دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

تعیین الگوی کشت بهینه در حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل‌سازی سیستمی

سیده فاطمه هاشمی[۱]، علی شاهنظری[۲]، محمود راینی[۳]، محمدرضا شهبازبگیان[۴] و یان فرانکلین آداموسکی[۵]

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسوول:Alipoh@yahoo.com)
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴- استادیار گروه آمایش سرزمین و برنامه‌ریز جغرافیایی دانشگاه تربیت مدرس
۵- دانشیار گروه مهندسی انرژی، دانشگاه مک‌گیل کانادا
تاریخ ارسال: ۹۸/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۳
صفحه: ۱۵۵ تا ۱۶۸

چکیده

از آنجا که در تخصیص بهینه منابع آب، حداکثرسازی درآمد، عمده‌ترین هدف مدل‌سازی است، پژوهش‌هایی که تاکنون در ارتباط با تخصیص منابع آب منتشر شده است، به مفاهیمی که مبتنی‌بر ساختار و روابط خطی مدل ذهنی است، معطوف بوده یا عدم تخصیص عادلانه آب را سبب می‌شود. همچنین بررسی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد آگاهی کمی نسبت به رفتار دینامیکی طولانی مدت حوضه‌های رودخانه وجود دارد. لذا در این مطالعه، به بررسی الگوی بهینه کشت بر اساس تخصیص منابع و مصارف در حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل SD در بازه زمانی ماهانه در طی سال‌های ۹۴-۱۳۴۲ با در نظرگرفتن نیاز شرب، صنعت، زیست‌محیطی و کشاورزی، پرداخته شده است. الگوی کشت به‌دست‌آمده مبنایی برای محاسبات میزان بهره‌وری مصرف آب در حوضه آبریز تجن می‌باشد. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد که اگرچه میزان حجم آب خروجی از مخزن وابسته به حجم تقاضا بوده، اما ضریب اصلاحی مخزن مستقل از ضریب اصلاحی نیاز کشاورزی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بخش اعظم نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی در منطقه تامین‌شده و مخازن در حوضه آبریز تجن برای تامین این نیازها موفق عمل کرده‌اند. اما کمبودهای قابل‌ملاحظه‌ای در بخش کشاورزی وجود دارد که با توجه به حجم اندک آب زیرزمینی در این حوضه، لزوم تغییر الگوی کشت، اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بررسی الگوی کشت بهینه نیز نشان داد که سیاه‌ریشه با بالاترین نسبت درآمد به هزینه، در تمامی مناطق بیشترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده است و بعد از آن مرکبات و ذرت دانه‌ای سطح زیر کشت غالب مناطق شناخته شده است.

واژه‌های کلیدی: تخصیص منابع و مصارف، بهینه‌سازی غیرخطی، حوضه آبریز تجن، درآمد به هزینه، مدل VENSIM

مقدمه

دینامیک سیستم‌ها (SD[۱]) شاخه‌ای از تفکر سیستمی است که برای مطالعه رفتار دینامیکی طولانی‌مدت در سیستم‌های پیچیده و سیستم‌های بازخوردی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته (۳) و می‌تواند با در نظرگرفتن اثرات مضاعف، غیرمستقیم یا غیرخطی سایر بخش‌های سیستم (۱۹)، که معمولا در شرایط استفاده از مدل‌های ذهنی تحلیل تصمیم (۳) وجود ندارد، استراتژی‌های مختلف رویکرد چندگانه زیرسیستم‌های منابع آب را شبیه‌سازی نماید (۹). این مدل‌سازی مستلزم پیوند تعدادی از این فرایندها است که مبتنی‌بر روابط علی – معلولی بوده و سیستم‌های محیط زیستی – انسانی پیچیده و مسائل پایدار استراتژیکی را توسعه می‌دهد. در چند دهه گذشته، مطالعات گسترده‌ای در خصوص رویکرد SD به‌منظور توسعه پویایی سیستم و مدل‌های شبیه‌سازی در حوضه‌های مختلف آبریز در سرتاسر دنیا انجام شده است (۲، ۱۰، ۱۲ و ۲۳). پاره‌ای از این تحقیقات مدل‌سازی توصیفی یکپارچه که با رویکرد SD الحاق شده است را مورد بررسی قرار می‌دهد و بخش دیگری از آن حول الحاق این رویکرد با مدل‌های فیزیکی می‌باشد (۷ و ۸). در زمینه توسعه مدل اجتماعی – هیدرولوژیکی برای استفاده مجدد از هرزآب کشاورزی Jeong and Adamowski (۸)، به این نتیجه رسیدند که این مدل می‌تواند چارچوبی مطلوب برای طراحی استراتژی‌های منابع آب در مرکز کره جنوبی باشد. از آنجا که در تخصیص بهینه منابع آب، حداکثرسازی درآمد، عمده‌ترین هدف مدل‌سازی است، شبیه‌سازی دقیق میزان منابع و مصارف و برآورد بیلان آب در منطقه، بسیار تعیین‌کننده خواهد بود. با توجه به تعاریف متعدد الگوی کشت که تنها به بررسی خصوصیاتی نظیر تناوب زراعی یا ترکیب کشت اشاره می‌نماید (۱۴)، روش‌های مختلفی مبنای مطالعات قرار گرفته است که عمده این تحقیقات بر پایه روش‌های خطی (LP)[۲] و غیرخطی (NLP)[۳] با هدف به حداکثر یا حداقل‌رساندن تابع هدف با فرض محدودیت‌ها (منابع در دسترس) و متغیرهای تصمیم (فعالیت‌ها) می‌باشد (۱۵). برخی از این تحقیقات بر پایه روابط شبیه‌سازی عملکرد محصولات FAO می‌باشد که با هدف بهینه‌سازی تخصیص آب، الگوی کشت در سطح یک شبکه و حداکثرسازی درآمد به هزینه بوده (۱۷ و ۱۸) و بخشی دیگر به توزیع بهینه آب در روش‌های کم‌آبیاری (۲۳) و بهینه‌سازی عملکرد مخزن سد و توزیع بهینه آب آبیاری اختصاص دارد (۲۲). برهمین‌اساس و با توجه به اینکه آگاهی کمی نسبت به رفتار دینامیکی طولانی‌مدت حوضه‌های رودخانه وجود دارد و علاوه‌بر آن، بیشتر مدل‌های SD در این مقیاس غالبا در اروپا، شمال امریکا و استرالیا انجام شده (۹)، در این مطالعه، به بررسی تخصیص منابع و مصارف در حوضه آبریز تجن با استفاده از

1- system dynamics 2- Linear programming 3- Non Linear programming

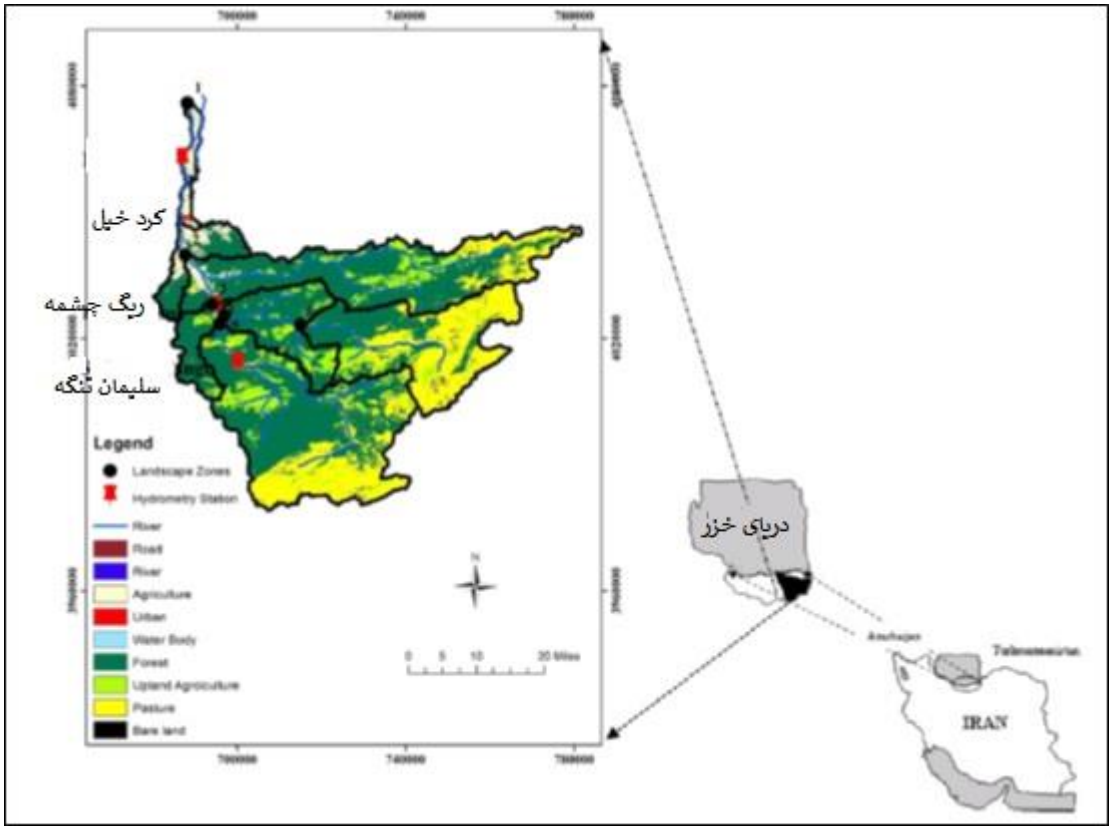
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

مدل SD پرداخته شده است. از بین مدل‌های تحلیل پویا در طرح جامع مدیریت منابع آب کشور در سال ۱۳۸۸ تاکید زیادی بر برنامه VENSIM وجود دارد. همچنین شبکه آبیاری و زهکشی تجن که در این حوضه آبریز احداث شده، با تأکید بر مشارکت کشاورزان در امر بهره‌برداری و نگهداری از یک‌سو و از سویی دیگر توسعه و بهبود کشاورزی با استفاده بهتر و مفیدتر از پتانسیل‌های منابع آب و خاک حوضه آبریز تجن سازماندهی شده است (۲۱). به‌همین دلیل در این پژوهش، ابتدا تخصیص منابع و مصارف در حوضه آبریز تجن در شرایط موجود و استفاده تلفیقی از منابع آب در بازه زمانی ۵۲ ساله بین سال‌های ۹۴-۱۳۴۲ با استفاده از مدل VENSIM شبیه‌سازی می‌شود. با در نظرگرفتن نیاز شرب، صنعت، زیست‌محیطی و کشاورزی، بیلان منابع آب تعیین شده و با ارزیابی کمبودهای احتمالی در حوضه آبریز، سناریوهای مدیریتی محتمل طرح‌ریزی می‌شود. در تمامی موارد بالا، اصل تفکیک الگوی کشت در منطقه مورد توجه قرار خواهد گرفت. در مرحله آخر با ارزیابی نتایج بیلان آب و معیارهای پایداری، الگوی کشت بهینه با هدف حداکثر درآمد به هزینه، پیشنهاد می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز تجن (شکل ۱) با مساحت تقریبی ۴۰۰۵/۲۲ کیلومتر مربع که ۳۹۸۰/۷۵ کیلومتر مربع آن در داخل استان قرار گرفته، در محدوده‌ای با مختصات جغرافیایی ´۱۰- °۵۲ تا ´۴۵-°۵۶ طول شرقی و ´۴۵-°۳۵ تا ´۰۰- °۳۸ عرض شمالی قرار دارد. رود تجن که بزرگترین رود در این محدوده است، با شیب زهکشی ۲۸/۵٪ از رشته کوه البرز سرچشمه گرفته که دارای سرشاخه‌های متعددی از جمله ورن، رودخانه سفید، زارم‌رود، شیرین رود، لاجیم و گرم‌رود بوده که با پیوستن این انشعابات به پیکره اصلی تجن، آورد اصلی رودخانه تجن شکل می‌گیرد. سد شهید رجایی در بالادست رود تجن با ظرفیت ۱۶۱ میلیون‌مترمکعب احداث شده، از سویی دیگر بر رودخانه‌های زارم و ورن دو سد فینسک به ظرفیت ۱۲ میلیون‌مترمکعب و زارم به ظرفیت ۸۳ میلیون‌مترمکعب ساخته شده است. در پایین‌دست رودخانه تجن، بند انحرافی تجن با ظرفیت آبگیری ۳۸ مترمکعب بر ثانیه احداث شده که قابلیت تنظیم برای کلیه دبی‌های مورد نیاز را داراست.



شکل ۱- جانمایی از حوضه آبریز مورد مطالعه (حوضه آبریز تجن)
Figure 1. The location of case study watershed (Tajan watershed)

شبیه‌سازی تخصیص منابع آب حوضه آبریز تجن با استفاده از تحلیل سیستمی

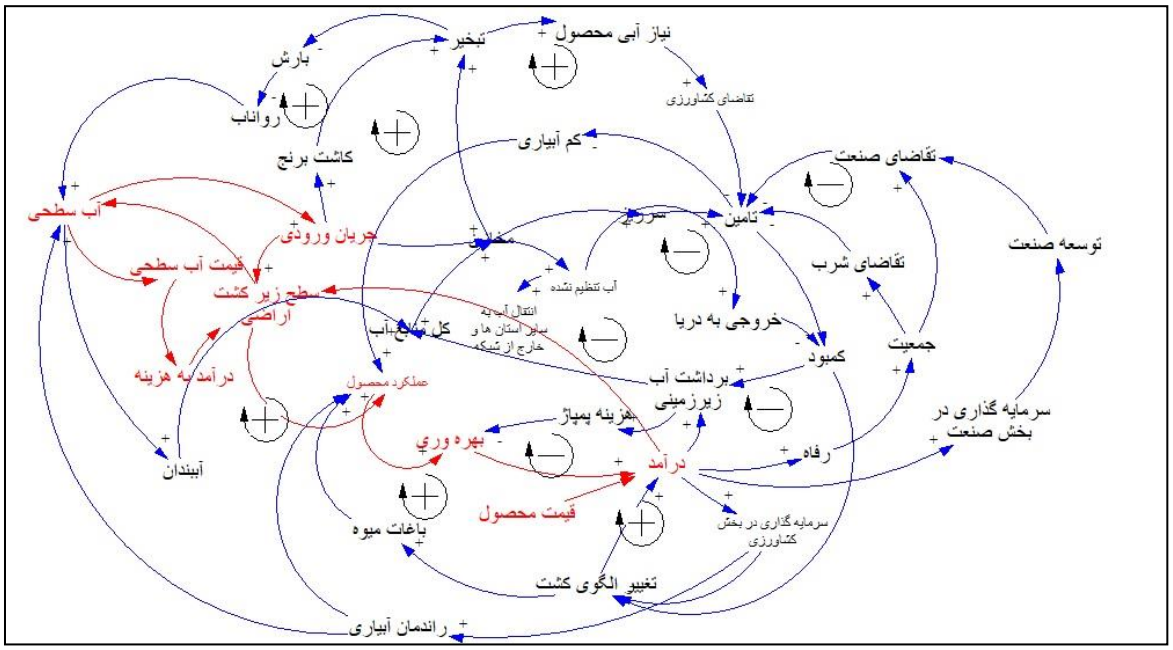
با توجه به وسعت محدوده مورد مطالعه و سازه‌های موجود و در نظرگرفتن تقاضاها و منابع، حوضه آبریز تجن نیز به ۴ بخش تقسیم شد که بر اساس مرزهای تعریف‌شده هر بخش، مصارف و منابع با در نظرگرفتن تمامی فرضیه‌های پویا به‌طور تفکیکی به مدل شبیه‌سازی وارد گردید: ۱- سد فینسک برای نیاز شرب، کشاورزی و زیست‌محیطی، ۲- سد شهید رجایی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

برای تأمین نیاز شرب، کشاورزی، صنعت و زیست‌محیطی، ۳- سد زارم برای نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی، ۴- بند انحرافی تجن تا بالادست رودخانه برای تأمین نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی.

فرضیه‌های پویا و رسم نمودار علی – معلولی

چگونگی تاثیر فرضیات پویا در شکل ۲ نشان داده شده است. رشد جمعیت منجر به افزایش نیاز صنعت و متعاقبا افزایش در تامین آب می‌شود. همچنین، هرچه جمعیت افزایش یابد، نیاز صنعت نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. بر همین اساس این حلقه (رفاه) یک حلقه برون‌زا (تعادلی) است. از سویی دیگر، با افزایش حجم ذخیره در مخازن، علاوه‌بر افزایش سرریز از سدها و تامین نیازها از این طریق، برداشت از آب زیرزمینی کاهش یافته که منجر به افزایش منابع کلی آب شده و حلقه تقویتی را ایجاد می‌کند (حلقه سرریز). از طرف دیگر، افزایش سرریز، میزان آب ورودی به دریا را افزایش داده و در نتیجه کمبودها نیز افزایش خواهد یافت. درصورتی‌که این روند ادامه یابد، برداشت از آب زیرزمینی افزایش خواهد یافت و بر همین اساس میزان کل منابع آب سطحی کم خواهد شد که یک حلقه تقویتی را ایجاد میکند (حلقه ورودی به دریا). آب سطحی (جریان آب حاصل از رهاسازی سد و آب‌بندان) و رواناب با میزان آب ورودی به مخازن رابطه مستقیم دارد. علاوه‌بر این، هر چه میزان آب ورودی به مخازن افزایش یابد، سطح زیر کشت نیز افزیش و درنتیجه میزان بهره‌وری و درآمد افزایش خواهد یافت. با افزایش درآمد، برداشت از آب زیرزمینی زیادتر شده که منجر به کاهش در برداشت از حجم کل آب در دسترس بوده و بدین‌ترتیب حجم ذخیره سد نیز کاهش می‌یابد که ترکیب تمامی موارد بالا در حلقه، یک حلقه برون‌زا را ایجاد می‌کند. افزایش درآمد، منجر به افزایش فعالیت‌های کشاورزی شده که این دو مورد حلقه تقویتی را به‌منظور تمایل به تغییر الگوی کشت ایجاد می‌کنند. علاوه‌بر این، هر چه هزینه‌های پمپاژ افزایش یابد بهره‌وری و درآمد کاهش یافته که اساسا یک حلقه برون‌زا را ایجاد می‌کند (حلقه بهره‌وری). همچنین با افزایش سطح زیر کشت، عملکرد محصول و بهره‌وری افزایش یافته و با افزایش درآمد حلقه تقویتی ایجاد می‌شود (حلقه درآمد). از سویی دیگر با افزایش آب سطحی، هزینه آب سطحی افزایش یافته و در نتیجه درآمد به هزینه کاهش یافته که منجر به کاهش سطح زیر کشت شده و حلقه تعادلی یا برون‌زا را ایجاد می‌کند (حلقه درآمد به هزینه). در شکل ۲، تمامی حلقه‌های محتمل ارایه شده است. حلقه‌های قرمز نشان‌دهنده حلقه‌های درآمد به هزینه، حلقه درآمد و حلقه بهره‌وری می‌باشد. باقی حلقه‌ها بیان‌کننده حلقه ورودی به دریا، حلقه آب حاصل از رهاسازی سد و آب‌بندان، حلقه رفاه و حلقه سریز است.



شکل ۲- نمودار علی معلولی بین سیستم هیدرولوژیکی
Figure 2. Casual loop diagram inner hydrological system

روابط اساسی و داده‌های ورودی مدل

یک مدل شبیه‌ساز دینامیکی در چهارچوب سیستم دینامیک از مدل مذکور در شرایط موجود تخصیص منابع آب حوضه آبریز تجن ایجاد شد که متشکل از ۴ بخش اساسی است: بخش هیدرولوژیکی که خود برگرفته از سیستم‌های تامین آب نظیر مخازن اصلی، آب‌بندان، آب زیرزمینی، رودخانه‌ها و ... است، بخش کشاورزی که مبتنی‌بر الگوی کشت منطقه و عملکرد محصولات کشاورزی است، بخش اقتصادی که مسائل مربوط به درآمد به هزینه را تحت پوشش خود قرار می‌دهد و بخش آخر بخش اجتماعی- صنعتی است

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

که مستلزم در نظرگرفتن تقاضای صنعتی– اجتماعی است. روش کار به این ترتیب است که ابتدا تخصیص یکپارچه منابع آب و خاک حوضه آبریز تجن در بخش‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی بررسی می‌شود. در قدم بعدی با توجه به شبیه‌سازی تامین به تقاضاهای کشاورزی، سناریوهای مدیریتی با هدف کسب حداکثر سودآوری در بخش اقتصادی، مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت در بخش صنعتی – اجتماعی به بررسی چگونگی تامین نیازهای شرب، صنعت و بهداشت پرداخته شده است.

بخش هیدرولوژیکی

مخازن اصلی

سد شهید رجایی، فینسک و زارم که به ترتیب بر شاخه اصلی رودخانه تجن، چهاردانگه و زارم‌رود احداث شده، با ذخیره آب در فصل غیر زراعی و رهاسازی آن در فصل زراعی، براساس تابعی از زمان در مدل تعریف می‌شود. بدین‌ترتیب که منحنی حجم، سطح ارتفاع و همچنین سری زمانی ماهانه خصوصیات تراز آب مخزن و میزان تبخیر از سطح دریاچه سد، استخراج شد و بر اساس روابط تعریف شده در مدل، به مدل وارد شد. نحوه شبیه‌سازی ریاضی آب‌بندان نیز مشابه با مخازن در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار علی – معلولی حوضه آبریز تجن (شکل ۲)، بیلان وزنی برای تخمین میزان ذخیره مخازن در روابط یک توسعه داده شده که در ادامه به مدل شبیه‌سازی تحلیل سیستم دینامیک وارد شد. تمامی احجام ذکر شده در رابطه یک، بر حسب میلیون‌مترمکعب در ماه است (۴ و ۲۴).

(رابطه ۱)

Reservoir (حجم ذخیره مخزن) =
Inflow (حجم ورودی) – evaporation (تبخیر) – outflow (حجم خروجی) – spill (رهاسازی)

بخش آب زیرزمینی

از آنجایی‌که تنها در بالادست بند انحرافی تجن، حجم ذخیره و کیفیت آبخوان آب زیرزمینی مطلوب بوده و محدودیتی در استفاده از آن وجود ندارد، ابتدا بایستی تقاضاهای این محدوده توسط آب سطحی و آب‌بندان، تامین شده و با محاسبه میزان کمبودها، نیازهای باقیمانده با استفاده از رابطه ۲ تامین یابد. این احجام در رابطه زیر بر حسب میلیون‌مترمکعب در ماه می‌باشد.

(رابطه ۲)

MIN(supply (تامین), Groundwater storage (حجم ذخیره آبخوان))

تخصیص آب

تخصیص آب در حوضه آبریز تجن مبتنی‌بر تامین نیازهای شرب، صنعت، زیست‌محیطی و کشاورزی به‌ترتیب اولویت تامین و بر حسب میلیون‌مترمکعب در ماه است. بدین‌ترتیب روابط ریاضی مطابق اولویت تامین استخراج و به مدل VENSIM وارد گردید. همچنین در مواردی نظیر سد فینسک که تامین تقاضای خارج از حوضه آبریز تجن مطرح هست، بایستی الزامات مربوط به تخصیص نیازهای قبل از سد لحاظ گردد که در رابطه ۳ آورده شده است. در این رابطه حجم مربوط به تامین و خروجی از سد بر حسب میلیون‌مترمکعب است.

(رابطه ۳)

Supply (تامین)= MIN(outflow (خروجی), demand (نیاز))

کشاورزی نیاز آبی کشاورزی

به‌منظور محاسبه تبخیر – تعرق گیاهی در برآورد نیاز آبی کشاورزی، از رابطه ۴ استفاده شد که در آن Kc ضریب رشد گیاهی است. مقادیر Kc محصولات مختلف از مقادیر پیشنهادی Allen و همکاران (۱) گرفته شده و به مقادیر ماهانه ۵۲ ساله که از الگوهی کشت گیاهی در طی فصل رویش برداشت شده است، تبدیل می‌شود. از سویی دیگر، بارش موثر P_{eff} از روش تجربی پیشنهادی FAO که در رابطه ۵ ارایه شده است، به‌دست آمد. فصل زراعی از ماه فروردین شروع شده و برای بیشتر محصولات در شهریور خاتمه می‌پذیرد. داده‌های محصولات شامل تراکم کشت، نیاز آبی خالص و ناخالص و راندمان است.

(رابطه ۴)

$$ET_c = k_c * ET_0$$

(رابطه ۵)

$$ET_c - P_{eff} / Efficiency = Gross\ requirement$$

عملکرد محصول

برای محاسبه عملکرد سالانه محصول، از رابطه ۶ استفاده شد (۴) که در آن Y و Y_{max} به‌ترتیب عملکرد واقعی و ET و ET_{max} تبخیر – تعرق واقعی و حداکثر تبخیر – تعرق، λ_i فاکتور حساسیت نسبی گیاه به کمبود آب در مرحله رشد i ام (بی بعد) و n تعداد مراحل رشد گیاه و $\frac{Y_{ai}}{Y_{pi}}$ میزان نسبی عملکرد در هر مرحله از کشت می‌باشند. بایستی به این مسئله اشاره نمود که استفاده از رابطه بالا مستلزم این است که آب از کیفیت قابل‌قبولی برخوردار بوده و سایر خصوصیات فیزیولوژی گیاه ثابت هستند (۷).

(رابطه ۶)

$$1-\frac{Y}{Y_{max}} = K_Y\left(1-\frac{ET}{ET_{max}}\right)$$

اجتماعی- صنعتی

نیاز صنعت و شرب که در روابط به‌صورت dd(t) بر حسب میلیون‌متر مکعب در ماه (MCM/month) نشان داده شده است، با استفاده از نیاز آبی صنعت و شرب به ازای هر فرد (d(pc)d) و جمعیت (p(t)) قابل تخمین است (رابطه ۷). همینطور برای محاسبه نیاز زیست‌محیطی، از روش مونتانا (۲۵) استفاده شد که در آن حداقل جریانی که بایستی در مسیل‌های رودخانه‌ای به‌منظور حفظ حیات موجودات آبزی وجود داشته باشد، محاسبه می‌گردد. بدین‌ترتیب که بعد از محاسبه جریانات سالانه میانگین در حوضه آبریز تجن، ۴۵٪ آن به‌عنوان جریانی که قابلیت حفاظت از موجودات آبزی را در شرایط طبیعی رودخانه‌ای حفظ نماید محاسبه شد (۲۱).

(رابطه ۷)

$$D_d(t) = d_d^{pc} * p(t)$$

اقتصادی طراحی سناریو

در حوضه آبریز تجن، عمده‌ترین نیاز، تامین تقاضای کشاورزی در منطقه است و هر گونه تغییری در این بخش

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

می‌تواند بر میزان آب در دسترس موثر باشد. آنچه مبنای مطالعات در این محدوده را ممکن ساخته است، در نظرگرفتن اولویت تخصیص منابع آب به هر محصول است. لذا در پژوهش حاضر، فرض شده است که معیار اولویت تخصیص براساس سودآوری بیشتر آب منطقه‌ای است و از آنجاییکه در حوضه آبریز تجن، شبکه مورد استفاده آبیاری از نوع مدرن است، براساس قانون تثبیت آب‌بهای زراعی مصوبه سال ۱۳۶۹ و آیین نامه اجرایی آن، آب‌بهای دریافتی از کشاورزان بر حسب درصدی از ارزش محصول کشت شده می‌باشد. به استناد این قانون متوسط آب‌بهای آب تنظیم‌شده در شبکه‌های مدرن معادل ۳ درصد ارزش محصول تولیدشده می‌باشد. البته باید توجه داشت که در تمام مراحل اجرای پژوهش، ارزش اقتصادی آب بدون اضافه‌شدن خدمات مربوط به ذخیره‌سازی یا استحصال، انتقال و توزیع، اندازه‌گیری و پالایش تخمین مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس و با توجه به ۴ منطقه تفکیک‌شده نیاز آبی به تفکیک الگوی کشت هر منطقه و براساس اولویت تامین برآورد شد و به مدل وارد گردید. بعد از آنکه میزان حجم سالانه تخصیص در بخش کشاورزی برای هر محصول مشخص شد، توابع هدف برای بیشینه‌کردن میزان محصول و درآمد و کمینه‌کردن هزینه‌ها استخراج و به مدل بهینه‌سازی وارد شد. در جدول یک اولویت تخصیص منابع آب هر یک از مناطق بالادست سدها به‌همراه الگو کشت فعلی و سطح زیر کشت آورده شده است. الگوی کشت به‌ترتیب نزولی اولویت تامین مرتب شده است. بدین‌صورت که مرکبات و سیاه‌ریشه به‌ترتیب اولویت اول و دوم را دارا بوده و سایر محصولات اولویت‌های بعدی (اولویت هفتم برای گندم در بالادست بند انحرافی تجن و فینسک، اولویت چهارم برای دانه‌های روغنی در بالادست زارم و اولویت ششم برای گندم در بالادست سد شهید رجایی) را تحت پوشش قرار می‌دهند. برای نمونه، در بالادست فینسک برای گیاه مرکبات ابتدا به‌طور کامل و براساس نیاز آبی گیاه، نیاز تامین شده و سیاه‌ریشه جایگاه دوم اولویت تامین را دارد که بعد از گیاه مرکبات آبیاری خواهد شد. سایر گیاهان از اولویت‌های پایین‌تری برخوردارند. ذکر این نکته لازم است که در بالادست بند انحرافی تجن تنها مرکبات کشت می‌شده است. همچنین بایستی توجه نمود که برخی از محصولات نظیر حبوبات و دانه‌های روغنی، ارزش یکسانی برای آب منطقه‌ای دارند و از همین‌رو اولویت یکسانی برای آنها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- الگوی کشت فعلی محصولات حوضه آبریز تجن به ترتیب نزولی اولویت تامین
Table 1. Present cropping pattern in Tajan watershed Descending order of supply priority

الگوی کشت	سطح زیر کشت بالادست (ha)			
	بند انحرافی تجن	سد شهید رجایی	سد فینسک	سد زارم
مرکبات	۱۲۹۴۰	۳۹	۹۶	–
سیاه ریشه	۶۴۰۲۶	۵۰۱	۲۷۵۳	۹۷۳
شالی	۲۱۹۶۱	۱۰۶۰	۱۹۰۷	۱۶۰
جالیز	۲۳/۵	۳/۵	۲۷۸۳	۱/۷
ذرت دانه ای	۳۶۹	–	۱	–
حبوبات	۸/۵	–	۶/۱	–
دانه های روغنی	۴۳۵	۰/۳	۱۳	۴۱۵۷
گندم	۱۷۱۰	۰/۸	۹۰۱	–

الگوی کشت بهینه

LINGO ابزاری قدرتمند در جهت بهینه‌سازی خطی و غیر خطی، به منظور تجزیه و تحلیل مدلهای فرموله شده است که از قدرت بهینه سازی خطی و غیر خطی آن برای مسایل بزرگ استفاده شده تا بتوان جوابها را مورد تجزیه و تحلیل نمود (۱۵). در این پژوهش از محیط مدل VENSIM PLE استفاده شده که فاقد ابزار بهینه‌سازی است. در نسخه VENSIM DSS بهینه‌سازی با Powell انجام می‌شود که از جمله محدودیت‌های این روش، احتمال قرارگرفتن در کمینهٔ موضعی (۱۶) بوده که مبنای تحقیقات مختلفی قرار گرفته است بدین ترتیب این روش با سایر روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان داد که اختلاف معناداری بین سایر روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی و روش Powell وجود ندارد(۶). با استفاده از داده‌های گردآوری شده توسط نرم افزار Lingo میزان درآمد بیشینه با توجه به میزان آب آبیاری و مساحت زمین کشاورزی، مساحت زیر کشت هر محصول محاسبه گردید. تابع هدفی که مبنای تغییر الگوی کشت در نظر گرفته شده مطابق با رابطه ۸-۱۰ می‌باشد:

(رابطه ۸)

$$Max\ Z_i = \sum_c \text{income/cost}$$

(رابطه ۹)

$$Incomc = \sum_c (Y_c \times A_c \times P)_c$$

(رابطه ۱۰)

$$Costc = \sum_c PC \times A_c$$

به‌منظور تغییر الگوی کشت منطقه، سه دسته محدودیت در نظر گرفته شد: محدودیت یک مربوط به سطح زیر کشت محصولات است که مجموع سطح زیر کشت همه محصولات از مساحت کل حوضه آبریز بیشتر نشود. در محدودیت ۲ آب مورد نیاز محصولات کشت‌شده از میزان حجم آب تخصیص‌یافته هر سد فزونی نیابد و در آخر محدودیت تغییر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

الگوی کشت باغی به زراعی است. درختان میوه در محدوده مورد مطالعه که شامل درختان سیاه ریشه ومرکبات است، عمری نسبتا طولانی برای بهره‌وری اقتصادی داشته و لذا به‌منظور جلوگیری از انحراف الگوی کشت به سمت زراعی که منجر به از بین درختان میوه شده و از سویی دیگر آماده‌سازی مزارع باغی به زراعی مستلزم هزینه‌های مازادی است که در این تحلیل اقتصادی به آن پرداخته نمی‌شود، حداقل سطح زیر کشت را برای مزارع باغی در نظر گرفته تا با حفظ سطح موجود، بهینه‌سازی الگوی کشت انجام گردد. این حدود به شکل فرمول‌هایی که تابعی از متغیرهای مدل می‌باشند بیان شده و به‌عنوان محدودیت‌ها شناخته می‌شوند که در روابط ۱۳-۱۱ آورده شده است.

(رابطه ۱۱)

$$\text{St: } \sum_c A_c \leq \sum TA$$

(رابطه ۱۲)

$$\sum_c \{(WS) \times A_c\} \leq TWS$$

(رابطه ۱۳)

$$A_{orchrds} \geq A_{orchard}$$

Z_i تابع درآمد به هزینه، C محصولات موجود در الگوی کشت، $Income_c$ درآمد حاصل از محصولات بر حسب ریال، $Cost_c$ کل هزینه‌های صرف‌شده برای محصولات بر حسب ریال، Y_c عملکرد محصولات بر حسب کیلوگرم در هکتار، A_c مساحت هر محصول بر حسب هکتار، PC قیمت تمام‌شده هر محصول بر حسب ریال بر کیلوگرم، TA کل سطح زیر کشت هر منطقه تفکیک شده بر حسب هکتار، WS آب مورد نیاز برای آبیاری هر محصول بر حسب متر، TWS کل آب سطحی موجود بر حسب متر می‌باشد.

شبیه‌سازی رفتاری دینامیکی حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل VENSIM داده‌های ورودی مدل

در این پژوهش از محیط مدل VENSIM PLE استفاده شده است. براساس جدول ۲ پارامترهای ورودی بر حسب بازه زمانی ماهانه به مدل وارد شد. داده‌های ماهانه آب و هوا در بین سال‌های ۱۳۴۲ تا ۱۳۹۴ که مشتمل بر داده‌های بارش، حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت میانگین باد و تابش خورشیدی است از ایستگاه هواشناسی دشت ناز که به فاصله ۱۵ کیلومتر از محدوده مورد مطالعه است، برداشت شد. سپس الگوی تخصیص منابع آب به هر بخش از حوضه آبریز با توجه به فرضیات پویا که دربرگیرنده قوانین رهاسازی از سدها، آب‌بندان و آب زیرزمینی در طی دوره زمانی مفروض توسط مدل VENSIM شبیه‌سازی شد تا بتوان کمبودهای احتمالی را برآورد نمود. سایر پارامترهای موجود نیز در جدول ۲ به‌طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۲- فهرست پارامترهای مورد استفاده در حوضه آبریز تجن

Table 2. List of Parameters in Tajan watershed

پارامترها	مقادیر
ارتفاع تاج سد شهید رجایی (متر)	۱۳۸
ارتفاع تاج سد فینسک (متر)	۵۹
ارتفاع تاج سد زارم (متر)	۷۸
کنترل سیلابی سد شهید رجایی (متر)	۱۵۳
کنترل سیلابی سد فیسنک (متر)	۹/۵۲
کنترل سیلابی سد زارم (متر)	۶۰
کنترل سیلابی آب‌بندان (متر)	۹۲
حداکثر حجم ذخیره سد شهید رجایی (میلیون متر مکعب)	۱۶۲
حداکثر حجم ذخیره سد فینسک(میلیون متر مکعب)	۱۱/۸
حداکثر حجم ذخیره سد زارم (میلیون متر مکعب)	۸۲/۷۳
حداکثر حجم ذخیره آب‌بندان (میلیون متر مکعب)	۱۰۲
حداقل حجم ذخیره سد شهید رجایی (میلیون متر مکعب)	۱۷/۱۲
حداقل حجم ذخیره سد فینسک (میلیون متر مکعب)	۲/۲۷
حداقل حجم ذخیره سد زارم (میلیون متر مکعب)	۱۳
حداقل حجم ذخیره آب‌بندان (میلیون متر مکعب)	۲۵/۶
تبخیر از سطح دریاچه مخازن (متر)	۰/۹
نیاز زیست محیطی – بالادست سد شهید رجایی (میلیون متر مکعب)	۲۳۱
نیاز زیست محیطی – بالادست سد فینسک (میلیون متر مکعب)	۱۴۱
نیاز زیست محیطی – بالادست سد زارم (میلیون متر مکعب)	۳۲
نیاز زیست محیطی – بالادست بند انحرافی تجن (میلیون متر مکعب)	۵۸۱
راندمان بخش کشاورزی (درصد)	۷۰
نیاز شرب سد شهید رجایی (میلیون مترمکعب در ماه)	۲/۵
نیاز شرب سد فینسک ((میلیون مترمکعب در ماه)	۰/۶
نیاز شرب سد زارم (میلیون مترمکعب در ماه)	۳/۹
نیاز صنعت سد شهید رجایی (میلیون مترمکعب در ماه)	۱
نیاز صنعت سد زارم (میلیون مترمکعب در ماه)	۰/۵
عمق آبخوان (متر)	۷۰

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

ارزیابی مدل

صحت‌سنجی مدل بیشتر به‌دنبال بررسی سودمندبودن مدل براساس مسئله و اهداف است. همچنین درجه اطمینان از صحت مدل به دید مدلساز بر اساس مدل دینامیکی طراحی شده و اهداف مورد نظر مدلساز از مدل وابسته است. لذا از آزمون‌های صحت‌سنجی ارزیابی ساختار، آزمون تکرار رفتار استفاده شد. در بررسی این آزمون‌ها نتایج مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر واقعی با استفاده از دو روش ترسیمی و شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطای نرمال (nRMSE)، استفاده می‌شود (روابط ۱۵-۱۴). بدین‌ترتیب که ابتدا ضریب اصلاحی مخزن و متعاقباً ضرایب اصلاحی نیاز کشاورزی برای دشت آبخور سد زارم برای مدل وارد شده و در نهایت با مقایسه تراز سطح مخزن زارم با نتایج واقعی در طی سال‌های آماری مدل مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و از سویی دیگر می‌توان برای منطقه مورد مطالعه ضریب اصلاحی مخزن و نیاز کشاورزی مطلوبی را نیز ارائه نمود.

(رابطه ۱۴)

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(S_i-O_i)^2}{n}}$$

(رابطه ۱۵)

$$nRMSE=RMSE/O\times 100$$

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل

به‌منظور ارزیابی نتایج مدل، رفتار مدل با رفتار مرجع مقایسه شد. یکی از متغیرهایی که صحت‌سنجی آن بررسی شد و در تحلیل نتایج این تحقیق از اهمیت بسیار زیادی نیز برخوردار است، تراز آب مخزن و چگونگی تغییرات آن در طی فصل رشد می‌باشد. بر همین اساس پارامتر ضریب اصلاحی مخزن در طی سال‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت تا بتوان از یک‌سو هم چگونگی رفتار مدل را نسبت به شرایط مرجع سنجید و هم از سویی دیگر برای منطقه مورد مطالعه، ضریب اصلاحی برای نیاز آبی محصولات کشاورزی پیشنهاد داد تا بتوان از آن برای تحقیقات آتی در این محدوده استفاده نمود. بدین‌ترتیب که با تغییر ضریب اصلاحی مخزن و نیاز کشاورزی، رفتار مخزن در شبیه‌سازی تخصیص مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. بررسی نتایج جدول زیر نیز نشان می‌دهد که این دو ضریب به‌طور مستقل از هم بوده و هیچ تاثیری روی هم ندارند، بدین‌ترتیب که نمی‌توان با تغییر یکی از آنها، چگونگی تغییر دیگری را دریافت. لذا برای برآورد رقم دقیق هر کدام از ضرایب باید به نمودار یک به یک آنها مراجعه نمود که در شکل ۳ نشان داده شده است. از سویی دیگر، از آنجایی‌که هر چه رقم RMSE به عدد صفر نزدیک باشد، بهترین تطابق بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای وجود دارد. بررسی nRMSE نیز روند معکوسی داشته است. به‌طوری‌که همواره بیشتر از ۱۰٪ و یا نزدیک به آن (حدودا ۱۲٪) بوده و از این میزان فراتر نرفته که آنرا در محدوده خوب تا عالی قرار می‌دهد (۱۹) و به‌جز Zr0= ۰/۷۵ و agri coe= ۱/۵، nRMSE برابر با ۲۰٪ برآورد شده که آنرا در رده خوب جای می‌دهد. در نهایت می‌توان چنین نتیجه گرفت در صورتیکه ضرایب اصلاحی مخزن و نیاز آبی در این محدوده باشد، نتایج قابل‌قبولی به‌دست خواهد آمد. در جدول ۳، منظور از Zr0 ضریب اصلاحی مخزن زارم و agri coe ضریب اصلاحی کشاورزی در منطقه زارم است.

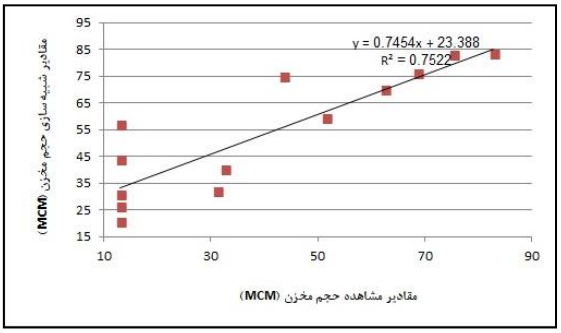
جدول ۳- نتایج ارزیابی شبیه‌سازی حاصل از مدل VENSIM

Table 3. Result of evaluation of VENSIM Model

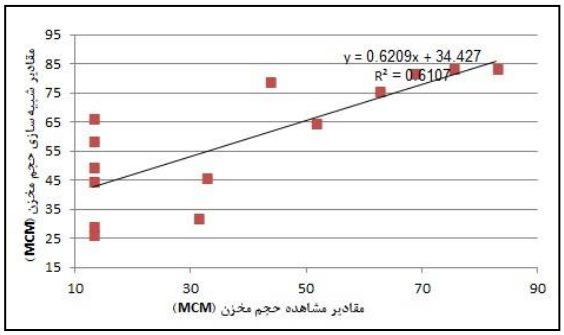
پارامترهای ارزیابی	Zr0= 096 Agri coe= 2.9	Zr0= ۴ Agri coe= 4	Zr0= 3 Agri coe= 3.5	Zr0= 3 Agri coe= 5.5	Zr0= 3 Agri coe= 6	Zr0= 3 Agri coe= 5	Zr0= 3 Agri coe= 4	Zr0= 3 Agri coe= 4	Zr0= 1.1 Agri coe= 3	Zr0= 1.2 Agri coe= 2.5	Zr0= 1.2 Agri coe= 2.8	Zr0= 1.8 Agri coe= 0.8	Zr0= 0.75 Agri coe= 1.5
RMSE (m)	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۳
nRMSE (%)	۱۲/۱۷	۱۳	۱۳	۱۴	۱۴	۱۲	۱۳	۱۳	۱۲	۱۱	۱۱	۱۲	۲۰

در شکل ۳ نمودار یک به یک نقاطی که برای تعیین بهترین ضریب اصلاحی مخزن و نیاز کشاورزی به مدل وارد شد، ارایه شده است. از بین نقاط مختلفی که به‌عنوان ضرایب اصلاحی ورودی به مدل وارد شد، بهترین نتایج در ضرایب اصلاحی مخزن و نیاز آبی به‌ترتیب ۱/۸ و ۰/۸ مشاهده شد که میزان RMSE و nRMSE آن به‌ترتیب ۰/۰۸ متر و ۱۲٪ محاسبه شد. سایر نقاط نیز تغییرات اندکی نسبت به این ضرایب پیشنهادی داشته است.

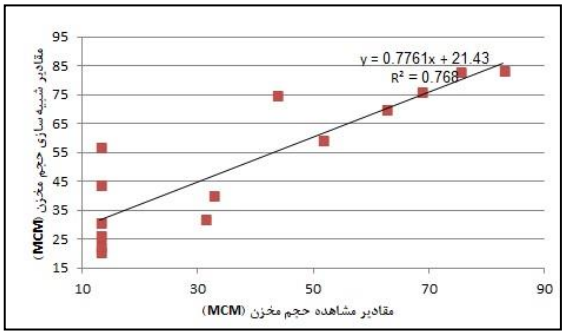
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]



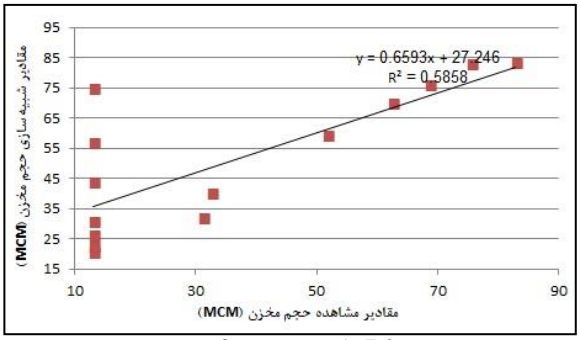
الف: Zr0= ۰/۹۶ و agri coe= ۳



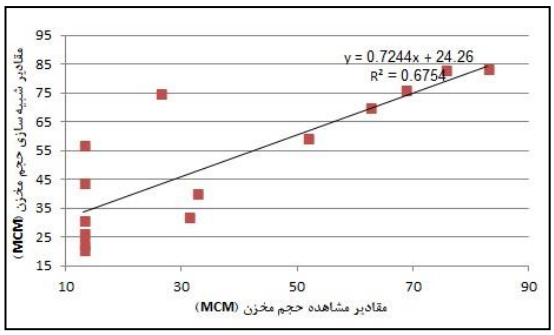
ب: Zr0= ۰/۷۵ و agri coe= ۱/۵



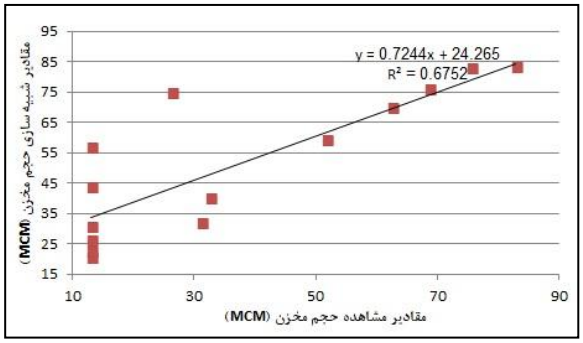
ج: Zr0= ۱/۸ و agri coe= ۰/۸



چ: Zr0= ۳ و agri coe= ۶



م: Zr0= ۴ وagri coe = ۴



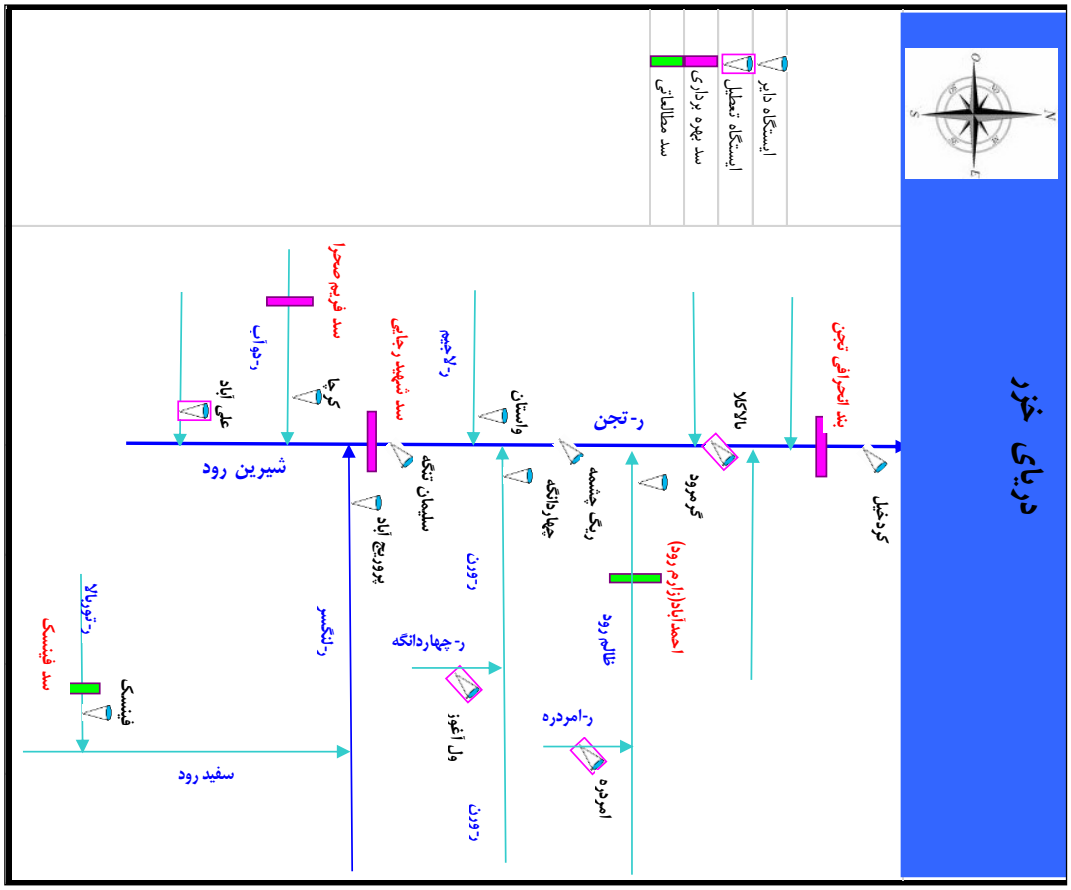
و: Zr0= ۳ و agri coe= ۴/۵

شکل۳- نمودارهای یک به یک پارامترهای مورد بررسی
Figure 3. Figures of evaluated parameters

نتایج شبیه‌سازی تخصیص منابع آب در حوضه آبریزتجن با استفاده از مدل VENSIM

به‌منظور بررسی وضعیت منابع و مصارف حوضه آبریز تجن، مدل VENSIM اجرا شد که در اجرای مدل مذکور، تمامی مخازن و بالادست آنها در طی سال‌های ۹۴-۱۳۴۲ و به‌طور همزمان لحاظ گردید. شکل ۴ دیاگرام منابع و مصارف حوضه آبریز تجن را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]



شکل ۴- نمودار منابع و مصارف آبی
Figure 4. Water Demand and resources diagram

نحوه تخصیص هر یک از نیازها از مخازن سدها، در جدول ۴ ارایه شد. از آنجایی‌که شرب و صنعت اولویت بالایی در تامین نیازها دارند، در تمامی مخازن تقریبا نیاز آنها برطرف شده است. ولی عمده‌ترین کمبودها در بخش کشاورزی مشاهده شده است که لزوم برداشت از سایر منابع را اجتناب‌ناپذیر نموده است. برای نمونه در بالادست سد فینسک، نیازهای کشاورزی ۱۸/۳۰ میلیون متر مکعب بوده است که میزان ذخایر سد، تنها قادر بوده ۶/۴۰ میلیون‌مترمکعب از آن را تامین نموده و ۱۱/۹ میلیون‌مترمکعب از آن به طور تامین‌نشده باقی خواهد ماند. از آنجایی‌که قابلیت تامین ۸۵ درصدی که غالبا برای ارزیابی نحوه تخصیص منابع آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی در نظر گرفته می‌شود، در این منطقه و برای نیاز کشاورزی آن تامین نشده است، منابع آبی موجود در منطقه برای تامین نیازهای آن کافی نیست. چنین روندی کم و بیش در بالادست سد شهید رجایی نیز مشاهده شده است و در بخش کشاورزی و سایر بخش‌ها حجم قابل توجهی به‌طور تامین نشده و کمبود مشاهده شده است. در بالادست سد شهید رجایی، با توجه به نیاز ۱۴۶ میلیون مترمکعبی نیاز کشاورزی، تنها ۹۲/۶۵ میلیون‌مترمکعب تامین شده که تنها ۶۵٪ از نیازهای آن تامین شده است. از سویی دیگر بالادست سد زارم، در بخش کشاورزی تقریبا ۵۶/۵۶ میلیون مترمکعب نیازها تامین شده و ۴۲ میلیون مترمکعب کمبود در این بخش مشاهده شده است. اما در بالادست بند انحرافی تجن با توجه به گستردگی منطقه، کمبودهای قابل ملاحظه‌ای در بخش کشاورزی مشاهده می‌شود. از مجموع ۴۶۲ میلیون متر مکعب نیاز کشاورزی، تنها ۱۰۴ میلیون متر مکعب توسط آب‌های سطحی تامین شده و تامین از آب‌بندان و آب زیرزمینی که به ترتیب ۹۸ و ۹۱/۵ میلیون‌مترمکعب است، تنها پاسخگوی ۶۳٪ نیازهای این منطقه می‌باشد. از این حیث و با توجه به لزوم تخصیص عادلانه آب در این منطقه و با توجه به رونق اقتصادی منطقه، تغییر الگوی کشت بایستی از جمله عمده‌ترین سناریوهای مدیریتی باشد که الزامات تخصیص بهینه را میسر نماید. در واقع می‌توان چنین بیان نمود ابتدا نیازهای اساسی منطقه تحت پوشش این سد تامین شود و بعد از آن نیازهای سایر شهرها، به‌عبارت دیگر آبرسانی به شهرستان نکا مدنظر است و از طرف دیگر الگوی کشت منطقه به‌دقت بررسی شود. زیرا تمامی نیازها از یک سو تحت پوشش قابلیت تامین ۸۵ درصدی نبوده و از سویی دیگر کمبودهای قابل ملاحظه‌ای نیز در آنها مشاهده می‌شود و از این حیث منطقه مورد بحث با الگوی کشت تحت پوشش آن و کمبود آبی مشاهده شده، لزوم تغییر الگوی کشت را ایجاب می‌نماید.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

جدول ۴- شبیه‌سازی تخصیص منابع آب در حوضه آبریز تجن

Table 4. summary of water allocation in TID

توضیحات	رودخانه تجن در محل سد فیسنک (MCM)	رودخانه تجن در محل سد شهید رجایی (MCM)	رودخانه تجن در محل سد زارم (MCM)	رودخانه تجن در محل بند انحرافی تجن (MCM)
ورودی	۳۲	۱۸۲	۱۴۰	۴۷۷
نیاز آبی قبل از مخازن	۳۳	-	۸/۰۳	۵۴
تامین نیاز آبی قبل از سد	۱۹	-	۸/۰۳	۵۴
ورودی به سد	۱۷	۱۸۲	۲۴۱	۱۹۲
حجم ذخیره در سد	۴۹	۶۰۰	۳۵۲	۳۹۰
تقاضای کشاورزی	۱۸	۱۴۶	۱۰۰	۴۶۲
تقاضای شرب	۲۰	۳۰	۴۷	-
تقاضای صنعت	-	۱۲	6	-
تقاضای محیط زیست	۲۰	۵۲	۲۸	۹۹
تامین کشاورزی	۶	۹۳	۵۷	۱۰۴
تامین شرب	۱۸	۳۰	۴۵/۷	-
تامین صنعت	-	۱۱	5	-
تامین زیست محیطی	۱۸	۵۰	۲۵/۳	۹۷
خروجی از سد بعد از تامین	۱۶	۱۴۳	۷۳	۵۴
تقاضای بعد از سد	۲۹	۵	۵/۰۵	۴۸۳
تامین بعد از سد	۱۷	۵	۵	۳۷۷
جریان اصلی رود قبل از انشعابات ورودی	۱۰۱	۳۲۳	۹۲	۴۳۳
جریان اصلی رود بعد از تامین و انشعابات ورودی	۹۱	۳۸۶	۱۱۷	-
جریان اصلی رود قبل از دریا	-	-	-	۳۳۳
آب قابل تبادل با سایر استانها	-	-	-	۲۴۳
برداشت از آب‌بندان	-	-	-	۹۸
برداشت از آب زیرزمینی			۴۲	۹۱/۵

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که با توجه به کمبودهای قابل ملاحظه‌ای که در هر یک از مناطق مشاهده می‌شود، تقریبا ۳۳۳ میلیون متر مکعب آن به دریا می‌ریزد و از طرفی دیگر تنها ۲۴۳ میلیون مترمکعب از این حجم قابل توجه قابل انتقال به سایر استان‌ها و یا مناطق دیگر خارج از حوضه ابریز می‌باشد. همچنین بررسی اجمالی جدول ۴ نشان می‌دهد که در حوضه آبریز تجن نیازهای شرب، صنعت و زیست محیطی تا حد قابل توجهی تامین شده است. به‌طوریکه از مجموع ۹۷ میلیون متر مکعب نیاز شرب، ۹۴ میلیون متر مکعب تامین شده است. همچنین با توجه به تقاضای ۱۸ میلیون متر مکعب صنعت و ۱۹۸ نیاز در بخش زیست‌محیطی، به‌ترتیب ۱۶/۵ و ۱۹۱ میلیون متر مکعب تامین شده است و در هر کدام این تقاضا بیش از ۹۵٪ قابلیت تامین صورت پذیرفته است.

برآورد پارامترهای اقتصادی در شرایط الگوی کشت موجود و کشت بهینه

با توجه به شرایط مذکور، پارامترهای اقتصادی کشت محصولات در حوضه آبریز بررسی شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. قیمت‌ها بر اساس نرخ مصوب سال ۱۳۹۸ برای محصولات تولیدی به ازای هر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به جدول ۵ بیشترین و کمترین نسبت درآمد به هزینه به‌ترتیب متعلق به سیاه‌ریشه و گندم است. همچنین متوسط نسبت درآمد به هزینه در این منطقه، ۲/۵۲ بوده و ناشی از کشت گیاهانی نظیر جالیزها و غلات است. بایستی توجه داشت کشت این گیاهان علاوه بر نیاز آبی کم، برای رفع احتیاجات کشاورزان نیز می‌باشد که لزوم کاشت آنها را در منطقه اجتناب ناپذیر می‌نماید.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

جدول ۵- پارامترهای اقتصادی برای سناریوی مرجع (میلیون ریال)

Table 5. Economic parameter for present scenario (Mrial)

شرایط موجود			
محصول زراعی	درآمد	هزینه	درآمد به هزینه
مرکبات	۱۶۹۱۰	۷۲۳۰	۲/۳۳
سیاه ریشه	۸۲۵۸۲۶	۱۶۴۳۴۸	۵/۰۲
شالی	۲۴۴۷۸۲	۱۰۳۸۲۰	۲/۳۵
جالیز	۲۹۲۲۱۰	۱۴۴۴۷۹	۲/۰
دانه‌های روغنی	۳۷۲	۱۶۹	۲/۲
ذرت دانه‌ای	۴۰	۱۶	۲/۵
ذرت علوفه‌ای	۴۹۳۴۴	۲۶۶۰	۱/۸۵
گندم	۱۹۴۶۶	۱۰۵۲۷	۱/۸۴
حبوبات	۲۲۲/۰۴	۸۰	۲/۸

پس از اجرای برنامه بهینه‌سازی لینگو و قیمت محصولات طبق مصوب سال ۱۳۹۸، نتایج زیر مطابق با جدول زیر برای هر مناطق بالادست مخازن بدست آمد. در این سناریو که براساس افزایش سوددهی به نفع آب منطقه‌ای است، تخصیص منابع آب به تقاضاها صورت گرفت. در این سناریو محدودیت حفظ مزارع باغی، محدودیت سطح زیر کشت و محدودیت منابع آب در نظر گرفته شده است. از این میان بیشترین درآمد به هزینه مربوط به سد فینسک و کمترین نیز مربوط به سد شهید رجایی است. بررسی جدول ۶ نشان می‌دهد که نسبت درآمد به هزینه برای منطقه فینسک بیشترین میزان بوده که طبق الگوی کشت بهینه پیشنهادی حبوبات، دانه‌های روغنی، جالیز، گندم، شالی و ذرت دانه‌ای تقریبا صفر محاسبه شده ولی سیاه ریشه، مرکبات و ذرت دانه‌ای حداکثر سطح زیر کشت مجاز را به‌خود اختصاص داده‌اند. بالادست سد شهید رجایی نیز کمترین نسبت درآمد به هزینه را به‌خود اختصاص داده است و این مسئله می‌تواند ناشی از این امر باشد که مدل بهینه‌سازی، سطح زیر کشت محصول گندم را تا حد زیادی افزایش داده است. در این منطقه با توجه به کمبودهای قابل ملاحظه‌ای که در تخصیص منابع آب قابل مشاهده است، کشت گندم می‌تواند در صرفه جویی منابع آب موثر باشد. از طرفی دیگر بررسی الگوی پیشنهادی بهینه نشان می‌دهد که تقریبا تمامی سطح زیر کشت محصولات به‌جز درختان میوه که دارای محدودیت حفظ سطح کشت باغات بودند، صفر در نظر گرفته شده و همین مسئله موجب کاهش چشمگیر نسبت درآمد به هزینه در این بخش شده است.

جدول ۶- برآورد درآمد به هزینه مناطق بالادست سدها در شرایط سناریوی سودآوری آب منطقه‌ای

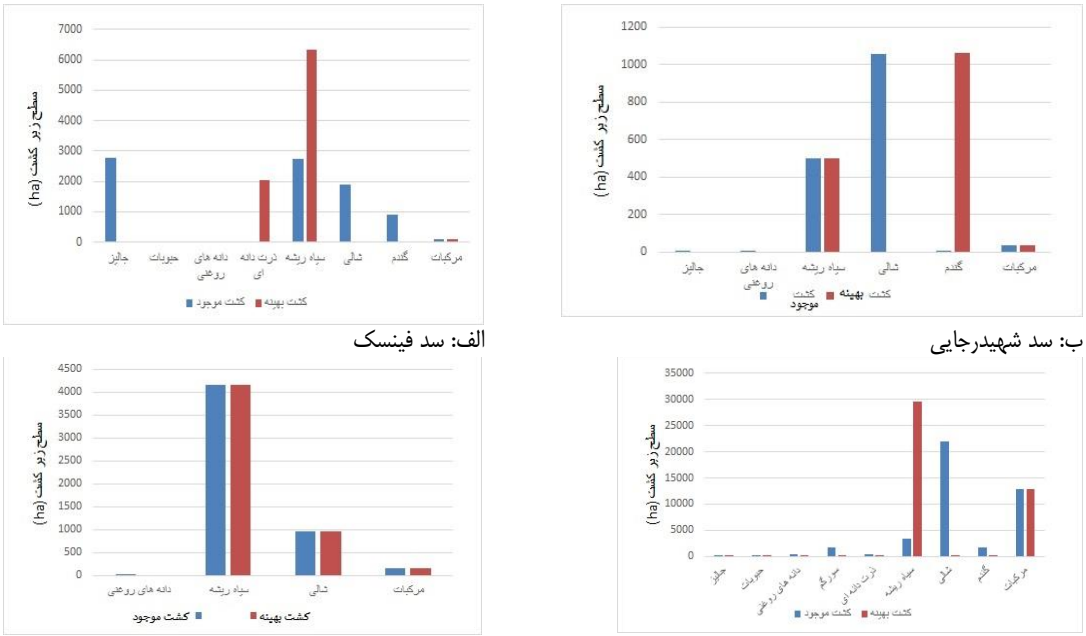
Table 6. Income to cost of upstream region of dams in beneficial Scenario for RW

	سد فینسک	سد شهید رجایی	سد زارم	بند انحرافی تجن
درآمد به هزینه	۴/۷	۳/۹	۴/۴	۴/۰۷

شکل ۵ الگوی کشت بهینه پیشنهادی توسط مدل را با الگوی کشت اجرا شده نسبت به سناریوی مرجع مقایسه می‌کند. آنچه از مشاهده این تصاویر استنباط می‌شود این است که در بیشتر این مناطق سطح زیر کشت مرکبات ثابت بوده و برای درختان سیاه‌ریشه یا افزایش یافته (بالادست بند انحرافی تجن و سد فینسک) یا ثابت مانده است. بالاترین سطح زیر کشت برای این محصول برای بالادست سد فینسک و بند انحرافی تجن به‌ترتیب ۶۳۳۰ و ۲۹۶۱۰ هکتار است، طبق نمودار و جدول زیر حداکثر سطح زیر کشت مجاز به آنها اختصاص داده شده است. در توجیه آن می‌توان چنین بیان داشت که سیاه‌ریشه با داشتن بالاترین نسبت درآمد به هزینه (۵/۰۲) سودآورترین محصول نسبت به دیگر محصولات در منطقه‌اند. برهمین اساس، افزایش سطح زیر کشت آنها می‌تواند بیشترین عملکرد را در جهت تامین هدف، که حداکثرسازی نسبت درآمد به هزینه است، داشته باشند. مقدار درآمد به هزینه باقی محصلات بین ۱/۸۴ تا ۲/۸ متغیر است و سطح زیر کشت آنها نسبت به حالت موجود تا حداکثر میزان ممکن کاهش یافته است. از سویی دیگر بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل با توجه به حفظ میزان حجم آب تخصیص یافته، همواره تمایل به کاهش سطح زیر کشت محصولات با درآمد به هزینه پایین و افزایش سطح زیر کشت محصولات با درآمد به هزینه بالا دارد. همچنین بررسی اجمالی شکل ۵ نشان می‌دهد که سطح زیر کشت دانه‌های روغنی و حبوبات در الگوی کشت بهینه صفر برآورد شده است، چنین روندی کم و بیش در مورد محصول شالی نیز صادق است. به‌طوریکه در بالادست سدها، سطح زیر کشت آن یا به صفر کاهش یافته یا لااقل مساوی شرایط موجود در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که این دو محصول نیاز آبی کمتری و از سویی دیگر درآمد به هزینه تقریبا بیشتری نسبت به برنج در این منطقه دارند، همچنین عملکرد نسبتا پایین دارند که ۲۶۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. از طرفی دیگر برنج که هم نیاز آبی بیشتری دارد و هم تنها ۶٪ نسبت درآمد به هزینه آن در مقایسه با دانه‌های روغنی بیشتر است، عملکردی تقریبا دو برابر آنها (۵۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) دارد و علت کاهش سطح زیر کشت آنها نسبت به برنج نیز همین عملکرد آنها است. لذا در فینسک، شهید رجایی و بند انحرافی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

تجن سطح زیر کشت برنج تقریبا برابر با صفر در نظر گرفته شده و تنها در بالادست زارم، سطح زیر کشت تقریبا برابر با شرایط موجود بود. در مورد گندم هم باید توجه داشت که نیاز آبی نسبتا کمتری به نسبت سیاه ریشه، مرکبات و برنج که به‌ترتیب عملکرد ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۵۲۴۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده، دارد و به‌طور موازی، کمترین درامد به هزینه را نیز به‌خود اختصاص داده که در مقایسه به سه محصول یاد شده، عملکرد بسیار کمتری دارد (۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار). بر همین اساس، در بالادست سد فینسک، سطح زیر کشت آن نسبت به حالت مرجع کاهش یافته است. کشت جالیز نیز در تمامی مناطق تقریبا برابر صفر در نظر گرفته شده است. بایستی توجه داشت که از یک سو عملکرد این محصول نسبت به سایر محصولات بیشترین میزان ثبت شده را دارد (۳۵۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و از سویی دیگر با توجه به کم-بودن نیاز آبی آن، درآمد به هزینه نسبتا کمی را به‌خود اختصاص داده است (نسبت درآمد به هزینه ۲). بر همین اساس برای دستیابی به بالاترین درآمد به هزینه بایستی سطح زیر کشت گیاهانی که درآمد به هزینه کمتری دارند کاهش یابد. چنین روندی به‌طور معکوس در مورد ذرت دانه‌ای نیز صادق است زیرا این گیاه نیاز آبی کمی داشته ولی عملکرد و نسبت درآمد به هزینه نسبتا مطلوبی در مقایسه با سایر محصولاتی که سطح زیر کشت آنها صفر شده دارد (به‌ترتیب ۷۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۲/۵) بر همین اساس مدل تمایل به افزایش سطح زیر کشت و در نتیجه دستیابی به سودآوری بیشتر دارد. همچنین باید توجه داشت که در بالادست فینسک برای دستیابی به حداکثر درآمد به هزینه در مقایسه با سایر مناطق، کاشت محصولاتی نظیر ذرت دانه‌ای، سیاه‌ریشه و مرکبات با نسبت درآمد به هزینه بالا، تاثیر بسزایی در افزایش درآمد به هزینه کلی این منطقه دارد.



الف: سد فینسک

ب: سد شهیدرجایی

ج: سد زارم

د: بند انحرافی تجن

شکل ۵- الگوی کشت بهینه مدل و موجود

Figure 5. Optimization cropping pattern in present and scenario

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که در صورتی‌که ضرایب اصلاحی مخزن و نیاز آبی به‌ترتیب ۱/۸ و ۰/۸ در مدل منظور شود، میزان RMSE و nRMSE آن به‌ترتیب ۰/۰۸ متر و ۱۲٪ برآورد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با مدل VENSIM نشان داد کمبودهای قابل ملاحظه‌ای در بخش کشاورزی مشاهده شده است. این مسئله باید از دیدگاه دیگری مورد توجه قرار گیرد و آن نحوه مدیریت دهانه آبگیر شبکه و کانال‌های ساخته شده است که با توجه به گستردگی مناطق تحت پوشش از یک سو و از سویی دیگر تنوع حقابه‌بران، بایستی تجدید نظر اساسی در این مورد صورت گیرد. در غیر اینصورت تغییر الگوی کشت تنها می‌تواند به سودآوری کمک نموده بدون آنکه تغییری در نحوه تخصیص منابع آب صورت گیرد. همچنین نتایج نشان داد که از مجموع ۱۰۴۴ میلیون‌مترمکعب کل تقاضا، ۶۲۰ میلیون‌مترمکعب آن تامین شده است. بخش کشاورزی با تقاضایی معادل ۷۳۰ میلیون‌مترمکعب، ٪۴۳ رهاسازی سد را به خود اختصاص داده است. اگرچه کمبودهای قابل ملاحظه‌ای در این بخش مشاهده شده و ۴۴٪ نیازها به‌صورت تامین نشده باقی مانده است، اما مخازن در حوضه آبریز تا حد قابل ملاحظه‌ای تقاضای شرب، صنعت و زیست‌محیطی را تامین نموده‌اند. در این میان سهم آب‌بندان که تنها محدود به پایاب بند انحرافی تجن است، ۹۸ میلیون‌مترمکعب و آب زیرزمینی نیز ۹۱/۵ میلیون‌مترمکعب است. همچنین نتایج تعیین الگوی کشت بهینه نیز نشان داد که سیاه‌ریشه با بالاترین نسبت درآمد به

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

هزینه از عمده‌ترین محصولاتی است که در تمامی مناطق به کشت آن ادامه داده شده و حتی در مناطقی نظیر پایاب بند انحرافی تجن و فینسک مقدار آن به بیش از ۶۰٪ و ۲۵٪ افزایش یافته است. از این میان دانه‌های روغنی و حبوبات با توجه به عملکرد نسبتا پایین و نیاز آبی قابل توجه نسبت به سایر محصولات از الگوی کشت حذف شده است.

منابع

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, D. Raes, J.L. Wright. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. J. Irrig. Drain. Eng., 131: 2-13.
2. Chapman, A., S. Darby. 2016. Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling. Sci. Total Environ, 559: 326-338.
3. Ford, A., 1999. Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems. 2nd. edn. Island Press, Washington, DC.
4. FAO. 2002. Yield Response to Water: the Original FAO Water Production Function.
5. Forrester, J.W., 1961. Industrial Dynamics. MIT Press Cambridge, MA.
6. Hassanzadeh, E. 2016. Integrated management of water resource systems under changing water availability, policy, and irrigation expansion plans. A thesis submitted to the college of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the department of civil and geological engineering university of saskatchewan Saskatoon.
7. Inam, A., J. Adamowski, J. Halbe, P. Shiv. 2015. Using causal loop diagrams for the initialization of stakeholder engagement in soil salinity management in agricultural watersheds in developing countries: A case study in the Rechna Doab watershed, Pakistan. Journal of Environmental Management, 152: 251-267.
8. Jeong, H., J. Adamowski. 2016. A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. Agricultural Water Management, 171: 89-107.
9. Kotir, J.H., C. Smith, G. Brown, N. Marshall and R. Johnstone. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Science of the Total Environment, 573: 444-457.
10. Liu, H., G. Benoit, T. Liu, Y. Liu, H. Guo. 2015b. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale. J. Environ. Manag, 155: 11-23.
11. Li, Z., C. Li, X. Wang, C. Peng, Y. Cai, W. Huang. 2018. A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in Zhengzhou City, China. J. of Hydrology, 556: 50-60.
12. Mirchi, A., D. Watkins Jr. 2013. A systems approach to holistic total maximum daily load policy: case of Lake Allegan, Michigan. J. Water Resour. Plan. Manag, 139: 544-553.
13. Madani, K. and M.A. Mariño. 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh- Rud river basin. Water Resour. Manage, 23: 2163-2187.
14. Manos, B., J. Papathanasiou, T. Bournaris and K. Voudouris. 2010. A multicriteria model for planning agricultural regions within a context of groundwater rational management. Journal of Environmental Management, 91: 1593- 600.
15. Mokhtari Motlagh, P., H. Sharifan. 2010. Evaluation of optimize crop pattern by Lingo (Hana-Samirom). First conference of Iran Irrigation and Drainage, (In persian).
16. Nozari H., V. Mohseni. 2012. Applying System Dynamics Approach for Simulation and Optimization of the Cropping Pattern in Esfahan Right Side Abshar Irrigation and Drainage Network. Iran Water and Soil researches, 36: 465-474.
17. Paudyal, G. and A. Dasgupta. 1990. A nonlinear chance constrained model for irrigation planning. Agric.Water Manage, 18(2): 87-100.
18. Rao, N.H., P.B.S. Sarma and S. Chander. 1996. Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water. Water Resource Res., 26: 551-559.
19. Stave, K.A. 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. Journal of Environmental Management, 67: 303-313.
20. Sahin, O., R.A. Stewart, M.G. Porter. 2016. Water security through scarcity pricing and reverse osmosis: a system dynamics approach. J. Clean. Prod, 88: 160-171.
21. Shahnazari, A. 2010. The report of Integrated water planning and DSS of demands and resources of Tajan Plain, (In Persian).
22. Sepaskhah, A.R. and A. Parand. 2006. Effects of alternate furrow irrigation with supplemental very furrow irrigation at different growth stages on the yield of maize (Zea mays L.). Plant Production Science, 9(4): 415-421.
23. Shangguan, Z., M. Shao and R. Horton. 2002. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. J. Agric. Water Manage, 52: 139-154.
24. Sabaghi. M., A. Shanazari, A.N. Ziaii. 2019. Simulation and Operation Evaluation of Shahid Yaghoobi Dam by using System Dynamic (Case study: Dam Shahid Yaghoobi). Journal of Watershed Management Research, 8(16): 188-199 (In Persian).
25. Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1: 6-10.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]

Evaluation of Optimal Cropping Pattern in Tajan Watershed with Systematic Modeling

Seyed Fatemeh Hashemi[1], Ali Shanazari[2], Mahmood Rayini[3], Mohammada Shahbazbegian[4] and Jan Franklin Adamowski[5]

1- Ph.D. Student, of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Professor of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(Corresponding author: aliponh@yahoo.com)
3- Professor of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
4- Assistant Professor Geography and Spatial Planning Department at Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
5- Associate Professor, Department of Bioresource Engineering, McGill University
Received: October 22, 2019 Accepted: December 24, 2019

Abstract

Since in the optimal allocation of water resources, the maximization of income, is the main purpose of modeling, researches in this case is just limited to approaches rooted in linear and structures in mental model or causes the inequitable resources allocation. Also, evaluation of these researches showed that there is low knowledge about long term dynamics behavior in river watershed. In this regard, in this study, evaluation of optimal cropping pattern based on water resources and demand in Tajan watershed by VENSIM in 1962- 2012 in monthly times step was carried out which domestic, industrial, environmental and agricultural demand were taken into account. This optimal cropping pattern could be the basis for water productivity in Tajan watershed. The calibration results showed not only outflow of dams is related to demands, but also dams coefficient is independent from agricultural demands coefficient. Also the results showed that large amount of domestic, industrial and environmental demand in this region is supplied and dams in Tajan watershed is enough for suppling. But there is significant deficit in agricultural part that regarding to low volume of groundwater in this region, changing crop pattern s inevitable. O the other hand, evaluation of optimal crop pattern is showed that orchards with maximum income per cost in the all region, is dedicated the most *cultivated land area* and after that citrus have second priority.

Keywords: Income to Cost, Nonlinear Optimization, Tajan Watershed, VENSIM, Water Demand and Resources Allocation

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.15.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.155]