریت جامع منابع آب و خاک و ارتباط آن‌ها ۱۸
- شکل ۱۱- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی و معلولی بین اجزای زیرسامانه فیزیکی ۱۹
- شکل ۱۲- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی و معلولی بین اجزای زیرسامانه فیزیکی ۱۹
- شکل ۱۳- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی و معلولی بین اجزای زیرسامانه اجتماعی ۲۰
- شکل ۱۴- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی و معلولی بین اجزای زیرسامانه اکولوژیکی ۲۱
- شکل ۱۵- نمونه‌ای از نمودار علت معلول حاکم بر کل مدل ۲۲
- شکل ۱۶- نمونه‌ای از نمودار ذخیره - جریان مدیریت جامع آبخیز (قسمت اول) ۲۳
- شکل ۱۷- نمونه‌ای از نمودار ذخیره - جریان مدیریت جامع آبخیز (قسمت دوم) ۲۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱- ابزارها و نمادها در نمودارهای علت و معلول ۱۲

چکیده

مدل پویایی سامانه با افزایش سطح ادراک سامانه آبخیز، مدیریت جامع و پایدار منابع آب و خاک در حوزه‌های آبخیز را تسهیل می‌کند. پویایی سامانه، تئوری، روش‌ها و فلسفه موردنیاز برای تجزیه و تحلیل رفتار سامانه‌ها را به هم پیوند داده است. مدل‌سازی پویایی سامانه به یک مجموعه‌ای از روش‌های عددی و مفهومی اشاره دارند که در فهم ساختار و رفتار سامانه‌های پیچیده استفاده می‌شوند. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر با رویکردی جامع است. علم پویایی سامانه، یک ابزار مدیریتی براساس این نگرش است. سناریوهای مدیریتی می‌تواند از ترکیب گزینه‌های مدیریتی ایجاد می‌شوند. در زمینه شبیه‌سازی سامانه‌ها، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی توسعه یافته‌اند که می‌توان به RIBASIM، WEAP، DYNAMO، STELLA، MODSIM و Vensim اشاره کرد. به‌منظور استفاده از مدل پویایی سامانه، ابتدا مسائل و مشکلات حوزه آبخیز باید بررسی و لیست شوند. سپس مدل مفهومی پویایی سامانه تهیه شود. نمودارهای علت و معلولی رسم شوند. حلقه‌های بازخوردی مشخص شوند. نمودارهای مرجع رسم شوند. زیرسامانه‌ها و ارتباط اجزای زیرسامانه‌ها تعریف شوند. نمودار ذخیره و جریان ترسیم شود و مدل اجرا شود. آزمون‌های صحت‌سنجی مدل شامل آزمون شرایط حدی و آزمون‌های رفتار (عملکرد) مدل است. درنهایت سناریوها برای مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز طراحی می‌شود. مدل پویایی سامانه به‌عنوان یکی از رویکردهای تلفیق در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز برای افزایش ادراک ذی‌نفعان از روابط علی و معلولی و بازخوردهای سامانه سودمند است. روش پویایی سامانه با قابلیت‌ها و سادگی‌های خود، امکان درگیرکردن تصمیم‌گیران آبخیز را در فرآیند مدل‌سازی و مقایسه سناریوهای مختلف ایجاد می‌کند. این رویکرد به کاربران و تصمیم‌گیران آبخیز فرصت می‌دهد که به‌جای درگیر شدن در پیچیدگی‌های تعریف سامانه و انجام شبیه‌سازی‌ها، زمان بیشتری را صرف مفهومی کردن سامانه و بررسی صحت داده‌ها و نتایج کند.

واژه‌های کلیدی: افزایش ادراک ذی‌نفعان، پویایی سامانه، سناریوهای مدیریتی، مدیریت جامع آبخیز.

۱- مقدمه

مدیریت جامع حوزه آبخیز، به‌عنوان مفهومی نو و رویکردی جدید در راستای برنامه‌ریزی، توسعه مدیریت منابع آب و خاک و پوشش گیاهی، با تأکید ویژه بر مسائل اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی مطرح است که به دنبال ایجاد راهکارهای مشارکتی در این عرصه‌ها است. فلسفه وجودی مدیریت حوزه‌های آبخیز، رویکرد جامع یکپارچه و فراگیر در مدیریت منابع طبیعی است. مقصود و هدف این رویکرد و این راهکار، ایجاد یکپارچگی و هماهنگی در مدیریت منابع طبیعی و منابع اجتماعی حوزه‌های آبخیز در قالب برنامه‌های مردم‌محور است (Mutekanga, ۲۰۱۲). به عبارت دیگر، هدف کلی مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، توسعه معیشت پایدار روستایی براساس مدیریت جامع منابع طبیعی همراه با مشارکت همه ذی‌نفعان است، اما شوربختانه این چارچوب در برخی از کشورهای جهان از جمله ایران، با وجود اعلان و اعلام نیاز از سوی کارشناسان، پژوهشگران و مدیران سازمان‌های پژوهشی و اجرایی متولی منابع طبیعی و محیط‌زیست، به دلایل مختلفی از قبیل: فقدان قوانین حامی، سهم‌خواهی ذی‌نفعان در چارچوبی خارج از اصول توسعه پایدار، سیاست‌های خودکفایی به‌ویژه در ارتباط با محصولات زراعی- باغی و نبود میثاقی ملی، هنوز عملیاتی نشده است (صالح‌پور جم و مصفایی، ۱۴۰۲). روش پویایی سامانه یکی از روش‌هایی است که با قابلیت‌ها و سادگی‌های خود، امکان درگیرکردن تصمیم‌گیران را در فرآیند مدل‌سازی و مقایسه سناریوهای مختلف ایجاد می‌کند. این روش‌ها به کاربران و تصمیم‌گیران فرصت می‌دهد که به جای درگیر شدن در پیچیدگی‌های تعریف سامانه و انجام شبیه‌سازی‌ها، زمان بیشتری را صرف مفهومی‌کردن سامانه و بررسی صحت داده‌ها و نتایج کند. رویکرد پویایی سامانه به ارزیابی تصمیمات و سیاست‌های مختلف کمک می‌کند و همچنین می‌تواند به سؤالات زیادی درباره استفاده از آب، محیط‌زیست، اهداف جریان، طراحی و سیاست‌های برداشت و تخصیص آب پاسخ گوید (Elmahdi و همکاران، ۲۰۰۷).

سیاست‌گذاری مدیریت جامع آبخیز نیاز به فهم سامانه، فرآیندها و پاسخ به تغییرات گوناگون آن دارد. با وجود این، مدیریت منابع آب و خاک در یک مفهوم پیچیده و مستقل شامل سامانه‌های اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی نمود دارد که به وسیله فعل و انفعالات بیشمار بازخوردی و تأخیری کنترل می‌شود. همچنین توسط

رفتار غیرخطی و مستقیم - متقابل توصیف می‌شود. نقص در ملاحظه پیچیدگی دینامیکی منجر به مقاومت سیاسی غیرقابل پیش‌بینی و بعضی مواقع وضعیت‌های مصیبت‌بار می‌شود. همچنین در سامانه‌های اجتماعی و اقتصادی به‌دلیل پیچیدگی، گستردگی و روابط غیرخطی میان متغیرها، انتخاب مؤثرترین آن‌ها کار دشوار و پرهزینه‌ای است. پویایی سامانه با دید کلی‌نگر مسائل دنیای واقعی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. پویایی سامانه یک روش‌شناسی است که به‌صورت ویژه برای تحلیل سامانه‌های پیچیده، بزرگ، غیرخطی و سامانه‌های کیفی اقتصادی - اجتماعی به‌کار می‌رود. مدل‌های پویایی سامانه یک چهارچوب مدل‌سازی بازخوردی - جهت‌دار را برای یادگیری و ارتباط درباره پیچیدگی مدیریت منابع آب و خاک ارائه می‌کنند. این مدل‌ها به‌صورت گسترده در بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی شامل مدیریت منابع آب و خاک به‌کار می‌روند (Winz و همکاران، ۲۰۰۹). مدل پویایی سامانه یک روش دقیق برای تفکر، تجسم و برقراری ارتباط درباره ارزیابی آینده سامانه‌های پیچیده است که به‌وسیله ایجاد مدل‌های علی‌ومعلولی، روابط داخلی بین فرآیندهای فیزیکی (مانند جریان‌ات آب سطحی و زیرزمینی) و رفتاری (مانند قوانین تصمیم‌گیری و آگاهی - ها) در سامانه را محاسبه می‌کند (Sterman، ۲۰۰۰).

۲- مدیریت جامع حوزه آبخیز^۱

با توجه به مطالعات تاریخی در کشور، در هر محدوده‌ای که کشاورزان نیاز به آبیاری برای کشت داشته‌اند، مدیریت سامانه‌های منابع آب مطرح شده است و بر همین اساس همواره نظارت و کنترل بر بهره‌برداری از منابع اصلی مانند رودخانه‌ها بر عهده دولت مرکزی و منابع کوچک‌تر بر عهده سیاست‌گذاران و یا مسؤولین محلی بوده است. بنابراین مدیریت منابع آب همواره نقش کلیدی در تمدن ایفا کرده است. بر همین اساس، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب با توجه به ساختارهای سیاسی و اقتصادی در کشور از پیشینه تاریخی بلندمدت برخوردار است (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳).

مدیریت یکپارچه آبخیز فرایندی است که توسعه یکپارچه آب، خاک و سایر منابع مرتبط را به‌منظور به بیشینه‌رساندن عایدات اقتصادی و اجتماعی، به شرطی که با نگرش عادلانه، عواید اقتصادی منجر به هدر رفت منابع اصلی نشود، ممکن می‌سازد. تلفیق معضلات، عوامل مؤثر بر بخش‌های مختلف آبخیز، ابعاد مختلف (بیوفیزیکی و اقتصادی- اجتماعی)، افراد مرتبط با آبخیز و نیز مدل‌ها و داده‌ها در مقیاس‌های مختلف از ابعاد ارزیابی مدیریت یکپارچه آبخیز هستند (Jakeman و همکاران، ۲۰۰۵). مدیریت منابع آب و خاک نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر با رویکرد جامع است. در یک حوزه آبخیز، سامانه‌های مختلف طبیعی و انسانی وجود دارد که در اندرکنش با یکدیگر قرار دارند. در مدیریت جامع منابع آب و خاک در سطح حوزه آبخیز، اندرکنش اجزای درونی هر سامانه و نیز اندرکنش سامانه‌ها باید در نظر گرفته شود. تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف و دیدگاه‌های مدیریتی متفاوت از ضروریات مدیریت یکپارچه منابع آب و خاک به‌منظور اخذ تصمیم‌گیری است. مدل‌های مرسوم به مدل‌های مهندسی با به‌کارگیری فن‌های ریاضی از قبیل روش‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و یا ترکیبی از هر دو روش ما را قادر به تحلیل مسائل موجود می‌نمایند (گلیان و همکاران، ۱۳۸۶). بنابراین مدیریت جامع حوزه آبخیز، مدیریتی هماهنگ بر سامانه‌های فیزیکی، بیولوژیک و اجتماعی و اقتصادی است و شرایطی را فراهم می‌سازد که ضمن تأمین منافع جامعه، تأثیر منفی بر منابع طبیعی به کمینه مقدار خود برسد (اسدی‌نیلوان و همکاران، ۱۳۹۵).

یکی از مهم‌ترین دلایل این مورد آن است که مدیران و برنامه‌ریزان حوزه‌های آبخیز اغلب با مشکلاتی در تصمیم‌گیری‌های پیچیده مواجه هستند. این پیچیدگی‌ها عمدتاً به دلیل این واقعیت است که مقدار عظیمی از عوامل مؤثر و متغیرها وجود دارند که باید در تصمیم‌گیری لحاظ شوند و از آنجا که اثرات و وابستگی‌های داخلی این عوامل متفاوت است؛ مدیران و برنامه‌ریزان برای درک مسأله با مشکل مواجه می‌شوند. مقدار اطلاعات و تقابل عوامل باعث می‌شود که بشر قادر به مشاهده کامل مسائل تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ریزی استفاده از زمین نباشد (Witlox، ۲۰۰۵). به‌طوری‌که در گذشته تصمیم‌گیری‌ها فقط مبتنی بر یک هدف اصلی انجام می‌شد؛ اما امروزه با استفاده از مدل‌ها و تکنیک‌های مختلف می‌توان تمامی معیارهای کیفی، کمی و معیارهای متضاد را در کنار هم بررسی کرد (Pohekar و Ramachandran، ۲۰۰۴). بنابراین با توجه

به اهمیت و ضرورت مدیریت یکپارچه آبخیز ضرورت توسعه یک مدل پویایی سامانه در این راستا دارای اهمیت است. با توسعه مدل پویایی سامانه به صورت مشارکتی، ذی‌نفعان قادر خواهند بود در فرآیند مدیریت یکپارچه منابع آب و خاک حوضه به‌طور فعال دخالت اثرگذار داشته باشند.

۳- ارکان مدیریت جامع حوزه آبخیز

مدیریت جامع حوزه آبخیز دارای فرآیندی است که با کاربرست شایسته آن، بهبود وضعیت و کاهش مخاطرات آبخیز و یا حفظ شرایط مطلوب کنونی با درنظرگرفتن پایداری سلامت آبخیز تضمین می‌شود. این فرآیند بازخورد دار مشارکت‌محور، سلامت و پایداری آبخیز را به‌عنوان اصلی‌ترین هدف خود در چارچوب مدیریتی جامع در گستره آبخیز دنبال می‌کند. این در حالی است که عملیاتی کردن این نگاه مدیریتی و تحقق شایسته اهداف مربوطه نیازمند حضور مؤلفه‌هایی است که در این نوشتار از آن‌ها به‌عنوان مؤلفه‌ها یا ارکان برپایی مدیریت جامع حوزه آبخیز نام برده شده است (صالح‌پور جم و مصفایی، ۱۴۰۲). این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از:

- رویکردهای متعاقب مدیریت جامع آبخیز
- الگوهای مفهومی یا چارچوب‌های فرآیندی
- سیاست‌ها و قوانین حامی (اسناد بالادستی، بخش‌نامه‌ها و...)
- دستورالعمل‌ها، شرح خدمات و...
- شناخت و تحلیل آبخیز
- تحلیل ذی‌ربطان
- ساختاربندی مسأله و تدوین راهبردها و راه‌حل‌ها
- برنامه‌های عملیاتی
- بودجه‌بندی
- سازمان کار
- انسجام درون و برون‌سازمانی
- اجرای برنامه‌های عملیاتی
- سامانه‌های پشتیبان تصمیم
- سامانه‌های پایش و ارزیابی

به‌طور خلاصه، مبتنی بر رویکردهای اتخاذ شده برای مدیریت جامع آبخیز، الگوی مفهومی مدیریت جامع آبخیز طراحی و عملیاتی می‌شود. این الگو که معمولاً مؤلفه‌هایی مانند شناخت و تحلیل آبخیز و نیز تحلیل ذی‌ربطان را در گام‌های اولیه خود دارد؛ ساختار بندی مسأله و تدوین انواع راهبردها و راه‌حل‌های فنی و مدیریتی را مبتنی بر تحلیل‌های انجام شده در مراحل بعدی مدنظر قرار می‌دهد (صالح‌پور جم و مصفايي، ۱۴۰۲). همچنین، در مراحل بعدی برای هر یک از راه‌حل‌های فنی- مدیریتی تعیین‌شده، تدوین برنامه عملیاتی صورت می‌گیرد (Salehpour Jam و همکاران، ۲۰۲۱). در این بین، مدل SWOT یکی از روش‌های ساختارمند و پرکاربرد در نیل به اهداف مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز است.

۴- معرفی مدل پویایی سامانه

پویایی سامانه یک روش شبیه‌سازی بر مبنای بازخورد است که در حیطه مدل‌سازی سامانه‌های منابع آب در حال رشد و همگانی‌شدن است. روش پویایی سامانه، به‌عنوان یک رویکرد مدل‌سازی، تاریخچه طولانی داشته و منشأ آن در کار فاستر (۱۹۶۱) است. وی این رویکرد را برای درک مبانی استراتژیک در سامانه‌های پویای پیچیده ایجاد کرد. محدوده‌های کاربردی پویایی سامانه بسیار وسیع بوده و به‌خصوص بر کاربردهای آن در مسائل اجتماعی و اقتصادی تأکید بسیار می‌شود. رابطه پیوستگی جرم، یکی از مفاهیم اساسی در پویایی سامانه است. با توجه به نقش مهمی که این رابطه در شبیه‌سازی منابع و مصارف سامانه‌های منابع آب ایفا می‌کند، روش‌های پویایی سامانه در این‌گونه مسائل کاربرد بسیار مناسبی دارد. پویایی سامانه‌ها روشی برای مطالعه و مدیریت سامانه‌های پیچیده و دارای بازخورد است. شبیه‌سازی سامانه معمولاً منجر به درک جدیدی از ساختار و رفتار سامانه می‌شود که در دور بعدی امکان تهیه مدل‌های کامل‌تری را فراهم می‌سازد. همچنین مدل‌های پویایی سامانه‌ها امکان وارد کردن متغیرهای کیفی و کمی را به‌طور هم‌زمان در سامانه فراهم می‌کند. این امتیاز بزرگی است که در مدل‌های ریاضی پیاده‌سازی آن بسیار مشکل است (Fiorillo, ۲۰۰۷).

ازجمله مفاهیم مهم در روش پویایی سامانه، قانون پیوستگی است. این روش مدل‌سازی از چهار ابزار ذخیره^۱، جریان^۲، رابط‌ها^۳ و تبدیل‌کننده‌ها^۴ استفاده می‌کند و به‌وسیله آن‌ها ذهنیت مدل‌ساز را به نمودارهای علت‌ومعلولی و در نهایت به نمودار ذخیره و جریان تبدیل می‌کند. هنر مدل‌سازی به روش پویایی سامانه‌ها پوشش و نمایش فرآیند بازخورد است که همراه با ساختار ذخیره و جریان، تأخیر زمانی^۵ و توابع غیرخطی^۶ دینامیک سامانه را تعریف می‌کند. همه دینامیک‌ها از دو نوع حلقه بازخوردی مثبت^۷ (خود تقویت‌کننده) و منفی^۸ (خود اصلاح‌کننده) به وجود می‌آید. حلقه منفی هدف را جستجو می‌کند. این حلقه با ساختار جستجوگر خود توازن و پایداری در سامانه را تولید می‌کند (Simonovic and Ahmad, ۲۰۰۰).

مدیریت جامع آبخیز نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر با رویکردی جامع است. علم پویایی سامانه، یک ابزار مدیریتی براساس این نگرش است. این علم قادر است، شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده آبخیز را برای تسهیل یادگیری مشارکتی انجام دهد. به کمک این شبیه‌سازی پیامدهای نامشخص تصمیم‌گیری‌ها آشکار می‌شود. هدف عمده این روش شبیه‌سازی، تسریع و تسهیل یادگیری رفتار سامانه‌ها در شرایط فعلی و آینده است (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). مدل پویایی سامانه یک روش دقیق برای تفکر، تجسم و برقراری ارتباط درباره ارزیابی آینده سامانه‌های پیچیده می‌باشد که به‌وسیله ایجاد مدل‌های علی‌ومعلولی، روابط داخلی بین فرآیندهای فیزیکی (مانند جریان‌ات آب سطحی و زیرزمینی) و رفتاری (مانند قوانین تصمیم‌گیری و آگاهی‌ها) در سامانه را محاسبه می‌کند (Sterman, ۲۰۰۰).

۵- معرفی نرم‌افزار Vensim

در زمینه شبیه‌سازی سامانه‌ها، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی توسعه یافته‌اند که می‌توان به RIBASIM، WEAP، DYNAMO، STELLA، MODSIM و Vensim اشاره کرد. این نرم‌افزارها وجه اشتراک زیادی با

^۱- Stock

^۲-Flow

^۳- Connectors

^۴- Convertors

^۵- Delay Time

^۶- Nonlinear Function

^۷- Positive feedback loops

^۸- Negative feedback loops

هم دارند از آن جمله می‌توان به توابع در دسترس و تنوع در نمایش گرافیکی اشاره کرد. در تحقیق حاضر، از نرم‌افزار Vensim استفاده شده است.

Vensim یک نرم‌افزار شبیه‌سازی سامانه‌های پویا و محصول مؤسسه Ventana Systems است که در سال ۱۹۸۸ منتشر شد. این مدل قادر به مجسم‌کردن، پردازش، شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی مدل‌های مربوط به سامانه‌های پویا است و از کامل‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای ایجاد، تجزیه و تحلیل، طبقه‌بندی و شبیه‌سازی مدل‌های مفهومی است که می‌تواند عواقب تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را برای هر یک از متغیرها مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهد. هدف این نرم‌افزار کمک به یافتن راه‌حل بهینه در موقعیت‌های مختلف است که به تجزیه و تحلیل نیاز دارند. این نرم‌افزار دارای یک محیط مدل‌سازی گرافیکی شیء‌گرا است. در این نرم‌افزار، نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که با روش اولر یا رانگ-کوتا با قابلیت انتخاب توسط کاربر حل می‌شوند، ساخته می‌شود. درواقع این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیلی موجود در سامانه به روش تفاضل محدود رفتار سامانه را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که پس از اجرای مدل، رفتار تک‌تک متغیرهای موجود از طریق جداول و نمودارها قابل ملاحظه خواهد بود. روش مدل‌سازی در این نرم‌افزار به صورت پیشرفت از کلیات به جزئیات است، بطوریکه به‌صورت تدریجی توابع و اجزای متصل شده بیشتر می‌شود تا یک مدل کامل شده برای اجرا آماده شود (پایمزد، ۱۳۸۸).

از قابلیت‌های نرم‌افزار Vensim می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مدل‌سازی براساس روابط بازخورد؛ مدل‌سازی حلقه‌های علت و معلولی؛ مدل‌سازی توابع پویا؛ امکان مشارکت کاربران سطوح مختلف در توسعه مدل؛ سادگی و سرعت قابل توجه در تعریف سامانه؛ ارتباط با سایر نرم‌افزارها و Excel؛ عدم محدودیت در تعداد متغیرهای مسئله؛ آنالیز حساسیت؛ رویکرد منحصربه‌فرد برای نمایش تغییرات خروجی‌ها؛ نسخه رایگان Vensim PLE.

۶- مفاهیم نظری و اساسی در پویایی سامانه

مفاهیم نظری پویایی سامانه براساس اصل تفکر سامانه‌ای است که دنیا را متشکل از کل‌هایی به نام سامانه می‌داند. خواص سامانه از جمع خواص اجزا آن به دست نمی‌آید، بلکه حاصل مطالعه اجزا و روابط آن‌هاست، درواقع سامانه برابر با جمع اجزای خود نیست و باید به‌عنوان یک کل مدنظر قرار گیرد (Sterman, ۲۰۰۰). چند اصطلاح موجود در سامانه پویا عبارت‌اند از:

بازخورد: فرایندی است که طی آن، یک متغیر در یک سلسله ارتباطات علت‌ومعلولی بر متغیرهای دیگر اثر بگذارد و درنهایت با تأثیر بر خود منجر به افزایش و کاهش خود شود. در همین راستا دو نوع بازخورد مثبت و منفی وجود دارد. بازخورد مثبت (+): متغیر اولیه با کاهش یا افزایش در متغیر دیگری درنهایت منجر به کاهش یا افزایش در خود شود. بازخورد منفی (-): متغیر اولیه با کاهش یا افزایش در متغیر دیگر، درنهایت منجر به افزایش یا کاهش در خود شود.

– نمودار علت‌ومعلولی: مجموعه بازخوردهای موجود در سامانه در قالب یک نمودار کلی را گویند (قبادی، ۱۳۸۵).

– روابط حلقوی: ارتباط میان اجزای سامانه، خطی نیست، بلکه به‌صورت حلقه‌های علت‌ومعلولی است. دو نوع حلقه تقویت و تعدیل وجود دارد.

۷- مراحل اجرای مدل پویایی سامانه

به‌منظور اجرای مدل پویایی سامانه در مدیریت جامع حوزه آبخیز باید مراحل زیر انجام شود:

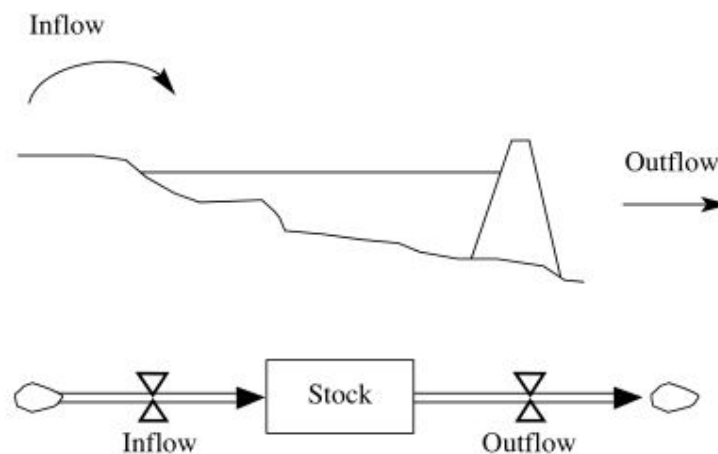
معرفی و دلیل انتخاب حوضه مورد مطالعه، روش‌های برآورد کمی چهار سامانه مورد استفاده برای مدیریت جامع آبخیز شامل فیزیکی، اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی، چگونگی ارتباط بین زیرسامانه‌ها، تهیه مدل مفهومی مدیریت جامع آبخیز، رسم نمودارهای علت‌ومعلولی، ترسیم حلقه‌های بازخوردی، رسم نمودارهای مرجع، تعریف زیرسامانه‌ها و ارتباط اجزای زیرسامانه‌ها، ترسیم نمودار ذخیره و جریان، اجرای مدل، آزمون‌های صحت سنجی مدل شامل آزمون شرایط حدی و آزمون‌های رفتار (عملکرد)، قواعد

..... مدل پویایی سیستم و کاربرد آن در مدیریت حوزه‌های آبخیز/ ۱۰

سناریوسازی، چگونگی ارزیابی مدل ساخته‌شده، آزمودن سناریوها با استفاده از مدل پویایی سامانه، استفاده از نظرات مردم برای توسعه و به‌ترکردن مدل، و اخذ بازخوردهای ذی‌نفعان از مدل ساخته‌شده با رویکرد پویایی سامانه.

۷-۱- ریاضیات حاکم بر مسأله پویایی سامانه

معادلات حاکم اولیه به‌صورت دو معادله پیوستگی و معادله تغییرات و نرخ‌ها قابل‌تعریف هستند. معادله پیوستگی به‌طورکلی براساس قانون بقای جرم استوار است. طبق قضیه انتقال رینولدز جمع تغییرات زمانی و مکانی حجم کنترل در نظر گرفته‌شده برابر است. نرم‌افزار Vensim از مدل ساده زیر برای محاسبه موجودی مخزن استفاده می‌کند (Sterman، ۲۰۰۰)



شکل ۱- نمودار شماتیک مدل جریان-ذخیره

معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی حاکم بر نمودار جریان-ذخیره به‌صورت زیر تعریف شده است.

$$\frac{d(\text{Stock})}{dt} = \text{Inflow}(t) - \text{Outflow}(t) \quad (۱)$$

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflow}(s) - \text{Outflow}(s)] ds + \text{Stock}(t_0) \quad (۲)$$

۷-۲- الگوهای سامانه‌ای

الگوهای سامانه‌ای خصوصیات متعارف را در سازمان‌ها توصیف می‌کنند. به‌عنوان ابزار تشخیص، بینشی را درون ساختارهای اساسی که از آن‌ها رفتار در طول زمان و حوادث محتاطانه پدید می‌آیند، فراهم می‌سازند. به‌عنوان ابزار عطف‌کننده به آینده، به مدیران در مورد عواقب غیرمنتظره در آینده هشدار می‌دهند. الگوهای سامانه، ابزارهای مؤثری برای به‌دست‌آوردن بینشی در داخل الگوهای رفتاری هستند که خودشان بازتاب ساختار اساسی سامانه مورد مطالعه هستند. این الگوها ابزار مؤثری برای شروع به پاسخ‌گویی به این سؤال هستند که، "چرا ما شاهد مشکلات مشابه در طول زمان هستیم؟". الگوهای سامانه همچنین با نگاه به آینده برای طرح‌پردازی مفید هستند. این الگوها می‌توانند برای آزمایش این که آیا سیاست‌ها و ساختارهای مفروض ممکن است ساختار سازمان را طوری که منجر به ایجاد رفتار الگوی سامانه شود، تغییر دهد، استفاده می‌شوند. اگر مدیران به این مسئله پی برند، می‌توانند قبل از این که تغییرات در سازمان جای بگیرند، چاره‌ای بیندیشند (Baron و همکاران، ۲۰۰۲). معمولاً ده الگو به‌عنوان به وجود آورنده مجموعه‌ای از الگوهای رفتاری در سامانه‌ها شناخته شده است: محدودیت‌های رشد^۱، تعویض بار مسئولیت^۲، اهداف در حال فرسایش^۳، صعود^۴، موفقیت برای موفق^۵، تراژدی منابع مشترک^۶، راه‌حلی که شکست می‌خورند^۷، رشد و شکست در سرمایه‌گذاری^۸، مخالفان تصادفی^۹ و اصل جاذبیت^{۱۰} (Baron و همکاران، ۲۰۰۲).

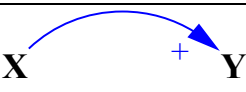
۷-۳- نمودارهای علی و معلولی

نمودارهای علت و معلول، ابزاری توانمند (نسبت به جداول و فلوچارت‌ها) برای نمایش بازخورد ساختار و روابط عوامل اثرگذار بر سامانه هستند. برای درک بهتر ساختار و بروز رفتار سامانه از نمودارهای بازخورد

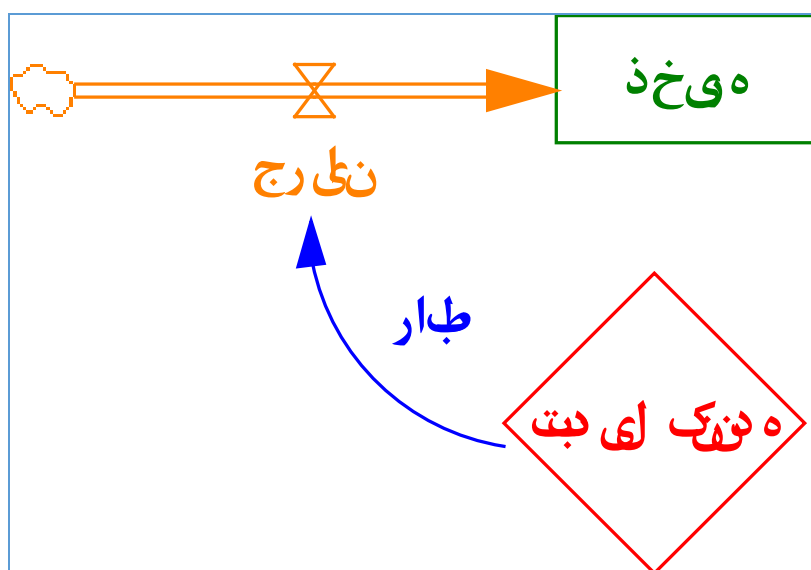
-
- 1 - Limits to Growth
 - 2 - Shifting the Burden
 - 3 - Eroding Goals
 - 4 - Escalation
 - 5 - Success to the Successful
 - 6- Tragedy of the Commons
 - 7- Fixes that Fail
 - 8 - Growth and Under investment
 - 9 - Accidental Adversaries
 - 10 - Attractiveness Principle

علت و معلولی^۱ استفاده شد. در واقع پایش صحیح رفتار سامانه‌ها با در نظر داشتن تعامل بین اجزا و تأثیرات متقابل از طریق روابط علت و معلولی و کنترل آن‌ها صورت می‌گیرد (Smith و Ackere، ۲۰۰۲). نمودارهای بازخورد از لحاظ اثرگذاری عوامل به دو دسته مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. عناصر اساسی این حلقه‌ها عبارت‌اند از متغیرها (عوامل) و فلش‌ها (روابط) که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ابزارها و نمادها در نمودارهای علت و معلول

رابطه ریاضی حاکم	توضیح	نمادها
$\frac{\partial Y}{\partial X} > 0$ $Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0}$	اگر X افزایش (کاهش) یابد Y نیز افزایش (کاهش) می‌یابد. اگر Y یک منبع ذخیره باشد آنگاه X بر آن اضافه خواهد شد.	
$\frac{\partial Y}{\partial X} < 0$ $Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0}$	اگر X افزایش (کاهش) یابد Y نیز کاهش (افزایش) می‌یابد. اگر Y یک منبع ذخیره باشد آنگاه X از آن کم خواهد شد.	

هنر مدل‌سازی به روش پویایی سامانه‌ها پوشش و نمایش فرآیند بازخورد است که همراه با ساختار ذخیره و جریان، تأخیر زمانی و توابع غیرخطی، دینامیک سامانه را تعریف می‌کند.



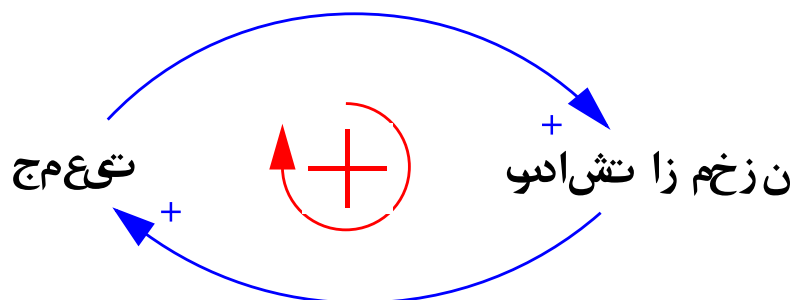
شکل ۲- نمودار ارتباط مؤلفه‌های مطرح در نمودار جریان

۷-۴- حلقه‌های بازخوردی

وقتی مجموعه‌ای از متغیرها در یک مسیر متصل بسته به یکدیگر وصل می‌شوند، یک حلقه‌ی علی را شکل می‌دهند. همه دینامیک‌ها از دو نوع حلقه بازخوردی مثبت (خود تقویت‌کننده) و منفی (خود اصلاح‌کننده) به وجود می‌آید. تأثیری که متغیر روی دیگر عوامل سامانه می‌گذارد دوباره آثار این اثرگذاری به خودش برمی‌شود و هدف تأثیرگذاری و تأثیرپذیری روی یک متغیر است (Stermen، ۲۰۰۰).

بازخورد مثبت^۱

حلقه‌های بازخورد مثبت، دایره‌ای است که اگر یک عامل در آن در یک جهت تغییر داده شود، دایره، تغییرات را در آن جهت تقویت می‌کند. درواقع افزایش (کاهش) در یک متغیر بعد از یک تأخیر (فعل) انفعالات در سامانه باعث افزایش (کاهش) همان متغیر می‌شود.

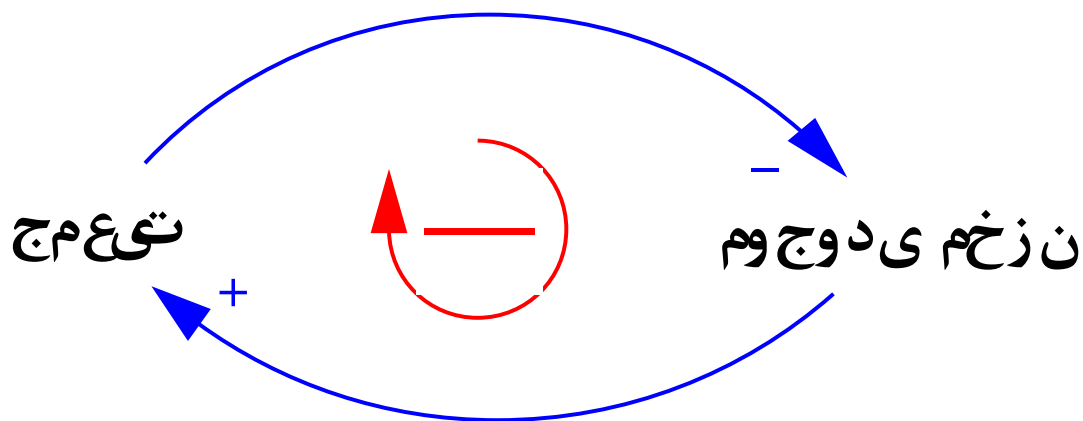


شکل ۳- نمودار نشان‌دهنده حلقه بازخوردی مثبت

بازخورد منفی^۲

حلقه‌های بازخورد منفی، دایره‌ای است که اگر یک عامل در آن در یک جهت تغییر داده شود، دایره، با تغییرات آن عامل در آن جهت مخالفت می‌کند. درواقع افزایش (کاهش) در یک متغیر بعد از یک تأخیر (فعل) انفعالات در سامانه باعث کاهش (افزایش) همان متغیر می‌شود. حلقه منفی هدف را جستجو می‌کند. این حلقه با ساختار جستجوگر خود توازن و پایداری در سامانه را سبب می‌شود.

^۱ - Positive Feedback
^۲ - Negative feedback

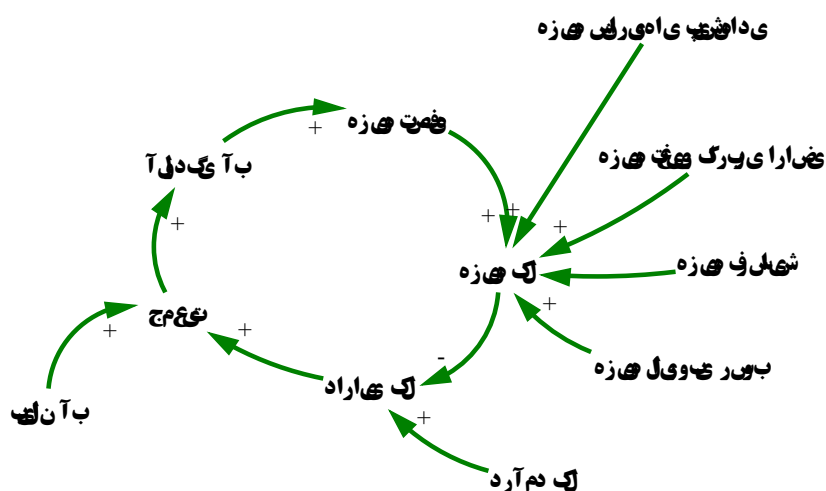


شکل ۴- نمودار نشان‌دهنده حلقه بازخوردی منفی

نمونه‌هایی از حلقه‌های بازخوردی

جمعیت - اقتصاد

در حلقه جمعیت-اقتصاد همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، عوامل مؤثر بر تغییرات جمعیت مرتبط با اقتصاد است. با رشد جمعیت، تقاضای آب شرب نیز بیشتر شده و به تبع آن آب بیشتری آلوده می‌شود و در نتیجه هزینه بیشتری برای تصفیه آن لازم است که این هزینه باعث کاهش دارایی‌های به دست آمده از حوضه می‌شوند و نتیجه این فعل‌وانفعالات بر روی رشد جمعیت تأثیر گذاشته و باعث کم شدن رشد جمعیت می‌شود. این حلقه، به نظر می‌رسد از الگوی "محدودیت‌های رشد" تبعیت دارد.

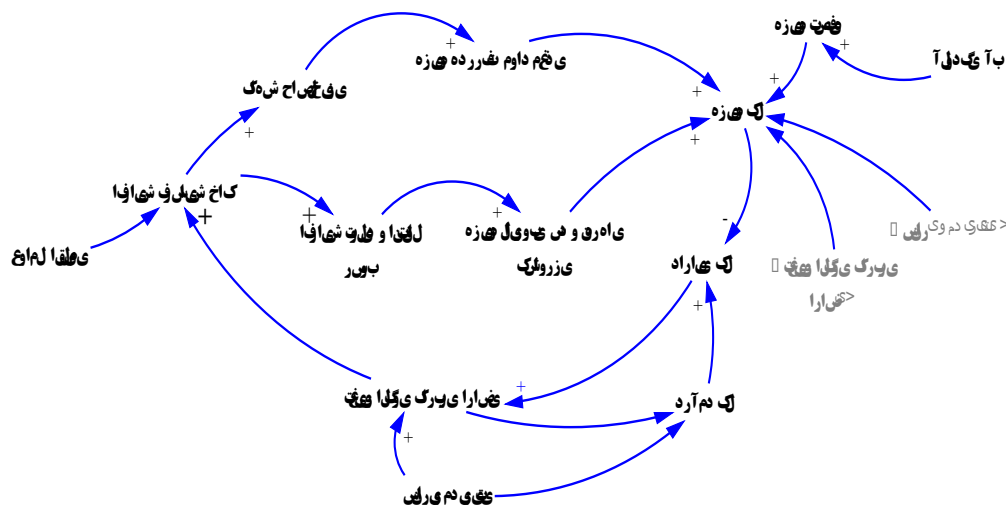


شکل ۵- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- جمعیت

در این حلقه عوامل مؤثر برافزایش و کاهش جمعیت در ارتباط با بیلان آب در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶). در این مدل جمعیت اثر منفی بر روی منابع آب و به تبع آن بر روی بیلان آب دارد. اما برعکس آن بیلان آب اثر مثبتی بر روی جمعیت دارد. یعنی هرچه منابع آب زیاد شوند، جمعیت هم به تبع آن زیاد می‌شود. در یک حلقه دیگر، جمعیت بر روی منابع آب زیرزمینی اثر منفی دارد. افزایش منابع آب زیرزمینی باعث افزایش بیلان آب شده و به تبع آن باعث افزایش جمعیت می‌شود. اما واقعیت‌هایی که در حوضه مورد بررسی وجود دارد، نشان از منفی شدن بیلان آب به خاطر استفاده رقابتی و چندجانبه (شرب، صنعت و کشاورزی) از آب در حوضه حبله‌رود شده است. این حلقه از الگوی "تراژدی منابع مشترک" تبعیت می‌کند.

شکل ۶- توالی و اجزای حلقه بازخوردی جمعیت- بیلان آب

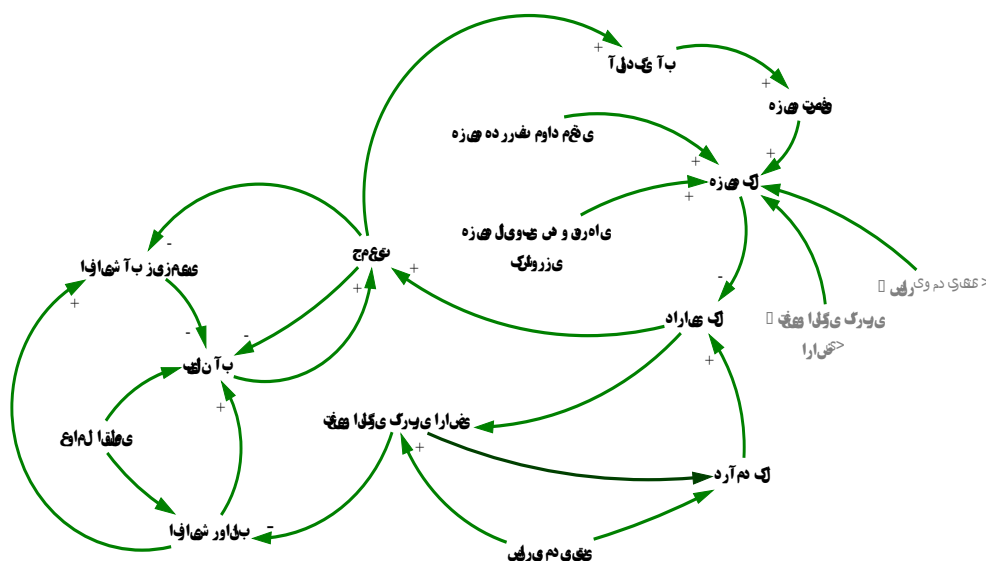
در این حلقه، تغییر نامناسب الگوی کاربری اراضی و تخریب منابع طبیعی باعث افزایش رواناب و افزایش رواناب باعث کاهش کیفیت آب می‌شود. کاهش کیفیت آب باعث افزایش هزینه کل، از نظر افزایش هزینه هدر رفت مواد مغذی خاک می‌شود. افزایش هزینه کل، کاهش دارایی کل را در پی دارد. در نهایت هرچه دارایی کل کمتر شود باعث افزایش تغییر کاربری به سمت تخریب بیشتر منابع طبیعی می‌شود. اعمال سناریوهای مدیریتی و بهبود الگوی کاربری اراضی می‌تواند این اثرات مخرب را کاهش دهد (شکل ۷). این



شکل ۸- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- فرسایش و رسوب

اقتصاد-بیان آب

در این حلقه تغییر الگوی کاربری اراضی به ترتیب باعث تغییر در منابع آب سطحی و زیرزمینی، برهم خوردن تعادل بیان آب، تغییر در جمعیت و تغییر در اقتصاد حوضه می‌شود و اقتصاد حوضه هم به تبع آن بر روی تغییر کاربری اراضی اثر دارد. اعمال سناریوهای مدیریتی در برای اصلاح الگوی کاربری اراضی سبب تغییرات مثبت می‌شود. این حلقه از الگوی "تراژدی منابع مشترک" تبعیت می‌کند.



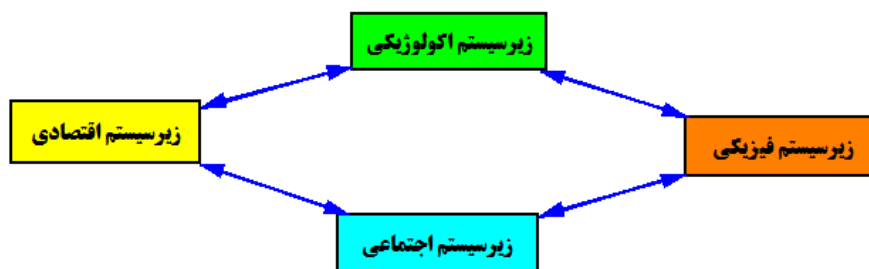
شکل ۹- توالی و اجزای حلقه بازخوردی اقتصاد- بیان آب

۷-۵- رسم نمودارهای مرجع

نمودارهای مرجع به منظور شناسایی و نمایش مشکلات حوزه آبخیز ترسیم می‌شوند و هم‌هدف آن‌ها نشان دادن وضعیت موجود حوزه آبخیز از نظر متغیرهای موجود است.

۷-۶- تعریف زیرسامانه‌ها

چهار زیرسامانه فیزیکی، اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی به‌عنوان ارکان مدیریت جامع آبخیز می‌توانند انتخاب شوند. این چهار سامانه دارای اثرات متقابلی هستند.



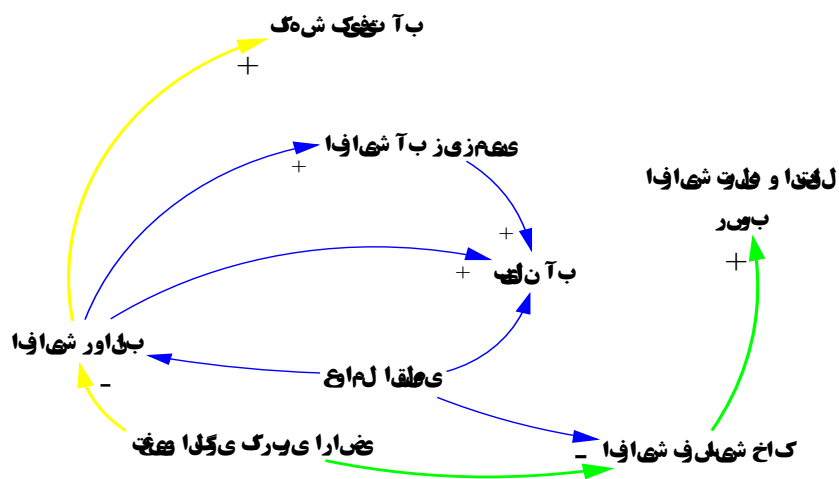
شکل ۱۰- نمونه‌ای از نمودار نمایش زیرسامانه‌های مدیریت جامع منابع آب و خاک و ارتباط آن‌ها

۷-۷- تعریف ارتباط اجزای زیرسامانه‌ها

بعد از آشکار شدن زیرسامانه‌ها، به تعریف ارتباط اجزای زیرسامانه‌ها اقدام می‌شود که در زیر به جزییات این اجزا اشاره می‌شود.

زیرسامانه فیزیکی

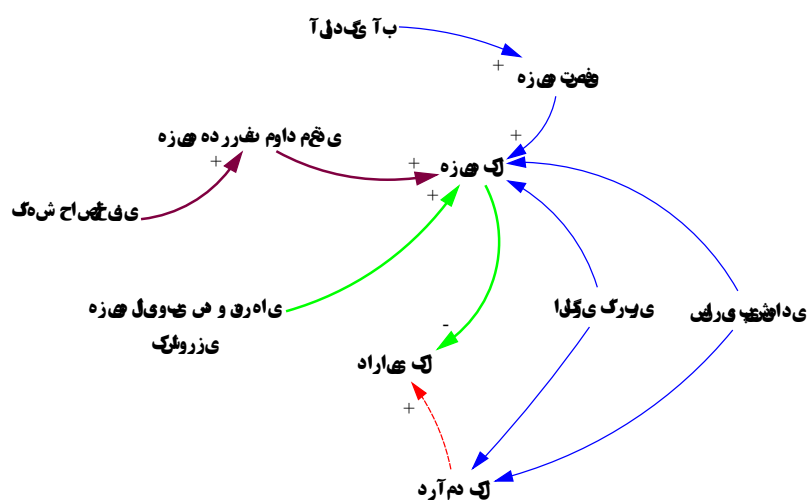
از نظر فیزیکی روابط علی و معلولی بین اجزا را می‌توان به‌صورت زیر نوشت که بهبود الگوی کاربری اراضی که در اثر اجرای فعالیت‌های مدیریتی حاصل می‌شود، بر روی افزایش رواناب تأثیر کاهشی دارد. افزایش رواناب به‌نوبه خود تأثیر تشدید بر روی کاهش کیفیت دارد. افزایش رواناب باعث بهبود بیلان آب می‌شود. بهبود کاربری اراضی باعث بهبود سطح آب زیرزمینی نیز می‌شود. همچنین افزایش رواناب باعث افزایش فرسایش خاک می‌شود. افزایش فرسایش خاک نیز اثر تشدید بر افزایش تولید و انتقال رسوب می‌شود که به نوبه خود اثر تشدید بر کاهش کیفیت آب دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی‌ومعلولی بین اجزای زیرسامانه فیزیکی

زیرسامانه اقتصادی

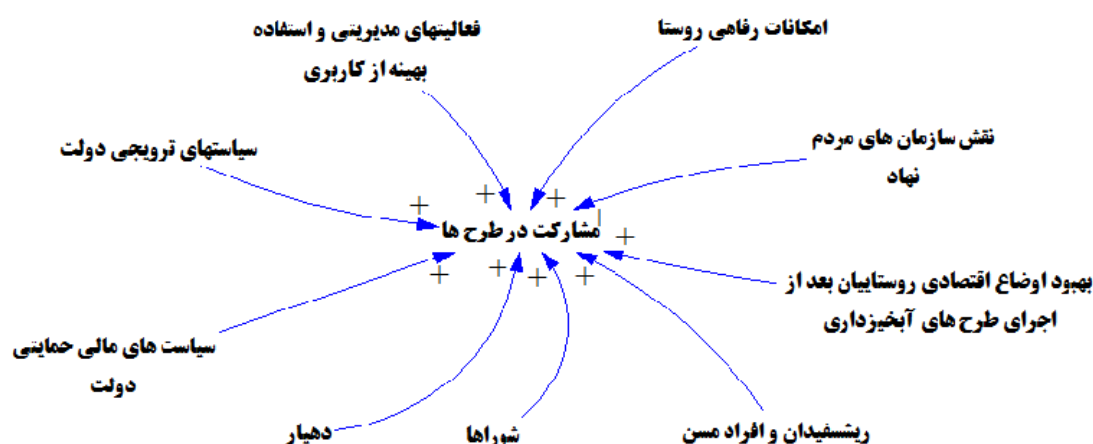
زیرسامانه اقتصادی از دو جزء کلی هزینه کل و درآمد کل تشکیل می‌شود که هزینه کل اثر منفی بر روی درآمد کل دارد. هزینه‌های فرسایش خاک، تولید رسوب، آلودگی آب و همچنین هزینه اجرا و نگهداری کاربری‌ها و فعالیت‌های موجود در حوضه و فعالیت‌های مدیریتی اثر تشدید بر روی هزینه کل دارند. درآمد حاصل از کاربری‌ها و فعالیت‌های موجود و درآمد حاصل از اجرای فعالیت‌های مدیریتی اثرات تشدید بر درآمد کل دارند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی‌ومعلولی بین اجزای زیرسامانه فیزیکی

زیرسامانه اجتماعی

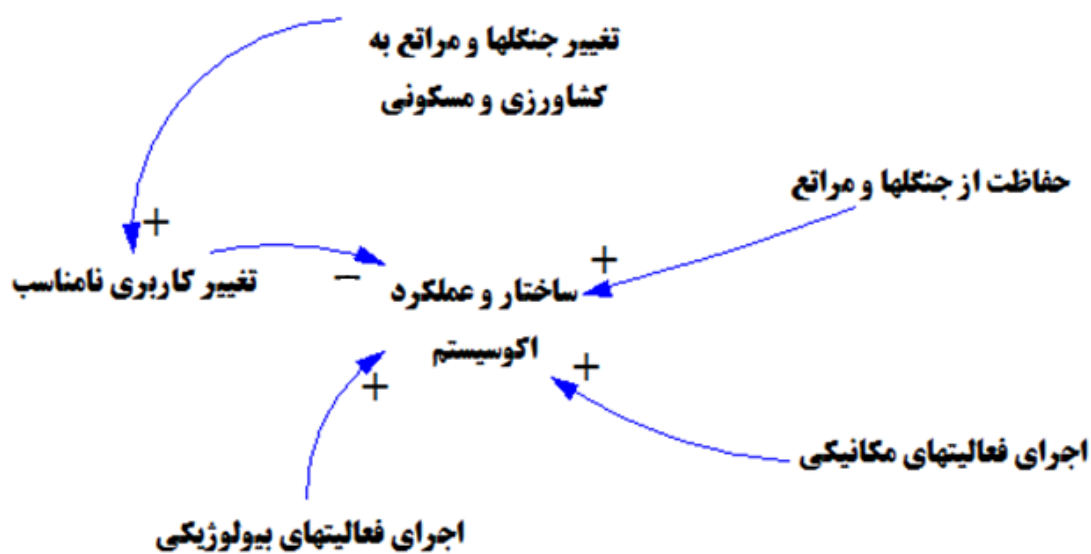
در زیرسامانه اجتماعی، پذیرش سناریوها اثر مثبتی بر سطح مشارکت در طرح‌ها دارند و برعکس. عوامل امکانات و تسهیلات دولت، نقش دولت و سیاست‌گذاری، فعال کردن افراد تأثیرگذار و نقش NGO ها اثرات مثبت بر وضعیت مشارکت مردم در طرح‌ها دارند (شکل ۱۳). این اطلاعات از طریق پرسشنامه و مصاحبه حضوری برداشت می‌شوند.



شکل ۱۳- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی و معلولی بین اجزای زیرسامانه اجتماعی

زیرسامانه اکولوژیکی

در زیرسامانه اکولوژیکی ساختار و عملکرد اکولوژیکی سیمای سرزمین بررسی می‌شود که اجرای فعالیت‌های مدیریتی و حفاظت از مراتع، حیات وحش و جنگل‌ها اثر مثبت بر آن‌ها دارند. تغییر کاربری نامناسب اثر منفی بر روی این عوامل دارند (شکل ۱۴). برای بررسی ساختار اکولوژیکی سیمای سرزمین در حوضه حبله‌رود از شاخص ترکیبی استفاده می‌شود که شامل دو شاخص جوامع گیاهی خشکی زی (شاخص وزنی مساحت (WLCAI) و جوامع گیاهی حاشیه رودخانه (شاخص نسبت جوامع حاشیه رودخانه (RPI)) می‌شود (Sadoddin, ۲۰۰۵). به منظور بررسی عملکرد اکولوژی، از دو شاخص تراکم گیاهان چندساله و شاخص گیرش منابع (RCI) می‌توان استفاده کرد.

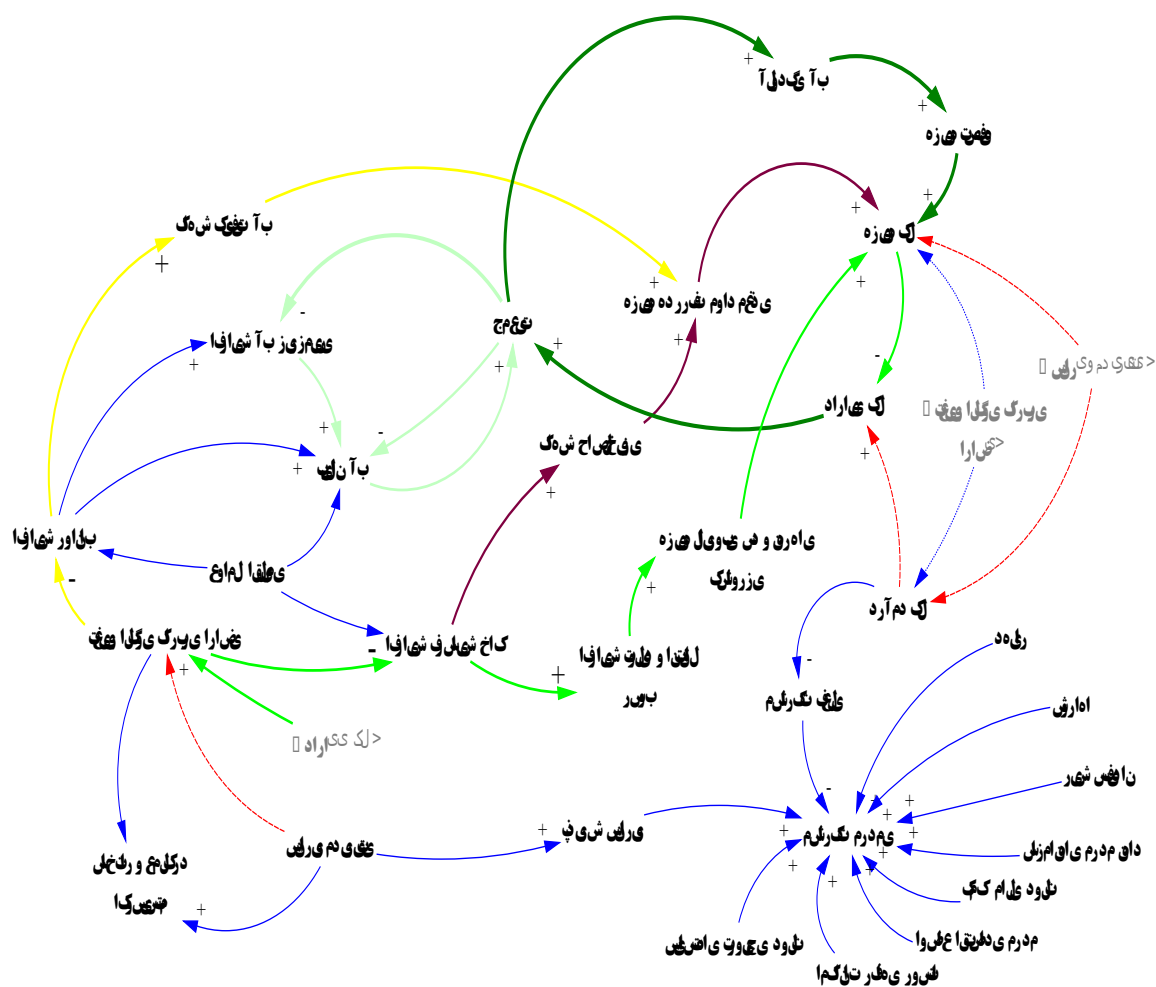


شکل ۱۴- نمونه‌ای از نمودار نمایش علی‌ومعلولی بین اجزای زیرسامانه اکولوژیکی

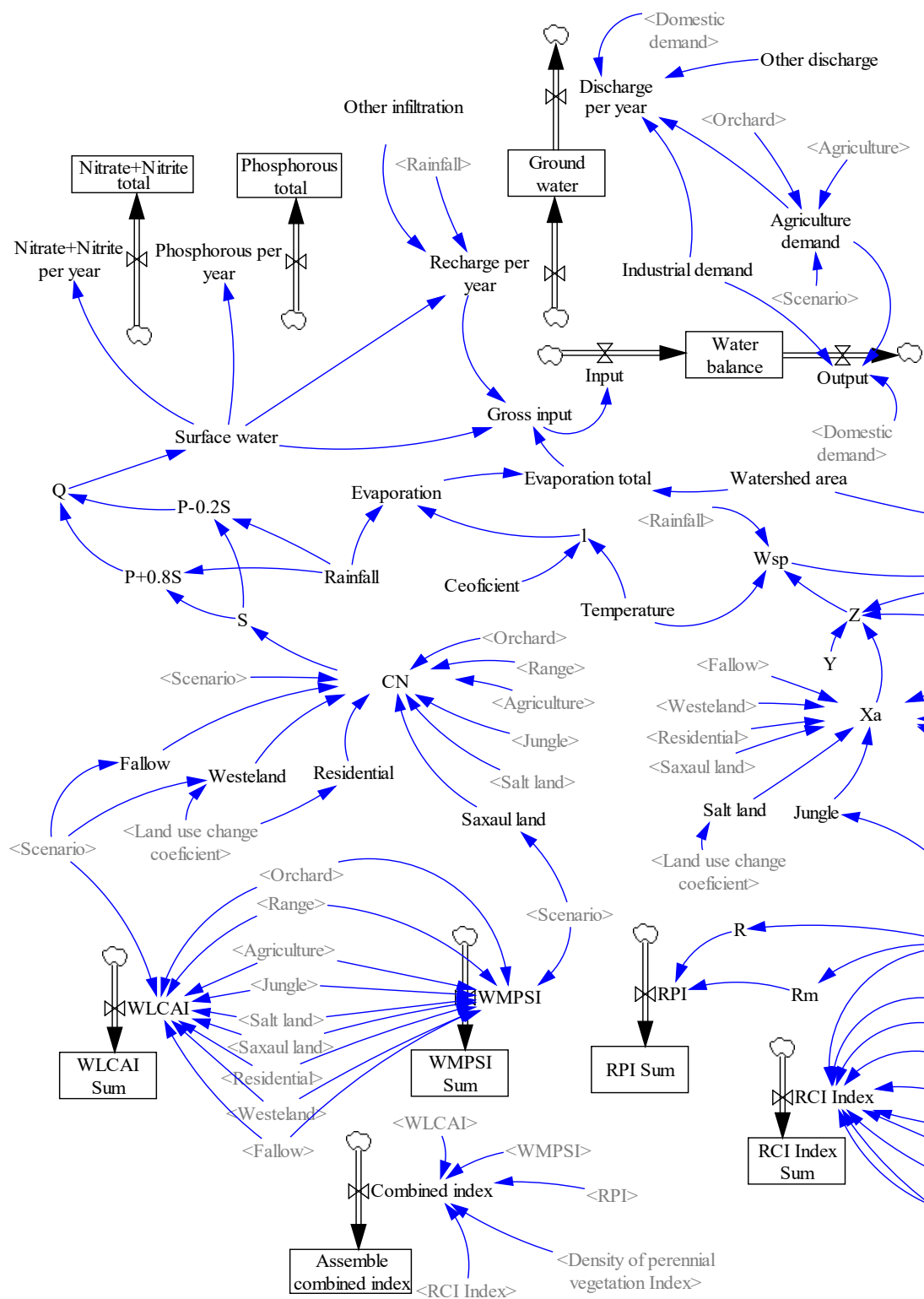
۷-۸- تهیه مدل مفهومی، نمودار ذخیره و جریان و اجرای مدل

پس از تعریف حلقه‌های بازخوردی مدل مفهومی تهیه می‌شود و به‌صورت نمودارهای ذخیره جریان کمی

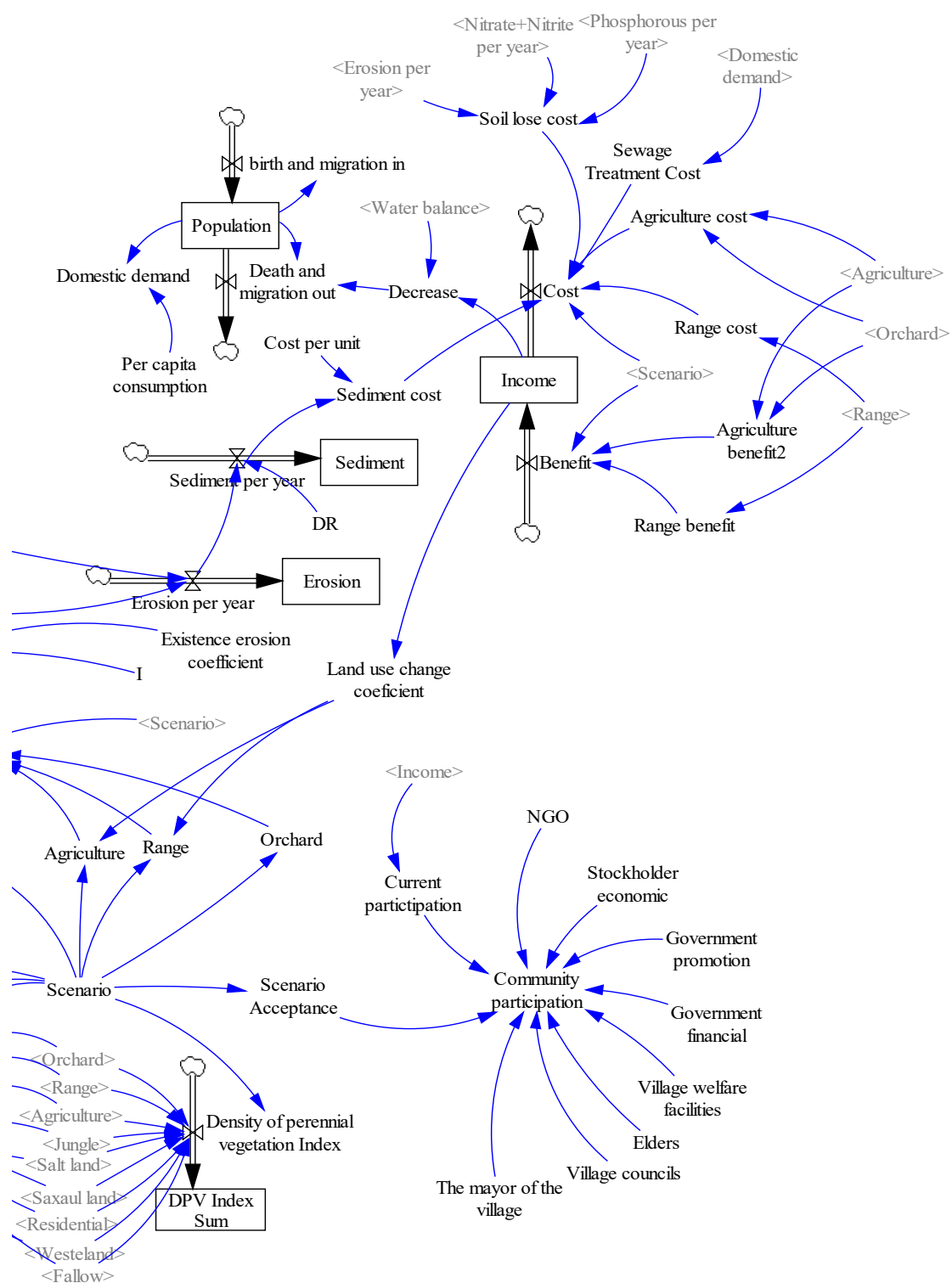
می‌شود. در مرحله بعد مدل تهیه‌شده با رویکرد پویایی سامانه اجرا می‌شود. و نتایج آن بررسی می‌شود.



شکل ۱۵- نمونه‌ای از نمودار علت معلول حاکم بر کل مدل



شکل ۱۶- نمونه‌ای از نمودار ذخیره - جریان مدیریت جامع آب‌خیز (قسمت اول)



شکل ۱۷- نمونه‌ای از نمودار ذخیره - جریان مدیریت جامع آبخیز (قسمت دوم)

۷-۹- آزمون‌های صحت‌سنجی مدل

برای بررسی صحت سنجی مدل تهیه‌شده از آزمون‌های شرایط حدی و آزمون عملکرد مدل استفاده شد. آزمون شرایط حدی درواقع عملکرد منطقی مدل را در شرایط حدی نشان می‌دهد. در این تحقیق، برای بررسی عملکرد مدل از آزمون‌های R^2 و ناش - ساتکلیف استفاده شد (Stermen, ۲۰۰۰).

آزمون شرایط حدی

آزمون شرایط حدی با اعمال شرایط حدی و بررسی نتایج حاصل از مدل انجام می‌شود. انجام این ساختار علی و روابط تعریف‌شده بین متغیرهای مدل را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. آزمون شرایط حدی، بر مقاوم بودن مدل در شرایط حدی تأکید دارد، به این معنا که تحت هر شرایطی با تغییر یافتن سیاست‌ها و یا مقادیر ورودی‌ها، مدل باید رفتار موردانتظار را از خود نشان دهد. به‌عنوان مثال وقتی که مقادیر اولیه متغیرهای مدل یا نتایج را به میزان زیاد افزایش یا کاهش دهیم، امتیاز معیارها و مدل در همان میزان واقعی خود تغییر کند. در این آزمون تغییر در مقادیر نیازهای کمینه و بیشینه به مدل اعمال می‌شود و رفتار تک‌تک متغیرهای مربوط مورد بررسی قرار می‌گیرد (Ahmed و Simonovic, ۲۰۰۲).

آزمون‌های رفتار (عملکرد) مدل

این آزمون‌ها به عملکرد خروجی از مدل بستگی داشته و کمتر به ساختار مدل و تکنیکی بودن آن برمی‌گردند. زمانی که رفتار مدل با رفتار سامانه واقعی همخوانی نداشته باشد، باید ساختار مدل، روابط بین اجزاء، فرمول‌های استفاده‌شده، پارامترها، فاکتورها و توابع را تغییر داد. انجام این آزمون توانایی مدل را در ایجاد نتایج صحیح و نیز قابلیت اطمینان آن را نشان می‌دهد (Stermen, ۲۰۰۰). از معیارهای ضریب تعیین R^2 و ناش ساتکلیف استفاده شده است. ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دودسته داده است. این شاخص بین صفر و یک متغیر است (پایمزد، ۱۳۸۸).

$$R^2 = \frac{[\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})]^2}{\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})^2 \sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2}$$

معیار نش-ساتکلیف از رابطه زیر به دست می‌آید که دامنه تغییرات آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ را شامل می‌شود. هر چه این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد، صحت سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۰۵ حاکی از عملکرد قابل قبول مدل است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_{m,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad ۴$$

در روابط بالا $y_{m,i}$ مقدار داده محاسباتی و $y_{s,i}$ نمایانگر داده مشاهداتی است. $\bar{y}_{m,i}$ و $\bar{y}_{s,i}$ مقدار میانگین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی هستند (McCuen و همکاران، ۲۰۰۶).

۸- بحث و نتیجه‌گیری

دانشمندان، مدیران، تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان در مدیریت جامع منابع آب و خاک همه با این چالش مواجه می‌شوند که نتایج داده‌های علمی، باورهای پیشین (دانش بومی) و شبیه‌سازی مدل‌ها هر کدام چه سهمی در تصمیم‌گیری داشته باشند. از این‌رو نیاز است با استفاده از ابزاری اجزای آبخیز فرمول‌بندی شده و پیامدهای تصمیم‌گیری در آن کشف شود. برای رسیدن به این مهم، رویکرد مشارکتی پویایی سامانه به‌عنوان ابزاری انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. آبخیز یک سامانه پیچیده و پویا است و نیازمند یک مدل‌سازی پویا و با درنظر گرفتن زمان است. مدل پویایی سامانه می‌تواند پیچیدگی‌های سامانه آبخیز را در طی زمان مشخص و مدل‌سازی کند.

از مزایایی مدل پویایی سامانه این است که به‌خوبی می‌تواند به درک سامانه‌ای کاربران و تصمیم‌گیران کمک کند و در یادگیری اجتماعی ذی‌نفعان مؤثر است. این مدل رفتار زمانی پدیده‌ها را می‌تواند پیش‌بینی کند و در نمایش و حل سامانه‌های پیچیده و مبنی بر زمان مانند حوزه آبخیز کمک کند. سناریو محور است و قادر است که اثر سناریوهای مدیریتی مختلفی را بر روی مدل مشخص کند. از معایب این مدل پیچیدگی زیاد آن است که باعث افزایش عدم قطعیت نتایج آن می‌شود و همچنین این مدل مکان محور نیست و این مدل لامپت یا غیرمکانی است.

در رویکرد جامع آبخیز از فرآیندهای ارزیابی و تصمیم‌گیری که براساس ترکیبی از اطلاعات بیوفیزیکی، اقتصادی و اجتماعی و سیاسی به همراه دانش بومی هستند، استفاده می‌شود. اگر مدل‌سازی مدیریت آبخیز به این مسائل توجه نکند، نمی‌تواند از جامعیت برخوردار باشد. به این منظور، برای ارزیابی این مهم استفاده از ذی‌نفعان با ترکیبی از مدیران و کارشناسان، تشکلات مردمی و نمایندگان ذی‌نفعان مدنظر قرار می‌گیرد.

اگر در مدل‌سازی مدیریت آبخیز جامعیت مدنظر باشد، باید ویژگی‌های زیر رعایت شوند: ۱- لحاظ نیروهای پیشران و اثرگذار در حوضه موردبررسی ۲- توجه به بخش‌های مختلف حوضه (بالادست و پایین‌دست) ۳- توجه به مشکلات مختلف (نگاه تک‌مشکله نداشته باشد) ۴- بتواند گروه‌های ذی‌نفعان مختلف را درگیر کند ۵- از دانش زمینه‌های مختلف (اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و...) بتواند استفاده کند. ۶- از داده‌ها و مدل‌های مختلف استفاده کند. ۷- مدل بتواند به ازای واحدهای بزرگ کاری و گروه‌های مشارکتی اجرا شود (Kelly و همکاران، ۲۰۱۳). برای بررسی جامعیت مدل و همچنین ارزیابی افزایش سطح ادراک ذی‌نفعان از روابط علی- معلولی و بازخوردهای مدل پویایی سامانه می‌توان به تکمیل پرسشنامه و تجزیه و تحلیل آن‌ها اقدام شود. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مدیریت حوزه آبخیز، به‌منظور جامعیت در مدل باید مدنظر قرار گیرد، توجه به بخش‌های مختلف حوضه از جمله بالادست و پایین‌دست حوضه مورد مطالعه است (Kelly و همکاران، ۲۰۱۳). توسعه تک‌بخشی و توجه به لکه‌ای از حوضه، مغایر با مفاهیم توسعه پایدار است و منجر به مدیریت پایدار منابع آب و خاک نمی‌شود. Stave (۲۰۱۰) با بررسی چهار مطالعه موردی در زمینه رویکرد پویایی سامانه مشارکتی و Kelly و همکاران (۲۰۱۳) با ارزیابی مدل‌های موجود در مدل‌سازی جامع آبخیزداری به نقش توسعه مدل مشارکتی با رویکرد پویایی سامانه در افزایش ادراک ذی‌نفعان از روابط علی- معلولی و بازخوردها و به‌طور کلی روابط حاکم بر سامانه اظهار داشته‌اند.

نتیجه مدل‌سازی سامانه‌های پویا، توصیف سامانه و فهم آن است. این کار به واسطه مدل‌های کمی و کیفی انجام می‌شود. همچنین از طریق شبیه‌سازی می‌توان سیاست‌هایی که باید بر سامانه اعمال شود، را انتخاب کرد. سامانه‌های دینامیکی بر روی مطالعه ارتباط علی بین عناصر متفاوت و در نهایت مطالعه رفتار کل سامانه

در طی زمان متمرکز شده است (Stermen, ۲۰۰۰). یک مدل جامع آبخیز با رویکرد پویایی سامانه مشارکتی می‌تواند سطح ادراک ذی‌نفعان را از بازخوردها، روابط حاکم بر سامانه و همچنین ارتباطات علی - معلولی عوامل با یکدیگر را بالا ببرد. برای نیل به این هدف، آموزش مردم با به‌کارگیری کارگاه‌های آموزشی و تعامل با ذی‌نفعان مورد تأکید قرار دارد. همان‌گونه که از تحقیقات Ahmed و Simonovic (۲۰۰۰)، Simonovic و Ahmed (۲۰۰۲)، Vanden (۲۰۰۴)، Stave (۲۰۰۸)، و Stave (۲۰۱۰) استنباط می‌شود، مدل‌سازی مشارکتی پویایی سامانه به یک چهارچوب قوی مشورتی - تحلیلی در مدیریت پایدار محیطی اشاره دارد که به‌ویژه برای تسهیل یادگیری مشارکتی درباره سامانه مفید است. همچنین این رویکرد شامل، هر نوع استفاده از مدل پویایی سامانه در آنالیز گروهی از ساختار یک مشکل است. نتایج حاصل از این مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب برای افزایش ادراک ذی‌نفعان از روابط حاکم بر سامانه، بازخوردها و روابط علی‌ومعلولی باشد، این مدل می‌تواند با مدیریت بسیاری از داده‌ها و اطلاعات و استفاده از مدل‌های مختلف به افزایش ادراک در شرایط پویا به ذی‌نفعان حوضه کمک کند.

برای جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این دستورالعمل می‌توان بیان داشت که با ارائه مدل مشارکتی پویایی سامانه‌ای می‌توان به مدیریت پایدار آبخیز نزدیک‌تر شد. مدل مشارکتی تهیه‌شده بر پایه پویایی سامانه می‌تواند در جستجوی دستیابی به یک رویکرد و مدل مشترک و مورد توافق بیشتر ذی‌نفعان برای افزایش ادراک ذی‌نفعان از روابط علی‌ومعلولی و بازخوردهای سامانه مفید باشد. روش پویایی سامانه امکان پیش‌بینی نتایج سناریوهای مختلف را برای مدیران و تصمیم‌گیران آبخیز در طی زمان فراهم می‌کند. مدل‌سازی مشارکتی مدیریت جامع آبخیز با رویکرد پویایی سامانه می‌تواند ذی‌نفعان را به صورت آگاهانه در فرآیند مدل‌سازی درگیر کند و در نهایت باعث افزایش ادراک آنها از روابط علی‌ومعلولی و بازخوردهای سامانه آبخیز شود.

منابع

- اسدی‌نیلوان، ا.، محسنی‌ساروی، م.، زاهدی، ق.، امیری، ع. و نظری‌سامانی، ع.ا. ۱۳۹۵. کاربرد روش IUCN در ارزیابی وضعیت پایداری حوزه آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان- زیدشت ۱). نشریه مرتع و آبخیزداری، دوره ۶۹، شماره ۳، صفحات ۵۴۳ تا ۵۵۹.
- اعلمی، م.، فرزین، س.، احمدی، م. و آقابالایی، ب. ۱۳۹۳. مدل‌سازی پویایی سامانه سد و آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب (مطالعه موردی: سد گلک). نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست. جلد ۴۴، ۱: ۱-۱۰.
- پایمزد، ش. ۱۳۸۸. تخصیص آب بین استانی در حوضه‌های مشترک با رویکرد دینامیک، مطالعه موردی: حوضه قزل‌اوزن. تز دکتری دانشگاه تربیت مدرس، ۲۰۶ ص.
- شیخ‌خوزانی، ز.، حسینی، خ.، و رحیمیان، م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سامانه. مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۸(۲۱): ۵۶-۶۶.
- قبادی، ش.، ۱۳۸۵. سامانه دینامیک (کاربرد از تفکر سامانه‌ای)، انتشارات سازمان مدیریت صنعتی، چاپ اول، ص ۱۲۸.
- گلیان، س.، ابریشمی، ا.، تجربی، م. ۱۳۸۴. تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سامانه. فصل‌نامه علمی پژوهشی آب و خاک و فاضلاب، ۷۰: ۸۰-۶۳.
- صالح‌پور جم، ا. و مصفایی، ج. ۱۴۰۲. مدیریت جامع آبخیز: پیوند رویکردهای مدیریتی آبخیز با مفاهیم سلامت و پایداری آبخیز. انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۷۵ صفحه.
- Ahmed, S., and Simonovic, S.P., 2000. System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. Journal of Computing in Civil Engineering, 14(3): 190-198.
- Baron, J.S., Poff, N.L., Angermeier, P.L. Dahm, C.N., Gleick, P.H., Jackson, R.B, Johnston, C.A., Richter, B.D. and Steinman, A.D. 2002. Meeting ecological and social needs for fresh water, Applied Ecology, 12(5): 1260-1274.

- Elmahdi, A., Malano, H., and Etchells, T. 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. *Environmentalist*, 27: 3–12.
- Fiorillo, F., Palestini, A., Polidori, P., and C. Socci. 2007. Modeling water policies with sustainability constraints: A dynamic accounting analysis. *Ecological Economics*, 63: 392-402.
- Jakeman, A. J., Letcher, R. A, Rojanasoonthon, S., and Cuddy, S. 2005. Integrating knowledge for river basin management. Australian Centre for International Agricultural Research. 223p. No. 118.
- Kelly, R.A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., Elsawah, S., Hamilton, S. H., Sakari K., Holger, R. M., Rizzoli, A.E., van Delden, H. and Voinov, A. A. 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software*, 47, 159-181.
- McCuen, R., Knight, Z., and Cutter, A. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597), 597-602.
- Mutekanga, F. 2012. Participatory policy development for integrated watershed management in Uganda's highlands. PhD Thesis University of Wageningen.
- Pohekar, S.D. and M. Ramachandran. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning. *Renew Sustain Energy*, 8(1): 365-38.
- Sadoddin, A., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. and New hamb, L.T.H., 2005. A Bayesian decision network approach for assessing the ecological impacts of salinity management, *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 69: 162-176.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J. and M.R. Tabatabaei. 2021. Management responses for Chehel-Chay watershed health improvement using the DPSIR framework. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(4): 797-811.
- Simonovic, S. P., Ahmad, S., 2000. System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. *Journal of computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, 190-199.
- Smith, P., Ackere, A. 2002. A note on the integration of system dynamics and economic models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26(1): 1-10.
- Stave, K. A. 2010. Participatory system dynamics modeling for sustainable environmental management: observations from four cases. *Sustainability*, 2: 2762-2784.

- Stave, K.A. 2008. Zero waste by 2030: A system dynamics simulation tool for stakeholder involvement in Los Angeles ‘solid waste planning initiative. In Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society, Athens, Greece, 20–24.
- Sterman, J. 2000. Business dynamics: systems thinking for a complex world, Irwin/McGraw-Hill, 1008 p.
- Vanden Belt, M., 2004. Mediated modeling: A system dynamics approach to environmental consensus building; Island Press: Washington, DC, USA.
- Winz, I., Brierley, G., and Trowsdale, S., 2009. The use of system dynamics simulation in water resources management. Water Resources Management, 23(7), 1301–1323.
- Witlox, F. 2005. Expert system in land-use planning: an overview. Journal Expert Systems with Applications, 29: 437-445.

Abstract

System dynamics models facilitate comprehensive and sustainable management of water and soil resources in watersheds by increasing the level of understanding of the watershed system. System dynamics integrates the theory, methods, and philosophy required to analyze the behavior of systems. System dynamics modeling refers to a set of numerical and conceptual methods used to understand the structure and behavior of complex systems. Comprehensive watershed management requires forward-looking decision-making with a holistic approach. System dynamics science is a management tool based on this approach. Management scenarios can be created from a combination of management options. In the field of system simulation, various models and software have been developed, including RIBASIM, WEAP, DYNAMO, STELLA, MODSIM, and Vensim. The steps in using a system dynamics model are as follows: first, the issues and problems of the watershed should be reviewed and listed. Then, a conceptual model of system dynamics should be prepared. Cause and effect diagrams should be drawn. Feedback loops should be identified. Reference diagrams should be drawn. Subsystems and the relationships between subsystem components should be defined. A storage and flow diagram should be drawn, and the model should be implemented. Model validation tests include boundary condition tests and model behavior (performance) tests. Finally, scenarios are designed for comprehensive watershed management. The system dynamics model is effective as one of the integrated approaches in comprehensive watershed management and is useful for increasing stakeholders' understanding of cause and effect relationships and system feedback. The system dynamics method, with its capabilities and simplicity, allows watershed decision makers to be involved in the modeling process and compare different scenarios. This approach allows users and watershed decision makers to spend more time conceptualizing the system and checking the accuracy of data and results, rather than getting involved in the complexities of system definition and simulations.

Keywords: Watershed, Management Scenarios, Comprehensive Management, Increasing Stakeholder Perception, System Dynamics

**Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of
Lorestan**

Title: System dynamics model and its application in watershed management

Authors: Ebrahim Karimi Sangchini, Seyed Hossein Arami, Iraj Vasekarami, Elham Davoudi

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Circulation: 10 Copies

Date of Publication: Summer 2025

This scientific work has been registered with the series number of **67704** at the date of **2025-07-28** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of
Lorestan

Technical Handbook:

System dynamics model and its application in watershed management

Authors:

Ebrahim Karimi Sangchini, Seyed Hossein Arami, Iraj Vasekarami,
Elham Davoudi

Series Number:

67704

2025



Ministry of Agriculture Jihad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Technical manual

System dynamics model and its application in watershed management

Authors:

Ebrahim Karimi Sangchini, Seyed Hossein Arami, Iraj Vasekarami, Elham Davoudi

Series Number: 67704

2025