ارزیابی اثرات اقتصادی کاهش آورد رودخانه سفیدرود بر کشاورزی در استان گیلان

محمد کاوسی کلاشمی*[۱]، غلامرضا پیکانی ماچیانی[۲]

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۴

چکیده

در انتهایی‌ترین قسمت حوضه سفیدرود بزرگ، رودخانه قزل اوزن پس از مخلوط شدن با رودخانه شاهرود به رودخانه سفیدرود تغییر نام می‌دهد. این رودخانه ۸۰٪ آب آبیاری تنظیم شده استان گیلان را تامین می‌نماید. در سال‌های اخیر بدون توجه به منابع آب کل حوضه آبریز قزل اوزن- سفیدرود، سازه‌های تنظیم و ذخیره‌سازی آب متعددی در استان‌های بالادست این حوضه آبریز احداث شد. پیامد این رویکرد، کاهش آب ورودی و ایجاد بحران مدیریت منابع آب در استان گیلان می‌باشد. پژوهش حاضر با استفاده از الگوی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود، دید جامعی از اثرات کاهش آورد رودخانه سفیدرود بر مصارف مختلف در این حوضه تحت سناریوهای مختلف ارائه می‌دهد. در این راستا، طیف وسیعی از داده‌های هیدرولوژیکی و اقتصادی حوضه رودخانه سفیدرود مانند میزان رواناب، میزان آب سطحی انحراف داده شده، میزان جریان برگشتی، میزان عملکرد، درآمد و هزینه تولید رشته فعالیت‌های کشاورزی و ... در الگوسازی لحاظ شد. نتایج به‌دست آمده از الگوی یکپارچه حوضه رودخانه سفیدرود بیانگر آن است که به طور متوسط کل منافع اقتصادی از دست رفته در مصارف حوضه رودخانه سفیدرود به ازای هر متر مکعب کاهش آورد آبریز قزل اوزن- سفیدرود برابر با ۱۱۳۸ ریال می‌باشد. همچنین تحت سناریوهای مورد بررسی، میانگین منافع اقتصادی از دست رفته در مصارف کشاورزی حوضه رودخانه سفیدرود به ازای هر متر مکعب کاهش آورد آبریز قزل اوزن- سفیدرود برابر با ۱۱۰۰ ریال می‌باشد. بازنگری در چگونگی ارزیابی فنی- اقتصادی طرح‌های توسعه منابع آب در بالادست و اتخاذ رویکرد یکپارچه تصمیم‌گیری برای این حوضه ضرورنی انکارناپذیر است.

طبقه‌بندی JEL: *C60، C61، Q25*

واژه‌های کلیدی: الگوسازی اقتصادی- هیدرولوژیکی، کاهش آورد، رودخانه سفیدرود، استان گیلان.

۱- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی، دانشگاه تهران.

* نویسنده‌ی مسئول مقاله: mkavoosi@guilan.ac.ir

پیشگفتار

حوضه آبریز سفیدرود بزرگ در تقسیم بندی کلی هیدرولوژی ایران، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر محسوب شده و در محدوده تلاقی رشته کوه‌های البرز و زاگرس و مرکزی قرار دارد. حوضه آبریز سفیدرود(قزل‌اوزن- سفیدرود) ۳۴٪ مساحت حوضه درجه یک دریای خزر را به خود اختصاص داده و بزرگ‌ترین حوضه درجه دو در میان زیرحوضه‌های این حوضه درجه یک محسوب می‌شود. کل ظرفیت منابع آب حوضه آبریز سفیدرود برابر با ۶/۹ میلیارد مترمکعب است(جایکا[1]، ۲۰۱۰). حوضه آبریز سفیدرود ۶٪ کل سطح زیر کشت گندم، ۵٪ کل سطح زیر کشت جو و ۵۲٪ کل سطح زیر کشت برنج ایران را دارا می‌باشد(سالنامه آماری ایران، ۱۳۸۵).

اهمیت عرضه پایدار منابع آب در حوضه آبریز سفیدرود به سبب تامین آب مورد نیاز ۱۸۹ هزار هکتار از اراضی شالیکاری استان گیلان از محل این حوضه آبریز است. در انتهایی‌ترین قسمت این حوضه، رودخانه قزل اوزن پس از مخلوط شدن با رودخانه شاهرود به رودخانه سفیدرود تغییر نام داده، رو به سوی شمال شرقی جریان یافته و وارد محدوده شهرستان رودبار در استان گیلان می‌شود. آبیاری جلگه گیلان مهم‌ترین نقش رودخانه سفیدرود بوده و پس از سال ۱۳۴۰ شبکه‌ها و زهکشی‌های گسترده‌ای از این رودخانه به منظور آبیاری جلگه حاصلخیز گیلان ایجاد گردید (جایکا، ۲۰۱۰). در این راستا، یک سد مخزنی و سه سد انحرافی روی رودخانه سفیدرود احداث شده است. پیش از احداث سد و شبکه سفیدرود نیز تامین آب ۱۱۰ هزار هکتار از اراضی شالیکاری استان گیلان به روش‌های سنتی از رودخانه سفیدرود صورت می‌گرفت. در شرایط کنونی، تامین آب ۱۸۹ هزار هکتار از اراضی شالیکاری استان گیلان از طریق سد و شبکه سفیدرود انجام می‌پذیرد(شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان، ۱۳۹۰). از این رو، تولید محصول راهبردی برنج در استان گیلان وابسته به عرضه و تامین مناسب و کافی آب از محل حوضه آبریز سفیدرود و رودخانه سفیدرود می‌باشد.

رودخانه سفیدرود مهم‌ترین رودخانه تامین‌کننده آب تنظیمی استان گیلان است. به نحوی که این رودخانه حدود ۸۰٪ آب تنظیم شده استان گیلان را تامین می‌نماید. متوسط آورد ۴۶ ساله (۸۹-۱۳۴۲) این رودخانه در حدود ۴/۲ میلیارد مترمکعب می‌باشد. این در حالی است که متوسط آبدهی یک دهه اخیر(۸۹-۱۳۷۹) رودخانه سفیدرود معادل با ۲/۲ میلیارد متر مکعب است. در دهه ۱۳۳۰ برنامه‌ریزی منابع آب با توجه به متوسط آبدهی رودخانه‌ها صورت گرفته و مشاور سوگرا ۳/۶ میلیارد مترمکعب از محل آورد رودخانه سفیدرود برای برنامه‌ریزی منابع آب استان گیلان منظور نموده است. امروزه برنامه‌ریزی منابع آب بر مبنای متوسط آبدهی رودخانه صورت نگرفته، بلکه

1- JICA

آبدهی رودخانه با احتمال ۸۰٪(از هر ۱۰ سال ۸ سال آب مطمئن تامین شود و این میزان برای آب شرب ۱۰۰٪ است) مبنای برنامه‌ریزی می‌باشد. براساس برآوردها میزان آبدهی رودخانه سفیدرود با احتمال ۸۰٪ در حدود ۲/۷ میلیارد متر مکعب است. براساس برنامه‌ریزی مهندسین مشاور سوگرا، حداقل نیاز آبخور سد سفیدرود ۳۶۴۴ میلیون متر مکعب در هر سال بوده که شامل ۲۶۶۸ میلیون متر مکعب نیاز آبیاری اراضی شالیکاری، ۲۰۰ میلیون مترمکعب نیاز پرورش ماهی، ۱۷۴/۳ میلیون متر مکعب نیاز شهری، ۲۰ میلیون متر مکعب مصارف صنعتی و ۵۸۱/۷ میلیون متر مکعب نیاز محیط زیست است. منبع اصلی تامین آب در این برنامه‌ریزی سد مخزنی سفیدرود می‌باشد. حجم اولیه سد سفیدرود ۱/۸ میلیارد متر مکعب بوده و قدرت تنظیم آن ۲/۳ میلیارد متر مکعب است. در حدود یک سوم(۷۰۰ میلیون متر مکعب) از حجم مخزن سد سفیدرود از رسوبات انباشته شده و ۲/۳ حجم آن با انجام عملیات شاس و با استفاده از آورد رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود احیاء می‌شود.

کاهش آورد رودخانه سفیدرود با توجه به وابستگی استان گیلان به آب تنظیمی سد سفیدرود، اثرات جبران ناپذیری برای این استان در پی دارد. به منظور تعیین میزان وابستگی استان گیلان به منبع یادشده، بررسی پتانسیل آبی این استان شایان توجه است. پتانسیل آبی سالیانه استان گیلان نزدیک به ۱۰/۸ میلیارد متر مکعب بوده که از این مقدار ۹/۹ میلیارد مترمکعب آب سطحی و ۰/۹ میلیارد مترمکعب آب زیرزمینی می‌باشد. از ۹/۹ میلیارد مترمکعب آب سطحی در حدود ۴/۵ میلیارد مترمکعب مربوط به آورد رودخانه سفیدرود بوده که حوضه آبریز آن خارج از استان گیلان بوده و بقیه یعنی مقدار ۵/۴ میلیارد مترمکعب مربوط به رودخانه‌های داخلی استان گیلان است که به علت طبیعت رودخانه‌های داخلی استان از جمله واقع شدن در دشت و نداشتن سایت‌های مناسب جهت احداث سد عملا از دسترس خارج می‌شود. از ۰/۹ میلیارد مترمکعب پتانسیل آب زیرزمینی نیز نمی‌توان بیش از ۴۸۰ میلیون مترمکعب آن را به دلیل نزدیکی دریای خزر و واقع شدن استان گیلان بر روی بستری از آب شور، بهره‌برداری نمود. در شرایط کنونی از ۴۸۰ میلیون متر مکعب مقداری معادل با ۳۰۰ میلیون متر مکعب صرف شرب، صنعت و کشاورزی می‌شود.

در بالادست این حوضه استان‌هایی نظیر اردبیل، کردستان و زنجان اقتصادی مبتنی بر کشاورزی دارند. در حالی که آذربایجان شرقی استانی صنعتی است. در پایین دست نیز استان گیلان یکی از قطب‌های اصلی تولید محصول راهبردی برنج می‌باشد. سطح مدیریتی توجه به کارایی و برابری در توزیع آب حوضه آبریز سفیدرود مورد تاکید همگی برنامه‌ریزان استانی می‌باشد. کارایی به مفهوم دستیابی به تولید بیشینه با تخصیص بهینه منابع آب است. برابری نیز به مفهوم برقراری عدالت اجتماعی با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی هر یک از استان‌های حوضه سفیدرود می‌باشد.

استان‌های بالادست خواهان تخصیص آب بر مبنای ظرفیت توسعه اقتصادی آتی بوده، اما استان پایین دست(گیلان) بر شرایط کنونی مصرف آب و حق آبه تاریخی تاکید دارد.

در سال‌های اخیر، بدون توجه به منابع آب کل حوضه آبریز سفیدرود(قزل اوزن- سفیدرود)، با اتخاذ رویکرد تامین منابع آب و پاسخگویی به تقاضای جدید در بالادست، سازه‌های تنظیم و ذخیره‌سازی آب متعددی در استان‌های بالادست حوضه آبریز احداث شده است. پیامد این رویکرد، ایجاد بحران مدیریت منابع آب در انتهایی‌ترین استان آبخور حوضه، یعنی استان گیلان می‌باشد. کاهش شدید منابع آب ورودی به سد سفیدرود، عرضه به موقع و مناسب آب به لحاظ کمی و کیفی برای ۱۸۹ هزار هکتار اراضی کشاورزی تحت پوشش این رودخانه که معیشت ۱/۲ میلیون نفر وابسته به آن بوده را با چالش مواجه ساخته است. سد مخزنی سفیدرود منبع اصلی تامین آب برای مصارف کشاورزی در استان گیلان است. قدرت تنظیمی سد سفیدرود به طور متوسط طی دو دهه اخیر برابر با ۲/۲ میلیارد متر مکعب بوده است(شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان، ۱۳۹۰). در حالی که مطالعه یکپارچه برنامه‌ریزی منابع آب قزل اوزن- سفیدرود(۱۳۸۵) نیاز استان گیلان به تامین آب از طریق سفیدرود را به میزان ۲/۲۵ میلیارد متر مکعب اعلام نموده است. احداث و توسعه طرح‌های آبی در بالادست حوضه آبریز سفیدرود وضعیت چندان مطلوبی را برای تامین آب استان گیلان ترسیم نمی‌نمایند. زیر پا گذاشتن حق آبه سنواتی و تاریخی استان گیلان از حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود پیامدهای مهم و خطیری را برای بخش‌های مختلف اقتصادی به همراه خواهد داشت. از این رو تلاش برای ارزیابی خسارات ناشی از باز توزیع و انتقال آب کشاورزی حوضه رودخانه سفیدرود، می‌تواند نقش شایان توجهی در بهبود و بازنگری در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای مدیریت منابع آب داشته باشد.

با توجه به نقش استان گیلان در تولید محصول راهبردی برنج، ساختار اقتصادی مبتنی بر کشاورزی این استان و وابستگی بخش کشاورزی استان گیلان به آورد آب رودخانه سفیدرود، هرگونه تغییر در حق آبه این استان باید با در نظر گرفتن اثرات جامع کوتاه‌مدت و بلندمدت بر سامانه اقتصادی استان گیلان و تعریف مکانیزم‌هایی برای جبران خسارت‌های ایجاد شده صورت گیرد. پژوهش حاضر به منظور پاسخگویی به مهم‌ترین پرسش‌های ایجاد شده بر اثر این تصمیم سیاستی باز توزیع آب شکل گرفته است.

در دهه‌های اخیر استفاده گسترده‌ای از تحلیل‌های سیستمی در راستای مساعدت به مدیریت منابع آب صورت گرفته است. در این تحلیل‌ها، اغلب رهیافت‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به منظور تدوین راهبردهای سیاست‌گزاری در قالبی یکپارچه به‌کار می‌رود. با رشد کمیابی و افزایش رقابت برای آب، مدیریت یکپارچه منابع آب بر پایه سیاست‌های تخصیصی کارا، عادلانه و پایدار، اهمیت

روزافزونی پیدا نموده است. تدوین چنین سیاست‌های نیاز به واحدهای تصمیم‌گیری جامع و مناسب دارد. حوضه‌های آبی و رودخانه‌ای مناسب‌ترین چارچوب تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت منابع آب بوده است. زیرا امکان الگوسازی روابط هیدرولوژیکی، اقتصادی و نهادی موجود و ارزیابی واکنش متقابل بین آنها تحت سناریوهای مختلف سیاستی را فراهم می‌آورد. الگوسازی همزمان روابط هیدرولوژیکی، اقتصادی و نهادی موجود در یک حوضه آبی به منظور شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی راهبردهای مدیریت منابع آب را الگوسازی اقتصادی- هیدرولوژیکی یا به اختصار هیدرواقتصادی می‌نامند(هینز و همکاران، ۲۰۰۷).

ایجاد الگوی هیدرواقتصادی براساس توزیع مکانی اجزاء هیدرولوژیکی و مهندسی سیستم آب مورد ارزیابی می‌باشد. در این راستا، نمای کلی سیستم آب شامل اجزاء تراز آب(جریان رودخانه، تبخیر از آب سطحی، تخلیه و تزریق آب به سفره‌های زیرزمینی و جریان بازگشتی) و زیرساخت‌های عملیاتی مرتبط با عرضه آب(کانال‌ها، مخازن آب، سازه کاهش شوری، سازه تصفیه آب و فاضلاب، ایستگاه پمپاژ آب زیرزمینی، خط لوله، حوضه‌های تزریق مصنوعی و سازه حفظ آب زیرزمینی) ترسیم می‌شود. این نمای کلی که ویژگی‌های هیدرولوژیکی و مهندسی سیستم آب را نشان داده است، در قالب یک شبکه گره-ارتباط [1] نشان داده می‌شود. شبکه گره-ارتباط تمامی اجزاء مکانی، فیزیکی و اقتصادی سیستم آب را دربر داشته و آنها را در قالبی یکپارچه ارائه می‌دهد. در واقع، شبکه گره- اتصال نمایی ساده از یک حوضه آبی یا سیستم رودخانه بوده که بر مبنای آن الگوسازی هیدرواقتصادی شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. در این شبکه، گره‌ها بیانگر تاسیسات فیزیکی و اتصال‌ها نشان دهنده ارتباط بین تاسیسات فیزیکی می‌باشد(هارو و همکاران، ۲۰۰۹).

الگوسازی هیدرواقتصادی در سال‌های اخیر نقش شایان توجهی در حوزه سیاست‌گذاری منابع آب داشته است. مانتا و همکاران(۲۰۰۷) با استفاده از الگوی هیدرواقتصادی اثرات دسترسی به آب آبیاری، تغییر هزینه استفاده از آب آبیاری و بهبود سیاست‌های آب در بخش کشاورزی را مورد ارزیابی دادند. نتایج نشان داد که توسعه کشاورزی در حوضه اگرچه منجر به افزایش تولید ناخالص داخلی منطقه‌ای، افزایش اشتغال روستایی و کاهش فقر شده است؛ اما فشار قابل توجهی بر جریان‌های محیط‌زیستی وارد می‌نماید. با استفاده از الگوی اقتصادی اثر کاهش آورد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصدی بر سطح زیر کشت و ترکیب الگوی کشت در مناطق مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت.

1- Node-Link Network

مطالعه هارد و کونراد(۲۰۰۷) به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه آبریز ریوگراند[1] آمریکا از یک الگوی هیدرواقتصادی مبتنی بر شبیه‌سازی بهره برد. در این راستا، مقادیر پارامترهای اقلیمی، جریان رواناب و موجودی منابع آب تحت سه سناریوی ترسالی، نرمال و خشکسالی برای دوره‌های زمانی ۲۰۳۹-۲۰۲۰ و ۲۰۸۹-۲۰۷۰ پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که افزایش ۴۷/۵ و ۷۵/۷ درصدی در مقدار جمعیت(بدون تغییر اقلیم) به ترتیب برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۸۰ به افزایش ۴۷ و ۸۱ درصدی ارزش اقتصادی آب منجر می‌شود. همچنین تغییر پیش‌بینی‌شده در اقلیم برای دهه ۲۰۳۰ به افزایش ۱۵ تا ۶۰ درصدی ارزش اقتصادی آب منجر شده و این افزایش در ارزش آب برای دهه ۲۰۸۰ از ۱۱ تا ۲۰۰ درصد به ترتیب در سناریوهای ترسالی و خشکسالی پیش‌بینی شده است. زیان مستقیم اقتصادی ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز رودخانه ریوگراند در بدترین سناریوی تغییر اقلیمی یا کاهش ۳۰ درصدی حجم رواناب برای سال ۲۰۸۰، بیش از ۱۰۰ میلیون دلار برآورد شده که با احتساب زیان‌های غیرمستقیم اقتصادی، رقم آن به بیش از ۲۰۰ میلیون دلار می‌رسد.

هاویت و همکاران(۲۰۱۰) با استفاده از الگوسازی هیدرواقتصادی، یک الگوی جامع تولید کشاورزی در سطح ایالت کالیفرنیا[2] آمریکا ایجاد نمودند. هدف از ایجاد الگو ارزیابی واکنش‌ها در ۵ سناریوی ایجاد بازار آب در شرایط خشکسالی، تغییر اقلیم و اثرات آن بر بخش کشاورزی، کاهش عملکرد و درآمد کشاورزی بر اثر شوری خاک، ارزیابی برنامه جامع کشاورزی و اثرات اقتصادی خشکسالی رخ داده در سال ۲۰۰۹ می‌باشد.

گراولین و همکاران(۲۰۱۴) با استفاده از الگوی هیدرواقتصادی اثرات کم آبی را در حوضه رودخانه گللگو[3] اسپانیا مورد ارزیابی قرار دادند. در این راستا، ۵ سناریوی مختلف طراحی و تغییر در منافع اقتصادی حوضه بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که تغییر اقلیم منجر به کاهش ۸ درصدی درآمد منطقه‌ای کشاورزی شده است؛ در حالی که توسعه سدها در حوضه یادشده جلوی این کاهش را می‌گیرد.

پژوهش‌های صورت گرفته در حوضه رودخانه سفیدرود نتوانسته‌اند پرسش‌های مطرح شده در این مطالعه را پاسخ دهند. از این رو، تحقق اهداف پژوهش حاضر با استفاده از الگوسازی هیدرواقتصادی ضرورتی انکارناپذیر است.

1- Rio Grande
2- California
3- Gallego

با توجه به اهمیت و حساسیت موضوع مطرح شده در بخش بعد، با ارائه یک رهیافت مناسب در قالب الگوسازی هیدرواقتصادی سعی شده تا اثرات اقتصادی کاهش آورد رودخانه سفیدرود بر کشاورزی در استان گیلان مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور ایجاد الگوی برنامه‌ریزی ریاضی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود سه مرحله اصلی شامل تهیه نقشه شماتیک حوضه رودخانه، تبدیل حوضه به یک واحد سیستمی و ایجاد بلوک معادلات مدنظر قرار گرفت. پس از تهیه نقشه حوضه بر مبنای مستندات موجود و مشاهدات میدانی، گام بعدی در راستای الگوسازی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود، تبدیل آن به یک واحد سیستمی است. این مرحله شامل شناسایی گره‌های مختلف مصرفی موجود در حوضه رودخانه، ایجاد ترازهای هیدرولوژیکی مورد نیاز و ارتباط دادن گره‌های موجود با یکدیگر می‌باشد. گره‌های موجود در شبکه شامل گره‌های منبع(رودخانه‌ها، مخازن آب و سفره‌های آب زیرزمینی) و گره‌های تقاضا(تقاضای آب کشاورزی، صنعتی و شهری) می‌باشد. گره‌های تقاضای آب کشاورزی براساس ناحیه‌های عمده آبیاری مشخص می‌شود. در هر گره تقاضای کشاورزی، آب به یک سری از محصولات کشاورزی براساس نیاز آبی و سودآوردی اقتصادی تخصیص داده می‌شود. مصارف رقیب در یک حوضه رودخانه به دو دسته مصارف آب در جریان[1] و خارج از جریان[2] دسته‌بندی می‌شوند. مصارف در جریان آب شامل تصفیه پسماندها، تفریحات آبی و تولید برق‌آبی است. مصارف خارج از جریان نیز شامل انحراف آب سطحی برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری می‌باشد. به منظور تشکیل تابع هدف در الگوهای هیدرواقتصادی لازم است تا مصارف آب ارزش‌گذاری شوند. ارزش‌گذاری مصارف در جریان و خارج از جریان آب اغلب در قالب یک تابع هدف اقتصادی واحد صورت گرفته که با توجه به روابط هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی و نهادی مقید می‌شود.

پس از شناسایی و معرفی گره‌های مختلف موجود در حوضه رودخانه، ایجاد دو تراز اصلی هیدرولوژیکی مدنظر قرار گرفت. اولین تراز، تراز هیدرولوژیکی[3] یا تراز گیج[4](هیدرومتری) بوده که چارچوبی برای نشان دادن اثرپذیری رواناب یا جریان عبوری از یک نقطه مشخص در حوضه رودخانه از رواناب سایر گره‌های موجود در حوضه رودخانه سفیدرود است. با فرض وجود رواناب در

1- In-stream water use
2- Off-stream water use
3- Hydrological Balance
4- Gauge Balance

شش نوع گره موجود در حوضه رودخانه، اگر رواناب گره‌های سرچشمه با WF_i، رواناب گره‌های هیدرومتری یا آب‌سنجی با WF_r، رواناب گره‌های انحراف سطحی با WF_d، رواناب گره‌های جریان بازگشتی با WF_e، رواناب گره‌های پمپاژ آب با WF_g و رواناب گره‌های رهاسازی مخازن آب با WF_lنشان داده شود، می‌توان این تراز را به شکل زیر نشان داد.

$$EWF_r = E_{hv} WF_i + E_{rv} WF_r + E_{dv} WF_d + E_{ev} WF_e + E_{gv} WF_g + E_{lv} WF_l \quad (۱)$$

در رابطه فوق، E_{hv} ماتریس اثرگذاری گره‌های سرچشمه، E_{rv} ماتریس اثرگذاری گره‌های هیدرومتری، E_{dv} ماتریس اثرگذاری گره‌های انحراف سطحی، E_{ev} ماتریس اثرگذاری گره‌های جریان بازگشتی، E_{gv} ماتریس اثرگذاری گره‌های پمپاژ آب و E_{lv} ماتریس اثرگذاری گره‌های رهاسازی مخازن آب است. تجمیع معادله فوق برای تمامی گره‌های هیدرومتری حوضه رودخانه سفیدرود صورت گرفته و منجر به تشکیل ماتریسی با ابعاد i×r شده که iبرابر با مجموع تعداد گره‌های اثرگذار موجود در حوضه رودخانه می‌باشد. تشکیل این تراز به منظور برقراری تراز ماده در سیستم حوضه رودخانه بوده و استفاده از تعداد بیشتر گره‌های هیدرومتری دقت بیشتر در الگوسازی سیستم حوضه رودخانه سفیدرود را در پی دارد. هر یک از درایه‌های موجود در ماتریس‌های اثرگذاری می‌تواند سه ارزش، صفر برای منابع بالادست فاقد مشارکت رواناب، ۱+ برای منابعی که به جریان اضافه نموده و ۱- برای منابعی که از جریان می‌کاهند را به خود اختصاص می‌دهند.

دیگر تراز مورد نیاز برای تبدیل حوضه رودخانه به یک واحد سیستمی، تراز انحراف سطحی یا جدول رودخانه خیس[1] می‌باشد. در این تراز به ازای هر گره انحراف سطحی، شرایط زیر باید برقرار شود.

$$EWF_d = E_{hd} WF_i + E_{rd} WF_r + E_{dd} WF_d + E_{ed} WF_e + E_{gd} WF_g + E_{ld} WF_l \quad (۲)$$

همانند تراز هیدرولوژیکی، متغیرهای WF بیانگر رواناب در گره‌های مختلف و E ماتریس‌های اثرگذاری رواناب در گره‌های مختلف بر رواناب در گره انحراف سطحی معین می‌باشد. تجمیع معادله فوق بر روی تمامی گره‌های انحراف سطحی منجر به تشکیل ماتریسی با ابعاد i×d می‌شود. این تراز واکنش متقابل رواناب بین گره‌های انحراف سطحی و سایر گره‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر دو مورد فوق در تبدیل حوضه رودخانه به یک واحد سیستمی از ماتریس‌های اتصال نیز برای ارتباط دادن گره‌های مختلف به یکدیگر استفاده می‌شود. مهم‌ترین این ماتریس‌های اتصال شامل ماتریس اتصال گره مخزن آب به گره رهاسازی آب، اتصال گره آب سطحی انحراف داده شده به گره

1- Wet River Table

آب مصرف شده، اتصال گره آب سطحی انحراف داده شده به گره آب برگشتی و اتصال گره نفوذ آب به گره آب به‌کار برده شده می‌باشند.

در مرحله بعد طراحی و ایجاد بلوک معادلات مدنظر قرار می‌گیرد. اگرچه گستردگی معادلات امکان بیان تمامی روابط مورد استفاده در الگوسازی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی را نمی‌دهد؛ اما می‌توان مهم‌ترین روابط مورد استفاده را به تفکیک بلوک‌های مختلف معادلات تشریح نمود. چهار بلوک عمده مورد استفاده در الگوسازی حوضه رودخانه سفیدرود شامل بلوک معادلات زمین، بلوک معادلات هیدرولوژیکی، بلوک منافع و هزینه‌های اقتصادی و بلوک قیدهای ساختاری و نهادی می‌باشد. در بلوک معادلات زمین سه معادله اصلی مورد استفاده به شرح زیر است.

$$\sum_{j}\sum_{k} AC_{u_1jkt} \le LAND_{u_1} \qquad \forall u_1 \qquad (۳)$$

که در آن، اندیس j بیانگر رشته فعالیت‌های تولیدی کشاورزی، اندیس k فناوری‌های مختلف تولید یا آبیاری، AC_{u1jkt} سطح رشته فعالیت j با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t و $LAND_{u1}$ اراضی موجود در منطقه آبیاری u_1 می‌باشد. رابطه فوق، محدودیت سطوح زیرکشت در مناطق آبیاری مختلف حوضه رودخانه را نشان می‌دهد. تغییر سطح رشته فعالیت‌های تولیدی در دوره‌های زمانی در هر منطقه آبیاری باید بر مبنای مطالعات تناسب اراضی آن منطقه صورت گیرد. از این رو دومین معادله اصلی مورد استفاده در بلوک زمین مربوط به این محدودیت است. سومین معادله مورد استفاده در این بلوک، تجمیع سطوح زیرکشت در مناطق آبیاری مختلف حوضه رودخانه سفیدرود را نشان می‌دهد.

دومین بلوک معادلات اصلی مورد استفاده در الگوسازی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی، در برگیرنده روابط هیدرولوژیکی، منابع و مصارف آب و ویژگی‌های تاسیسات آب موجود در حوضه رودخانه می‌باشد. اگرچه این بلوک نیز حسب نیاز پژوهشگر می‌تواند معادلات مختلفی را در خود جای دهد، اما معادله‌های پایه این بلوک به قرار زیر است.

$$WF_{it} = S1^{w}_{it} + S2^{w}_{it} + GS^{w}_{gt} \qquad (۴)$$

که در آن، WF_{it} حجم رواناب ورودی به حوضه در سال t بوده که از جمع رواناب رودخانه‌ها، چشمه‌ها و منابع محلی($S1^{w}_{it}$)، رودخانه‌ها، چشمه‌ها و منابع اصلی($S2^{w}_{it}$) و پمپاژ(GS^{w}_{gt}) تشکیل می‌شود.

به منظور الگوسازی رواناب انحراف داده شده، مصرف شده و برگشتی در گره‌های تقاضای کشاورزی نیاز به ایجاد ماتریس تقاضای آب(WBU_{ijk}) است. ماتریس تقاضای آب به تفکیک مقدار رواناب انحراف داده شده(d_1)، مصرف شده(u_1) و برگشتی(e_1) در واحد سطح، برای هر رشته فعالیت تولیدی j تشکیل شده و در صورت وجود فناوری‌های تولید یا آبیاری مختلف(k) این ماتریس

گسترش خواهد یافت. معادله رواناب انحراف سطحی(WF_{d1t}) با توجه به موارد فوق به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$WF_{d_1t} = \sum_j \sum_k WBU_{d_1jk} \sum_{u_1} IDdu_{d_1u_1} AC_{u_1jkt} \quad (۵)$$

با توجه به ماهیت پویای تحلیل و طبیعت زنجیره‌ای متغیرهای تصمیم نیاز به ارتباط زنجیره‌ای متغیرهای تصمیم در الگوسازی اقتصادی- هیدرولوژیکی است. در این راستا، با توجه به جهت زنجیره تصمیم از رواناب مصرف شده به انحراف داده شده، ماتریس مشخصه ارتباط رواناب مصرف شده با رواناب انحراف داده شده($IDdu_{d1u1}$) در الگو به‌کار رفته تا پس از تعیین سطح زیرکشت فعالیت j ام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t، مقدار متغیر تصمیم یاد شده نیز تعیین شود. معادله رواناب مصرف شده نیز به قرار زیر است.

$$WF_{u_1t} = \sum_j \sum_k WBU_{u_1jk} AC_{u_1jkt} \quad (۶)$$

که در آن، WBU_{u1jk} ماتریس تقاضای آب(بر حسب جزء آب مصرف شده) برای محصول j ام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 بوده و AC_{u1jkt} نیز سطح رشته فعالیت j با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t است. رواناب جریان برگشتی (WF_{e1t}) در گره‌های تقاضای کشاورزی نیز با ساختاری مشابه رواناب انحراف سطحی مشخص می‌شود.

$$WF_{e_1t} = \sum_j \sum_k WBU_{e_1jk} \sum_{u_1} IDeu_{e_1u_1} AC_{u_1jkt} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، WBU_{e1jk} ماتریس تقاضای آب(بر حسب جزء جریان برگشتی) برای محصول j ام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 و $IDeu_{e1u1}$ ماتریس مشخصه ارتباط رواناب مصرف شده با رواناب برگشتی است. رواناب در گره‌های هیدرومتری(WF_{rt}) با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود.

$$WF_{rt} = \sum_i E^s_{iv} WF_{it} + \sum_r E^s_{rv} WF_{rt} + \sum_d E^s_{dv} WF_{dt} + \sum_e E^s_{ev} WF_{et} + \sum_g E^s_{gv} WF_{gt} + \sum_l E^s_{lv} WF_{lt} \quad (۸)$$

که در آن، E^S همانند یک سوئیچ عمل نموده و با توجه به نقشه شماتیک حوضه رودخانه، فقط گره‌های مؤثر بر رواناب گره هیدرومتری مورد بررسی را در معادله لحاظ می‌نماید.

علاوه بر گره‌های تقاضای کشاورزی، گره‌های تقاضای شهری نیز در حوضه رودخانه سفیدرود وجود دارد. به منظور الگوسازی رواناب مصرف شده(WF_{u2t}) و رواناب برگشتی(WF_{e2t}) در گره‌های شهری از دو معادله زیر استفاده می‌شود.

$$WF_{u_2t} = \sum_{d_2} WBMU_{d_2u_2} WF_{d_2t} \quad (۹)$$

که در آن، $WBMU_{d2u2}$ ماتریس اتصال گره‌های رواناب انحراف داده شده با مصرف شده و WF_{d2t} رواناب انحراف داده شده به گره‌های تقاضای شهری است.

$$WF_{e_2t} = \sum_{d_2} WBMR_{d_2e_2} WF_{d_2t} \quad (۱۰)$$

در خصوص مقدار رواناب انحراف داده شده(WF_{dt}) الگو مقید به برقراری شرط زیر با توجه به ویژگی‌های حوضه رودخانه سفیدرود خواهد شد.

$$WF_{dt} < \sum_i E^s_{id} WF_{it} + \sum_r E^s_{rd} WF_{rt} + \sum_d E^s_{dd} WF_{dt} + \sum_e E^s_{ed} WF_{et} + \sum_g E^s_{gd} WF_{gt} + \sum_l E^s_{ld} WF_{lt} \quad (۱۱)$$

یکی از متغیرهای حائز اهمیت در الگوسازی اقتصادی- هیدرولوژیکی مقدار ذخیره آب در مخزن sام حوضه رودخانه در دوره زمانی t (Z_{st}) است. این متغیر تصمیم با استفاده از رابطه زیر تعیین شد.

$$Z_{st} = Z^0_{st} + Z^R_{st-1} - \sum_l SBLV_{ls} WF_{lt} \quad (۱۲)$$

که در آن، Z^0_{st} سطح اولیه مخزن sام در دوره زمانی t، Z^R_{st-1} سطح باقی‌مانده در مخزن sام از دوره زمانی قبل، $SBLV_{ls}$ ماتریس اتصال گره مخزن به رهاسازی و WF_{lt}رواناب رهاسازی شده می‌باشد. در رابطه فوق، $\sum_l SBLV_{ls} WF_{lt}$ بیانگر تغییر در سطح مخزن sام یا CR_{st} است.

هر یک از مخازن آب موجود در حوضه رودخانه با در نظر گرفتن الگوی پویای بهره‌برداری از مخزن که در آن Z_{st} مقدار ذخیره آب در مخزن sام حوضه رودخانه در دوره زمانی t، IWF_t رواناب ورودی به مخزن در دوره زمانی t، WF_{lt} مقدار رواناب رهاسازی شده از مخزن sام در دوره زمانی t و EW_t تبخیر از سطح دریاچه مخزن sام در دوره زمانی t باشد و با نمادسازی برای دوره زمانی t+۱ خواهیم داشت.

به منظور الگوسازی ساختار پویای بهره‌برداری از مخزن در این بلوک نیاز است تا رابطه پیوستگی تغییرات حجم مخزن به صورت زیر تعریف شود.

$$Z_{s\,t+1} = Z_{s\,t} + IWF_t - WF_{l\,t} - EW_{st} \quad (۱۳)$$

در خصوص اندازه‌گیری میزان تبخیر از سطح دریاچه مخزن sام در دوره زمانی t از رابطه زیر استفاده شد:

$$EW_{st} = 0.5\,(PET_{st} + \frac{PET_{st}}{Z^{\max}_s} Z_{st}) \quad (۱۴)$$

که در آن، PET_{st} سطح تبخیر پتانسیل برای مخزن sام و Z_s^{Max} بیشترین حجم مجاز مخزن sام می‌باشد. همچنین می‌توان میزان تبخیر از سطح دریاچه مخزن را براساس وسعت آن نیز تعیین نمود.

$$EW_{st} = B_{se}\, Za_{st} \qquad (۱۵)$$

وسعت سطح دریاچه مخزن را با Za_{st} و ضریب تبخیر سطحی نیز با B_{se} نشان داده می‌شود. راه دیگر اعمال میزان تبخیر، استفاده از ماتریس اتصال و کسر درصدی از آب مخزن تبدیل شده به آب رهاسازی شده است.

به منظور اندازه‌گیری مقدار رواناب رسیده به حوضه رودخانه می‌توان رابطه زیر را مورد استفاده قرار داد:

$$UW_t = \sum_i (S1_{it} + S2_{it}) - WF_{rt}^{L} - \sum_s CR_{st} \qquad (۱۶)$$

در رابطه فوق، WF^{L}_{rt} بیانگر رواناب خروجی از حوضه رودخانه بوده که توسط آخرین ایستگاه هیدرومتری(ایستگاه آستانه‌اشرفیه ورودی به دریای خزر) اندازه‌گیری می‌شود.

بلوک سوم معادلات در الگوسازی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود مربوط به منافع و هزینه‌های اقتصادی ایجاد شده در اثر تخصیص آب به کاربری‌های رقیب در حوضه رودخانه می‌باشد. در خصوص گره‌های تقاضای کشاورزی می‌توان سود ناخالص در رشته فعالیت‌های تولیدی را با استفاده از دو رهیافت حداکثرسازی سودناخالص و تابع سود درجه دوم تعیین نمود. در شرایط استفاده از رهیافت حداکثرسازی سودناخالص معادله زیر در الگوی یکپارچه به کار می‌رود.

$$AB_{u_1jkt} = \left[P_j Y_{u_1jk} - VAC_{u_1jk} - (PWu_1 WBU_{ijk}) \right] AC^{*}_{u_1jkt} \qquad (۱۷)$$

در رابطه فوق، Ab_{u1jkt} سود ناخالص رشته فعالیت jام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t در واحد سطح، P_j قیمت هر واحد حجمی محصول jام، Y_{u1jk}عملکرد محصول jام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1، VAC_{u1jk}هزینه‌های متغیر تولید محصول jام با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 بدون در نظر گرفتن نهاده آب بوده، PW_{u1} قیمت هر واحد حجمی آب تحویلی به مزرعه، WBU_{ijk} ماتریس تقاضای آب و AC^{*}_{u1jkt} سطح اختصاص داده شده به رشته فعالیت j با فناوری تولید k در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t است. سود ناخالص تجمیع شده در سطح منطقه آبیاری و دوره زمانی به ازای محصولات و فناوری‌های تولید مختلف را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$RAB_{u_1t} = \sum_j \sum_k AB_{u_1jkt} \qquad (۱۸)$$

در نهایت سود ناخالص تجمیع شده در سطح منطقه آبیاری و دوره زمانی به ازای محصولات و فناوری‌های تولید مختلف(RAB_{u1t}) و ارزش حال خالص رشته فعالیت‌های تولیدی کشاورزی در سطح حوضه رودخانه (TAB) نیز بر مبنای نتایج حاصل تعیین خواهد شد.

رهیافت مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری منافع اقتصادی در گره‌های تقاضای کشاورزی تابع درجه دوم منافع اقتصادی بوده که به هنگام در نظر گرفتن سطح تخصیص آب به عنوان نقطه برش الگوی یکپارچه به کار گرفته می‌شود.

$$AB_{u_1t} = AC_{u_1t}\,\alpha + PW_{u_1}\frac{e_{u_1}^{w}-1}{e_{u_1}^{w}}WF_{u_1t} + \frac{1}{AC_{u_1t}}\frac{0.5PW_{u_1}}{e_{u_1}^{w}\,WBU}WF_{u_1t}^{2} \qquad (۱۹)$$

در رابطه فوق، AB سود ناخالص رشته فعالیت‌های کشاورزی در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t، AC سطح رشته فعالیت‌های کشاورزی در منطقه آبیاری u_1 برای دوره زمانی t، α عرض از مبداء تابع فایده، PW_{u_1} قیمت هر واحد حجمی آب در گره کشاورزی u_1، e^{w}_{u1} کشش قیمتی تقاضای آب آبیاری در گره کشاورزی u_1، WF_{u1t} رواناب مصرف شده در گره کشاورزی u_1 برای دوره زمانی t و WBU تقاضای متوسط آبیاری در واحد سطح برای منطقه آبیاری مورد بررسی است. پس از تعیین مقدار فوق، همانند رهیافت نخست می‌توان سود ناخالص تجمیع شده و تنزیل شده رشته فعالیت‌های کشاورزی را برای کل حوضه رودخانه سفیدرود به‌دست آورد.

به منظور اندازه‌گیری فایده ایجاد شده در اثر مصرف آب در گره‌های تقاضای شهری حوضه رودخانه سفیدرود از فرم تابعی درجه دوم استفاده شد. با مشخص بودن مقدار کشش قیمتی تقاضای آب شرب و حجم آب تحویلی به ازای هر مشترک می‌توان معادله زیر را تصریح نمود.

$$MB_{u_2t} = POP_{u_2t}\,\alpha + PW_{u_2}\frac{e_{u_2}^{w}-1}{e_{u_2}^{w}}WF_{u_2t} + \frac{1}{POP_{u_2t}}\frac{0.5PW_{u_2}}{e_{u_2}^{w}\,C_{u_2}^{M}}WF_{u_2t}^{2} \qquad (۲۰)$$

که در آن، MB_{u2t} فایده مصرف آب در گره شهری u_2 برای دوره زمانی t، POP_{u2t} تعداد مشترکین در گره شهری u_2 برای دوره زمانی t، α عرض از مبداء تابع فایده، PW_{u2} قیمت هر واحد حجمی آب در گره شهری u_2، e^{w}_{u2} کشش قیمتی تقاضای آب شرب در گره شهری u_2، WF_{u2t} رواناب مصرف شده در گره شهری u_2 برای دوره زمانی t و C^{M}_{u2} حجم آب تحویلی به هر مشترک(در هر طبقه مصرف) در گره شهری u_2 است. با استفاده از عامل تنزیل D_t می‌توان ارزش حال خالص تخصیص آب به گره‌های شهری در حوضه رودخانه سفیدرود را تعیین نمود. علاوه بر دو نوع گره تقاضای کشاورزی و شهری که ایجاد منفعت اقتصادی نموده، تولید برق‌آبی از دیگر منافع اقتصادی ایجاد شده در حوضه رودخانه سفیدرود است. به منظور محاسبه منافع برق‌آبی در

گره تولید برق‌آبی حوضه رودخانه، در گام نخست لازم است تا توان تولیـدی نیروگـاه در هـر دوره زمانی مورد محاسبه قرار گیرد. به این منظور رابطه زیر مد نظر قرار گرفت:

$$P_t = R\,\gamma Q_t\,(H_t^u - H_t^d) \qquad (۲۱)$$

در این رابطه، R راندمان نیروگاه برق‌آبی، γ وزن مخصوص آب برابر با ۹۸۱۰ نیوتن بر مترمکعـب، Q_t دبی خروجی توربین بر حسب مترمکعب بر ثانیه، H^u_t هد بالادست توربین که از برازش منحنی سطح- حجم- ارتفاع مخزن سد حاصل شده و H^d_t هد پایین‌دست توربین کـه از بـرازش منحنـی دبی- اشل سد به‌دست می‌آید. به منظور برازش دو منحنی سطح- حجم- ارتفـاع و دبـی- اشـل از داده‌های سری زمانی مربوط به سد سفیدرود استفاده می‌شود. پس از تعیین تـوان تولیـدی در هـر دوره زمانی، این مقدار به معادل انرژی(W_t) تبدیل شده و رابطه مورد استفاده به قرار زیر است:

$$W_t = P_t\,P^f \qquad (۲۲)$$

که در آن، P^f ضریب تحویل به شبکه بوده و P_t توان تولیدی در هـر دوره زمـانی توسـط نیروگـاه برق‌آبی می‌باشد. با ضرب مقدار فوق در قیمت فروش هر کیلـو وات سـاعت بـرق مـی‌تـوان منـافع اقتصادی حاصل از تولید برق‌آبی را در گره مورد بررسی محاسبه نمود. پس از آن با استفاده از عامل تنزیل منافع اقتصادی تجمیع شده و تنزیل شده برای تولید برق‌آبـی (TEB) در حوضـه رودخانـه سفیدرود تعیین می‌شود.

چهارمین دسته از منافع ایجاد شده در حوضه رودخانه سفیدرود، منافع تفریحی مرتبط بـا مخـازن آب سدهای موجود است. در راستای محاسبه این منافع تفریحی می‌توان از دو رابطه استفاده نمود. در رهیافت اول با استفاده از معادله درجه دوم زیر منافع تفریحی ایجاد شده بر حسب حجم مخزن sام محاسبه می‌شود.

$$RB_t = \sum_s (g_0 + g_1 Z_{st} + g_2 Z^2_{st}) \qquad (۲۳)$$

همانند سایر منافع اقتصادی پس از تعیین مقادیر حاصل به ازای هر دوره زمانی با استفاده از عامل تنزیل، منافع اقتصادی تجمیع شده و تنزیل شده برای استفاده تفریحی(TRB) در حوضه رودخانه سفیدرود مشخص می‌شود.

از حاصل جمع چهار مقدار ارزش حال خالص منـافع در گـره‌هـای کشـاورزی، شـهری، بـرق‌آبـی و تفریحی، متغیر فایده کل اقتصادی(TB) حوضه رودخانه به‌دست آمده که در الگوی برنامـه‌ریـزی ریاضی غیرخطی پویای(DNLP) حوضه رودخانه سفیدرود به عنوان تابع هدف بیشینه می‌شود.

با توجه به طیف متنوع الگوها و روابط مورد استفاده در پژوهش حاضر، منابع آماری مختلف به کار رفته در راستای ایجاد الگوی هیدرواقتصادی حوضه رودخانه سفیدرود در جـدول ۱ خلاصـه شـده

است. در بخش بعد با استفاده از الگوی ایجاد شده، مهم‌ترین نتایج حاصل از سناریوهای مختلف کاهش آورد رودخانه سفیدرود بر این حوضه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در استان گیلان دارای سه ناحیه عمده آبیاری شامل دشت مرکزی، فومنات و شرق گیلان می‌باشد. مجموع مساحت اراضی زراعی تحت پوشش در نواحی یادشده بالغ بر ۱۷۹ هزار هکتار برآورد می‌شود. زراعت قالب در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، ارقام برنج دانه بلند بوده، به نحوی که بیش از ۹۷٪ الگوی کشت در نواحی آبیاری به این محصولات اختصاص دارد. منابع تامین آب آبیاری در نواحی آبیاری سه‌گانه فوق عبارت از شبکه سفیدرود، رودخانه‌ها، انهار محلی و زهکش‌ها، آب‌بندان‌ها و منابع زیرزمینی می‌باشد. میزان مصرف آب آبیاری در نواحی دشت مرکزی، فومنات و شرق گیلان به ترتیب برابر با ۷۹۸، ۴۸۷ و ۵۲۲ میلیون متر مکعب برآورد شده که سهم منابع چهارگانه فوق در تامین آب آبیاری در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین الگوی کشت این سه ناحیه آبیاری در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

به منظور شبیه‌سازی سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، کاهش آورد حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود، دوره زمانی دو ساله به صورت سال پایه و سال شبیه‌سازی برای الگوی هیدرواقتصادی حوضه رودخانه سفیدرود مدنظر قرار گرفته و نتایج حاصل از سناریوهای مختلف شبیه‌سازی استخراج شد. با استفاده از خروجی الگوهای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در طرح جامع منابع آب کشور و مطالعات جایکا، هفت سناریوی شبیه‌سازی در این بخش طراحی شد. سناریوهای هیدرولوژیکی مورد مطالعه به شرح زیر است:

۱- سناریوی اول: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود(کاهش ۲۲.۲۳ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).

۲- سناریوی دوم: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود به همراه ورود طرح‌های اجرایی(کاهش ۲۹.۰۵ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).

۳- سناریوی سوم: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود به همراه ورود طرح‌های اجرایی و مدیریت موثر تقاضا در بالادست(کاهش ۲۵.۱۵ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).

۴- سناریوی چهارم: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود به همراه ورود کلیه طرح‌های اجرایی و مطالعاتی(کاهش ۳۵.۰۸ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).

۵- سناریوی پنجم: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود به همراه ورود کلیه طرح‌های اجرایی و مطالعاتی و مدیریت موثر تقاضا در بالادست(کاهش ۲۸.۶۹ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).
۶- سناریوی ششم: افزایش نیازها و مصارف آب در بالادست حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود به همراه ورود کلیه طرح‌های اجرایی و مطالعاتی به همراه مدیریت مؤثر تقاضا و تعادل‌بخشی آب‌خوان‌ها در بالادست(کاهش ۲۹.۲۲ درصدی آورد رودخانه قزل‌اوزن).
۷- سناریوی هفتم: رخداد خشکسالی در حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود و حوضه رودخانه سفیدرود(کاهش ۲۳ درصدی آورد رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود و آورد ۲۴ رودخانه محلی در منطقه مورد مطالعه).
پس از طراحی سناریوهای کاهش آورد، شناسایی گره‌های موجود در حوضه رودخانه سفیدرود مدنظر قرار گرفت. در این راستا ۳۲ گره منابع آب، ۷ گره ایستگاه آبسنجی، ۶ گره انحراف آب سطحی، ۶ گره مصرف آب، ۶ گره جریان بازگشتی، ۲ گره رهاسازی از مخزن و یک گره تولید برق‌آبی در الگوسازی هیدرواقتصادی وارد شد.
بررسی منافع اقتصادی مصارف کشاورزی حوضه رودخانه سفیدرود تحت هفت سناریوی مورد بررسی نشان داد که بر اثر اجرای این سناریوها تغییرات منافع بین ۷/۳- تا ۳۲/۳۲-٪ در قیاس با برآورد کامل نیازهای آبی کشاورزی حوضه رخ می‌دهد. همچنین ارزیابی کل منافع اقتصادی مصارف حوضه رودخانه سفیدرود تحت سناریوهای یادشده، نشان داد که تغییرات کل منافع اقتصادی حاصل بین ۶.۶۱- تا ۲۹.۸۵-٪ می‌باشد. جدول ۳ تغییرات منافع کشاورزی و کل منافع اقتصادی حوضه تحت سناریوی اول تا هفتم نسبت به حالت برآورد کامل نیازهای آبی را نشان می‌دهد.
از سوی دیگر منافع کشاورزی و مقدار اراضی خارج شده از مدول آبیاری به تفکیک چهار ناحیه عمده آبیاری(گره‌های مصرف کشاورزی) در حوضه رودخانه سفیدرود بزرگ شامل فومنات، گله‌رود، راست سنگر و چپ سنگر در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل پیشنهادهای مناسب در بخش بعد ارائه می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

ارزیابی نتایج حاصل از الگوی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود تحت شش سناریوی اول شبیه‌سازی نشان داد که به طور متوسط کل منافع اقتصادی از دست رفته در حوضه رودخانه سفیدرود به ازای هر متر مکعب کاهش آورد آبریز قزل اوزن- سفیدرود، برابر با

۱۱۳۸ ریال است. این مقدار برای سناریوهای اول تا ششم به ترتیب برابر با ۱۰۱۰، ۱۱۶۳، ۱۰۸۶، ۱۲۴۹، ۱۱۵۶ و ۱۱۶۵ ریال می‌باشد. در خصوص بخش کشاورزی نیز بررسی نتایج حاصل از الگوی یکپارچه اقتصادی- هیدرولوژیکی حوضه رودخانه سفیدرود تحت سناریوی‌های اول تا ششم شبیه‌سازی نشان داد که به طور متوسط منافع اقتصادی از دست رفته در مصارف کشاورزی حوضه رودخانه سفیدرود به ازای هر متر مکعب کاهش آورد آبریز قزل اوزن- سفیدرود برابر با ۱۱۰۰ ریال است. این مقدار برای سناریوهای اول تا ششم به ترتیب برابر با ۹۸۳، ۱۱۲۳، ۱۰۵۲، ۱۲۰۲، ۱۱۷ و ۱۱۲۶ می‌باشد. یکی از موارد مطرح از سوی استان‌های بالادست در مدیریت یکپارچه حوضه سفیدرود بزرگ، کارا نبودن مصرف آب در بخش کشاورزی استان پایین دست(استان گیلان) می‌باشد. بدون توجه به اهمیت محصول راهبردی برنج که زراعت قالب در استان گیلان بوده است، مقایسه مقادیر منافع اقتصادی از دست رفته در مصارف کشاورزی حوضه رودخانه سفیدرود با مقادیر منافع اقتصادی به دست آمده در کشاورزی استان‌های بالادست به سبب مصرف آب در این استان‌ها و عدم تخصیص به استان پایین‌دست، می‌تواند معیاری مناسب برای بررسی ادعای استان‌های بالادست مبنی بر کارا نبودن مصرف آب در بخش کشاورزی استان پایین‌دست باشد. از این رو ضروری است تا با اتخاذ رویکردی یکپارچه در ارزیابی فنی- اقتصادی طرح‌های توسعه منابع آب در بالادست، معیار اصلی اقتصادی بودن اجرای این پروژه‌ها بیشتر بودن منافع اقتصادی به دست آمده در بخش کشاورزی استان‌های بالادست از منافع اقتصادی از دست رفته در بخش کشاورزی استان پایین‌دست باشد. این اصلاح در رویکرد ارزیابی فنی- اقتصادی طرح‌های توسعه منابع آب بالادست(با تاکید بر طرح‌های در حال مطالعه) می‌تواند مناقشه اصلی در خصوص ادعاهای دو طرف مبنی بر کارا نبودن مصرف آب در بخش کشاورزی بالادست و پایین‌دست را برطرف نماید

فهرست منابع:

۱. گزارش سطح زیر کشت، عملکرد و تولید محصولات زراعی و باغی استانی. ۱۳۸۵. سالنامه آماری ایران.

۲. گزارش مطالعات محیط‌زیست حوضه آبریز سفیدرود بزرگ، بهنگام سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های ارس، (تالش- تالاب انزلی)، سفیدرود بزرگ، بین سفیدرود و هراز، (هراز- قره‌سو)، (گرگانرود- قره‌سو)، اترک و ارومیه. ۱۳۹۰. دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.

۳. گزارش آماری طرح هزینه تولید محصولات زراعی استان گیلان. ۱۳۹۰. جهاد کشاورزی استان گیلان.

۴. مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان. ۱۳۸۳. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، مهندسین مشاور پندام.

۵. مطالعات یکپارچه برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز رودخانه قزل‌اوزن- سفیدرود (گزارش مصارف). ۱۳۸۵. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان.

۶. مطالعات یکپارچه برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز رودخانه قزل‌اوزن- سفیدرود (گزارش برنامه‌ریزی منابع آب). ۱۳۹۰، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان

7. Graveline N, Majone B, Van Duinen R, Ansik E. 2014. Hydroeconomic modeling of water scarcity under global change: and application to the Gallego river basin (Spain). Reg Environ Change. 14: 119-132.
8. Harou JL, Pulido-Velazquez M, Rosenberg DE, Medllin-Azura J, Lund JR, Howitt RE. 2009. Hydro-economic models: concepts, design, applications and future prospects. Journal of Hydrology. 375: 627-643.
9. Heinz I, Pulido-Velazquez M, Lund JR, Andreu J. 2007. Hydro-economic modeling in river basin management: implication and applications for European water framework directive. Water Resource Management. 21: 1103-1125.
10. Howitt RE,MacEwan D,Azuara JM, Lund JR. 2010. Economic Modeling of Agriculture and Water in California Using the Statewide Agricultural Production Model. A Report for the California Department of Water Resource. University of California Davis.

11. Hurd BH,Coonrod J. 2007. Climate change and its implications for New Mexico's water resources and economic opportunities. Department of Agricultural Economics and Agricultural Business. New Mexico State University.
12. JICA. 2010. The study on integrated water resource management for Sefidrud river basin. Volume I, Main Report.
13. Maneta MP, Torres M, Howitt RE, Vosti SA, Wallender WW, BassoiLH, Rodrigues LN, Young JA. 2007. A Detailed Hydro-Economic Model for Assessing the Effects of Surface Water and Groundwater Policies: A Demonstration Model from Brazil. Selected paper for the American Agriculture Economics Association Annual Meeting.Portlan, Oregon, 29 July- 1August, USA

پیوست‌ها

جدول ۱- منابع آماری مورد استفاده در پژوهش حاضر.

شرح	مرجع
الگوی تخصیص و تحویل آب در اراضی پایاب سد سفیدرود	شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان (۱۳۹۰)
داده‌های هیدرولوژی شامل میزان رواناب، میزان آب سطحی انحراف داده شده، میزان جریان برگشتی، تبخیر و تعرق، میزان روناب به کار برده شده، میزان رواناب مصرف شده، راندمان آبیاری در قسمت‌های مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود و ...	شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان (۱۳۹۰)، مطالعات جامع بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان ارائه شده توسط شرکت مشاور پندام (۱۳۸۳)، مطالعات یکپارچه برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز قزل‌اوزن- سفیدرود ارائه شده توسط شرکت مشاور مهاب قدس (۱۳۸۵) و مطالعه مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه رودخانه سفیدرود ارائه شده توسط شرکت مشاور جایکا (۱۳۹۰).
داده‌های مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری و سنجش جریان آب عبوری.	شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان (۱۳۹۰)
تعداد مشترکین، مقدار آب شرب مصرفی، مقادیر آب بهاء و خدمات دفع فاضلاب و آبونمان.	شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان (۱۳۹۰)
الگوی جاری رشته‌فعالیت‌های مختلف کشاورزی در اراضی پایاب سد سفیدرود	شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان (۱۳۹۰) و مشاهدات میدانی.
میزان عملکرد، درآمد و هزینه تولید رشته فعالیت‌های کشاورزی در اراضی پایاب سد سفیدرود.	اداره کل جهاد سازندگی استان گیلان (۱۳۹۰)، مطالعات جامع بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان ارائه شده توسط شرکت مشاور پندام (۱۳۸۲) و مشاهدات میدانی.

جدول ۲- سهم منابع مختلف در تأمین آب آبیاری نواحی سه‌گانه (درصد).

شرح	دشت مرکزی	فومنات	شرق گیلان
شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود	۸۶/۶۷	۶۰/۰۶	۸۰/۱۹
رودخانه‌ها، انهار محلی و زهکش‌ها	۱۱/۵۸	۳۱/۰۸	۱۴/۴۱
آب‌بندان‌ها	۱/۵۴	۲/۲۴	۴/۶۴
منابع زیرزمینی	۰/۲۱	۶/۶۲	۰/۷۶

مأخذ: شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان

جدول ۳- تغییر منافع کشاورزی و کل منافع اقتصادی مصارف حوضه سفیدرود تحت سناریوهای کاهش آورد.

سناریو	تغییر منافع کشاورزی (درصد)	تغییر کل منافع اقتصادی (درصد)
سناریو ۱	-۷/۳	-۶.۶۱
سناریو ۲	-۱۰/۹۱	-۹.۹۵
سناریو ۳	-۸/۸۵	-۸.۰۴
سناریو ۴	-۱۴/۰۹	-۱۲.۹۱
سناریو ۵	-۱۰/۷۱	-۹.۷۷
سناریو ۶	-۱۱	-۱۰.۰۳
سناریو ۷	-۳۲/۳۲	-۲۹.۸۵

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

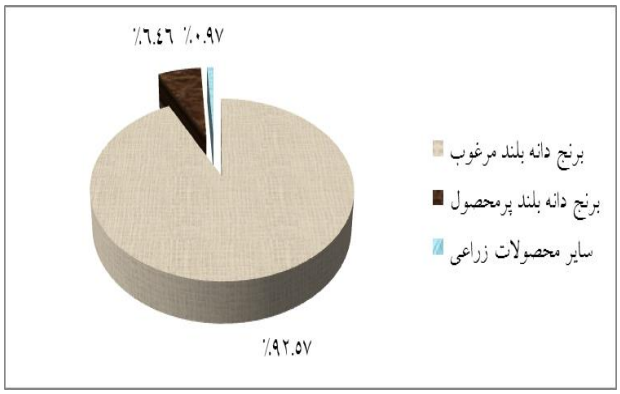
جدول ۴- منافع کشاورزی و اراضی خارج شده از مدول آبیاری به تفکیک نواحی عمده آبیاری.

سناریو	شرح	فومنات	گله رود	راست سنگر	چپ سنگر	کل
سناریو اول	منافع کشاورزی	۸۸۴.۸۸	۴۰.۲۴	۶۹۷.۳۳	۱۰۵۸.۶	۲۶۸۱.۰۵
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۳۶۰۹	۲۰۲	۳۸۲۶	۵۳۲۳	۱۲۹۶۰
سناریو دوم	منافع کشاورزی	۸۵۰.۴۶	۳۸.۶۸	۶۷۰.۲۱	۱۰۱۷.۴	۲۵۷۶.۷۵
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۵۳۶۸	۳۰۱	۵۶۹۰	۷۹۱۷	۱۹۲۷۶
سناریو سوم	منافع کشاورزی	۸۷۰.۱۴	۳۹.۵۷	۶۸۵.۷۲	۱۰۴۱	۲۶۳۶.۴۳
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۴۳۶۲	۲۴۵	۴۶۲۴	۶۴۳۴	۱۵۶۶۵
سناریو چهارم	منافع کشاورزی	۸۲۰.۰۷	۳۷.۳	۶۴۶.۲۶	۹۸۱.۰۶	۲۴۸۴.۶۹
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۶۹۲۰	۳۸۸	۷۳۳۵	۱۰۲۰۶	۲۴۸۴۹
سناریو پنجم	منافع کشاورزی	۸۵۲.۳۲	۳۸.۷۶	۶۷۱.۶۸	۱۰۱۹.۶	۲۵۸۲.۳۶
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۵۲۷۳	۲۹۶	۵۵۸۹	۷۷۷۶	۱۸۹۳۴
سناریو ششم	منافع کشاورزی	۸۴۹.۶۴	۳۸.۶۴	۶۶۹.۵۶	۱۰۱۶.۴	۲۵۷۴.۲۴
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۵۴۱۰	۳۰۳	۵۷۳۴	۷۹۷۹	۱۹۴۲۶
سناریو هفتم	منافع کشاورزی	۶۴۶.۱۱	۲۹.۳۹	۵۰۹.۱۷	۷۷۲.۹۵	۱۹۵۷.۶۲
	اراضی خارج شده از مدول آبیاری	۱۵۸۰۷	۸۸۶	۱۶۷۵۵	۲۳۳۱۳	۵۶۷۶۱

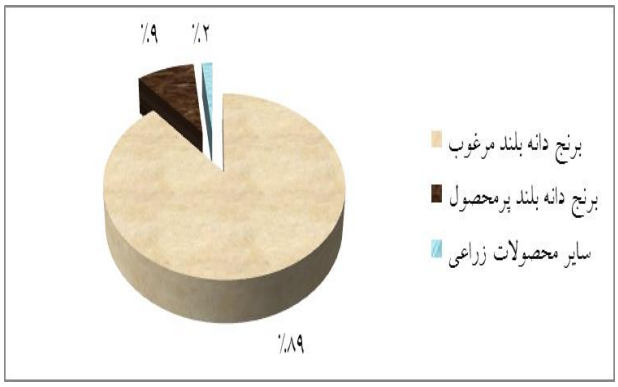
*منافع کشاورزی بر حسب میلیارد ریال و با توجه به مقادیر درآمد و هزینه سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ محاسبه شد.

**اراضی خارج شده از مدول آبیاری بر حسب هکتار می‌باشد.

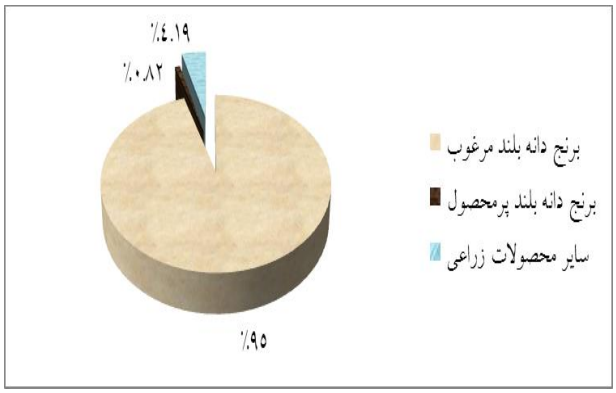
مأخذ: یافته‌های پژوهش.



الگوی کشت ناحیه دشت مرکزی
۷۸۵۷۳هکتار وسعت اراضی



الگوی کشت ناحیه فومنات
۵۶۷۷۵ وسعت اراضی



الگوی کشت ناحیه شرق گیلان
۵۴۵۵۶ هکتار وسعت اراضی

شکل ۱- الگوی کشت سه ناحیه عمده آبیاری در حوضه رودخانه سفیدرود.