

بررسی آب مجازی درون حوزه‌های در حوضه آبریز سفیدرود

محبوبه آقاجانی^{۱*}، بهروز مصطفی‌زاده فرد^۲، مریم نوابیان^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۱۴ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۸)

چکیده

تجارت آب مجازی، در بخش‌های صنعتی، کشاورزی و اجتماعی و در سطوح مختلف کشوری و جهانی قابل بررسی است. در پژوهش حاضر، آب مجازی در بخش آبیاری و در مقیاس درون‌حوزه‌ای، در حوضه آبریز سفیدرود ارزیابی شد تا نتایج آن در تخصیص منابع آب حوضه مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس هشت الگوی کشت ($S_1 - S_8$) در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن (استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی) طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۸۰ توسط مدل SWAT ارزیابی شد. در این راستا، اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژیکی رودخانه و عملکرد محصول زراعی برای سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴، از طریق مدل سری زمانی ARIMA تولید گردید. مقایسه مقادیر متوسط آب مجازی گندم ($2/73 - 3/24$) و برنج ($4/06 - 3/28$) مترمکعب بر کیلوگرم) در استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی، نشان داد که کشت گندم گزینه مناسب‌تری در منطقه می‌باشد. نتایج نشان داد الگوی کشت ۵۰ درصد گندم آبی - ۵۰ درصد گندم دیم (S_6)، گزینه مناسبی برای جایگزین شدن کشت برنج در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن در استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی می‌باشد. همچنین تبادل آب مازاد گزینه S_6 به استان پایین‌دستی حاشیه رودخانه قزل‌اوزن (گیلان) منجر به کاهش آب مجازی کشت برنج در این استان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: استان گیلان، برنج، حوضه آبریز سفیدرود، مدل SWAT، گندم.

مقدمه

آب مجازی^۱ در تعریف اولیه، کل آب مصرفی برای تولید یک واحد کالای کشاورزی و غیر کشاورزی است که به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی بهره‌وری آب، در سطوح مختلف منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی توسط Allan (1997) مطرح شده است. عدم نیاز به احداث خطوط لوله انتقال آب، احداث مخازن و پایین بودن هزینه انتقال آب موجب گسترش چشمگیر مفهوم تجارت آب مجازی شده است (Tian, 2013). در دیدگاه نخستین، مفهوم آب مجازی بین بخش‌های مختلف صنعتی، کشاورزی، اجتماعی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت (Shi and Zhan, 2015). تحقیقات نشان می‌دهد، ۶۷ درصد تجارت آب مجازی در جهان به محصولات کشاورزی و به ترتیب ۲۳ و ۱۰ درصد آن مرتبط با محصولات دامی و صنعتی است (Tian, 2013). امروزه در رویکرد جدید، بررسی آب مجازی درون‌بخشی، با هدف کنترل دقیق‌تر مصرف آب در بخش‌های مختلف تولید یک کالا

به وجود آمده است. از آنجایی که در سطح جهان، کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب به شمار می‌آید، بنابراین بررسی آب مجازی درون‌بخشی در کشاورزی اهمیت زیادی دارد.

آب مجازی درون‌بخشی در کشاورزی یک مفهوم نوین اقتصادی- اجتماعی است که به بررسی میزان آب مورد استفاده در قسمت‌های مختلف فرآیند تولید محصول کشاورزی می‌پردازد (Fracasso et al., 2015). در پژوهشی در حوضه مدیریتانه، آب مجازی درون‌بخشی در کشاورزی، به بخش‌های آب آبیاری، نهاده‌های کشاورزی نظیر کود، ماشین‌آلات، هزینه و تعرفه‌ها تفکیک شد. در این مطالعه، کل آب در دسترس برای اهداف کشاورزی در بخش‌های مختلف به گونه‌ای مدیریت شد تا علاوه بر کاهش فشار بر منابع آبی، امنیت غذایی ساکنین منطقه تأمین شود (Fracasso et al., 2015).

مطالعات مختلفی در زمینه مفهوم آب مجازی، با تکیه بر نقش آب به‌عنوان یکی از عوامل مهم تولید محصولات زراعی انجام شده است (Antonelli and Sartori, 2015; Tian, 2013). نتایج این تحقیقات نشان داد که مبادلات آگاهانه آب مجازی

* نویسنده مسئول: ma.aghajani91@yahoo.com

1.Virtual Water

سر می‌برد و کشت گیاه برنج که نیاز آبی بالایی دارد در هر موقعیت جغرافیایی صحیح نمی‌باشد. به‌عنوان مثال، برنج‌کاری در زمین‌های کشاورزی حوضه آبریز دریای مازندران به‌ویژه زیرحوضه آبریز سفیدرود (دومین زیرحوضه دارای اراضی قابل آبیاری) در استان‌های زنجان، آذربایجان شرقی نیز گزارش شده است که با توجه به نقشه‌ها و گزارش‌های تناسب اراضی وزارت جهاد کشاورزی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) و ویژگی‌های اقلیم و خاک منطقه توقع بهره‌وری مناسب در آن اراضی نمی‌توان داشت؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر ارزیابی تبادل آب مجازی درون حوضه‌ای آبریز سفیدرود، بر اساس هشت گزینه مدیریتی در شرایط فعلی و آتی (بهره‌برداری سدهای در دست ساخت) اراضی کشاورزی در بالادست زیرحوضه آبریز سفیدرود با توجه به گیاهان قابل توصیه در الگوی کشت منطقه است. همچنین مناسب‌ترین الگوی کشت برای بهبود کمیت و کیفیت رودخانه قزل‌اوزن و کاهش آب مجازی برنج استان گیلان (به‌عنوان مهم‌ترین کشت استان پایین‌دست زیرحوضه آبریز سفیدرود) بررسی شد. به جهت اهمیت آب مجازی درون‌بخشی در کشاورزی، تبادلات آب مجازی درون حوضه‌ای در بخش آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، به دو محدوده بالادست و پایین‌دست تقسیم‌بندی شد (شکل ۱-ب). بخش‌هایی از زیرحوضه آبریز سفیدرود، از سراب قزل‌اوزن (نقطه ورودی به استان زنجان) تا محل اتصال به رودخانه شاهرود در محل سد سفیدرود گیلان، در مسیر رودخانه قزل‌اوزن به‌عنوان بالادست محدوده مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱-ج). این محدوده شامل زیرحوضه‌های فرعی طارم و ماهنشان (استان زنجان) و زیرحوضه میانه (استان آذربایجان شرقی) با مساحتی حدود ۹۷۲۴ کیلومترمربع است. استان گیلان در زیرحوضه‌های فرعی تالش-تالاب انزلی، آستانه-کوچصفهان و لاهیجان-چابکسر به مساحت ۱۴۰۴۲ کیلومترمربع، پایین‌دست محدوده مورد مطالعه قرار گرفت.

مفهوم آب مجازی در بخش آبیاری در محدوده مطالعه

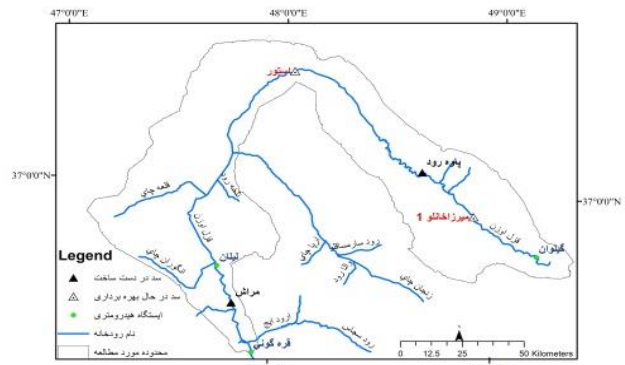
در حوضه آبریز سفیدرود، به جهت اهمیت رودخانه قزل‌اوزن در تأمین آب رودخانه سفیدرود به‌منظور آبیاری اراضی شالیزاری استان گیلان، بررسی آب مجازی در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن (استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی) و رودخانه سفیدرود

(کشت محصولات زراعی کم‌مصرف و واردات محصولات غذایی پرمصرف)، علاوه بر حفظ و پایداری منابع آب، به‌عنوان راهکاری توانمند در راستای تأمین نیاز غذایی آیندگان قلمداد می‌شود. در مطالعه‌ای، با بیان ضرورت تجارت آب مجازی در مقیاس جهانی، مشخص شد که تجارت آب مجازی بر اساس پنج محصول کشاورزی جو، ذرت، برنج، سویا و گندم و سه محصول دامی گوشت گاو، گوشت خوک و مرغ موجب ۵ درصد صرفه‌جویی در منابع آب تجدید ناپذیر جهان می‌شود (Hanasaki *et al.*, 2010). مبادلات آب مجازی در کشور چین نشان داد که در شمال شرقی این کشور در منطقه Huang-Huai-Hai، با کشت غلات کم‌مصرف می‌توان آب مجازی را به بخش‌های دیگر این کشور صادر نمود (Sun *et al.*, 2016). بررسی منابع آب جهان طی سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۹۶ نشان داد که همگام با مبحث آب مجازی، استفاده از محصولات زراعی با نیاز آبی کمتر، تغییر در ساختار الگوی کشت و توسعه روش‌های مدرن آبیاری می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب شود (Mekonnen and Hoekstra, 2011). در پژوهشی با استفاده از مدل SWAT، کارایی مصرف آب غلات به تفکیک استان و تحت تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب کشور با عدم قطعیت ارائه شد. نتایج نشان داد که مناطق مرکزی، جنوبی و شمال غربی کشور به‌شدت دچار بحران کم‌آبی هستند (Faramarzi *et al.*, 2009). این محققین تغییر الگوی کشت در مناطق مختلف کشور را توصیه نمودند. در پژوهشی، الگوی کشت بهینه محصولات زراعی با هدف حداکثرسازی منافع اجتماعی و واردات آب مجازی در منطقه ورامین با استفاده از مدل HSI انجام شد. نتایج نشان داد که با توجه به مفهوم آب مجازی، گندم تنها محصول زراعی مناسب برای کشت در منطقه ورامین است (Khalilian *et al.*, 2012). در مطالعه دیگری مشخص شد که توجه به مفهوم بیلان درون کشوری آب مجازی و اصلاح الگوی کشت، موجب شد که بهره‌وری آب مصرفی و عملکرد زراعی محصولات کشاورزی افزایش یابد (Faramarzi *et al.*, 2010).

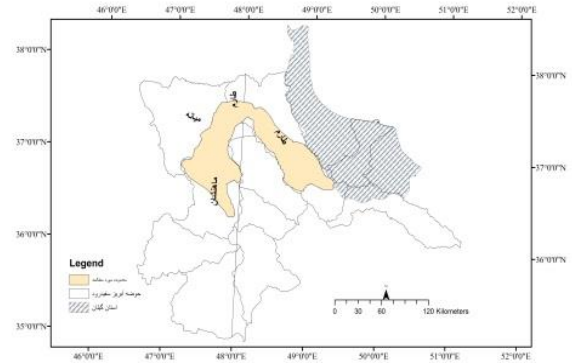
در ایران محصول برنج، پس از گندم از محصولات راهبردی کشاورزی است که از دیرباز، کشت این محصول به دلیل موقعیت مطلوب اقلیمی و فیزیوگرافی در سه استان شمالی گیلان، مازندران و گلستان صورت می‌پذیرفت. براساس طرح جامع آب کشور (۲۰۱۱) و آمارنامه‌های جهاد کشاورزی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۱)، در سال‌های اخیر کشاورزان سایر مناطق ایران نیز با تغییر الگوی کشت و صرف هزینه و آب فراوان، به شالیکاری مبادرت دارند. این در حالی است که ایران در شرایط کم‌آبی به

حوضه آبریز سفیدرود، زیرحوضه‌های فرعی درجه چهارم طارم و ماهنشان در استان زنجان و زیرحوضه میانه در استان آذربایجان شرقی با مصرف آب زیاد، سالانه حدود ۶۰۰۰ هکتار اراضی خود را به کشت برنج اختصاص می‌دهند (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۲۰۱۳). به‌منظور شبیه‌سازی کشت در حوضه‌های موردنظر و بررسی آثار آن بر عملکرد محصول و وضعیت کمی و کیفی منابع آب از مدل SWAT استفاده شد. پس از اجرای مدل SWAT در شرایط مدیریت آبی و زراعی فعلی منطقه، با تغییر نقشه کاربری اراضی موجود، مدل SWAT برای هفت گزینه مدیریتی دیگر مربوط به الگوی کشت و بهره‌برداری از منابع آب (جدول ۱) در بازه زمانی ۱۴۰۴-۱۳۸۰ اجرا گردید. بر اساس آمارنامه‌های جهاد کشاورزی (۲۰۱۲، ۲۰۱۳)، گندم، جو، سیب‌زمینی و یونجه مهم‌ترین محصولات زراعی و باغی استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی را تشکیل می‌دهند، بنابراین در گزینه‌های مدیریتی تعریف‌شده، محصولات کم‌مصرف گندم، جو و سیب‌زمینی در شرایط مختلف کشت آبی و دیم جایگزین اراضی شالیزاری شد. بر اساس نقشه‌های تناسب اراضی (وزارت جهاد کشاورزی، ۲۰۱۲) و الگوی کشت مشخص شد که در محدوده مسیر رودخانه قزل‌اوزن تراکم اراضی زیر کشت زیاد بوده و اغلب محصولات زراعی تحت کشت آبی قرار دارند؛ بنابراین به جهت اصلاح الگوی کشت و مناسب‌سازی مصرف آب، در گزینه‌های مدیریتی S₄-S₇ با اصلاح الگوی کشت، دیم‌کاری در کشاورزی منطقه اعمال شد. گزینه آیش اراضی شالیزاری حاشیه رودخانه قزل‌اوزن (S₃)، به‌عنوان شاهد جهت بررسی اثر سایر گزینه‌های مدیریتی اعمال شد؛ زیرا در اراضی پایین‌دست (استان گیلان)، تناسب اراضی به کشت برنج اولویت دارد.

(استان گیلان) صورت پذیرفت. در این پژوهش، با توجه به اهمیت آب آبیاری و تلفات زیاد آن در کشاورزی، آب مجازی بخش آبیاری موردتوجه قرار گرفت که از آن تحت عنوان آب مجازی بخش آبیاری یاد شده است.



الف



ب

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی (الف- حوضه آبریز دریای مازندران، ب) زیرحوضه آبریز سفیدرود و استان گیلان، ب- زمین‌های حاشیه رودخانه قزل‌اوزن)

گزارش‌های وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد، در

جدول ۱- تشریح گزینه‌های مدیریتی تعریف‌شده در مطالعه حاضر

نام گزینه مدیریتی	تشریح گزینه مدیریتی	سد مورد مطالعه	مساحت کشت برنج (هکتار)
S ₁	شرایط فعلی (آبگیری سدهای در دست بهره‌برداری)	استور، میرزاخانلوی ۱	۶۰۰۰
S ₂	آبگیری سدهای دست‌ساخت + عدم اصلاح الگوی کشت فعلی	مراش، پاورود	۶۰۰۰
S ₃	آیش اراضی شالیزاری (گزینه شاهد)	مراش، پاورود	۰
S ₄	عدم کشت برنج (کشت جایگزین ۵۰ درصد گندم آبی- دیم (۵۰-۵۰) و ۵۰ درصد جو آبی- دیم (۵۰-۵۰))	مراش، پاورود	۰
S ₅	عدم کشت برنج (کشت جایگزین ۵۰ درصد گندم آبی- دیم (۵۰-۵۰) و ۵۰ درصد سیب‌زمینی آبی- دیم (۵۰-۵۰))	مراش، پاورود	۰
S ₆	عدم کشت برنج (کشت جایگزین ۵۰ درصد گندم آبی - ۵۰ درصد گندم دیم)	مراش، پاورود	۰
S ₇	عدم کشت برنج (کشت جایگزین گندم دیم ۱۰۰ درصد)	مراش، پاورود	۰
S ₈	عدم کشت برنج (کشت جایگزین گندم آبی ۱۰۰ درصد)	مراش، پاورود	۰

SWAT استفاده شد. از آنجایی که واسنجی و اعتبارسنجی مراحل کلیدی در اجرای مدل‌ها محسوب می‌شوند اطلاعات

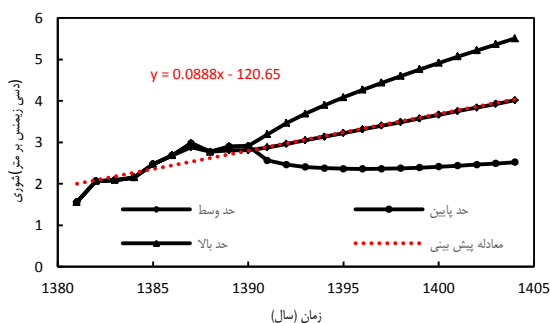
برای تعیین آب مجازی بخش آبیاری در محصولات زراعی استان‌های محدوده مطالعه (زنجان و آذربایجان شرقی)، از مدل

تخصیص یافت. به جهت اعمال شرایط کیفی آب در تخمین عملکرد محصول در بالادست و پایین دست محدوده مطالعه، از معادله (۲) استفاده شد (Van Genuchten and Hoffman, 1984). در این معادله واکنش گیاهان به شوری به صورت سیگموئیدی در نظر گرفته شده است.

$$Y = \frac{Y_m}{1 + \left(\frac{EC}{EC_{50}} \right)^p} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه، Y مقدار عملکرد محصول در شرایط شور (کیلوگرم بر هکتار)، Y_m مقدار عملکرد محصول در شرایط غیر شور (کیلوگرم بر هکتار)، EC میانگین شوری در ناحیه رشد ریشه (دسی زیمنس بر متر)، EC_{50} میانگین شوری خاک (دسی زیمنس بر متر) که منجر به کاهش ۵۰ درصد عملکرد می شود (از طریق آزمون و خطا تعیین می شود) و P یک ضریب تجربی است که مقدار آن معمولاً ۳ در نظر گرفته می شود.

به جهت تعیین تنش شوری حاصل از گزینه های مدیریتی الگوی کشت در استان های زنجان و آذربایجان شرقی بر محصول برنج استان گیلان در معادله (۲)، باید مقدار EC رودخانه در نقطه ورود به استان گیلان برآورد شود. در این راستا، باید توجه داشت که بر اساس طرح جامع آب (۲۰۱۱)، روند فزاینده سدسازی، احداث کارخانه ها و معادن فلزی و غیرفلزی و الگوی کشت مبتنی بر مصرف زیاد آب و کود در مناطق بالادست این رودخانه، باگذشت زمان اثر زیادی در کاهش کیفیت رودخانه قزل اوزن داشته است. روند کاهش کیفیت رودخانه قزل اوزن بر اساس متغیر شوری سالانه آب رودخانه در خروجی محدوده مورد مطالعه (ایستگاه هیدرومتری گیلوان) با استفاده از مدل سری زمانی ARIMA در شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی اولیه شکل (۲) نشان داد که بر اساس شرایط فعلی الگوی کشت در بالادست حوضه آبریز سفیدرود، EC در رودخانه قزل اوزن رو به افزایش است.



شکل ۲- روند افزایش شوری رودخانه قزل اوزن در خروجی محدوده مورد مطالعه

سال های ۱۳۸۰، ۱۳۸۸-۱۳۸۱، ۱۳۸۹-۱۳۹۳ و ۱۴۰۴-۱۳۹۴ به ترتیب در آماده سازی، واسنجی، اعتبارسنجی و پیش بینی مدل SWAT استفاده شدند. میزان نیاز آبی سالانه محصولات بر مبنای روش پنمن مونتیث توسط مدل SWAT محاسبه شد. سپس با استفاده از متوسط نیاز آبی هر محصول در زیرحوضه های فرعی میانه، طارم و ماهنشان، میزان آب مجازی هر محصول توسط معادله (۱) برای سال های ۱۴۰۴-۱۳۸۱ برآورد شد (Shi and Zhan, 2015). با اعمال تلفات آبیاری در معادله (۱)، آب مجازی در بخش آبیاری محاسبه شد. راندمان آبیاری کل ۳۵ درصد در نیاز آبی اعمال شد (Abbasi et al., 2015).

$$WVC = \frac{ET_a}{Yield} \quad (\text{رابطه ۱})$$

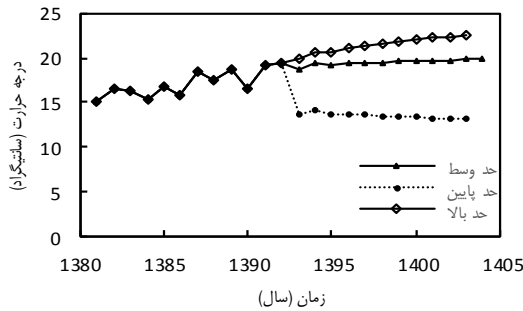
که در رابطه بالا، ET_a نیاز آبی سالانه گیاه (مترمکعب بر هکتار)، $Yield$ عملکرد سالانه محصول (کیلوگرم بر هکتار) و WVC مقدار آب مجازی سالانه گیاه (مترمکعب بر کیلوگرم) هستند.

با توجه دقت مناسب مدل سری زمانی ARIMA در تحقیقات پیشین (Salami and Mohtashami, 2015; Valipour et al., 2013)، پیش بینی عملکرد محصولات زراعی بالادست و پایین دست منطقه مورد مطالعه، طی سال های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ توسط نرم افزار آماری Minitab 17 و مدل سری زمانی ARIMA صورت پذیرفت. بهترین ساختار مدل ARIMA، بر اساس شاخص های آماری $RMSE$ و R^2 ، تعیین شد.

برای بررسی تأثیرگذاری شرایط واقعی رودخانه قزل اوزن در میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج استان گیلان، شرایط کمی و کیفی این رودخانه در گزینه های مختلف مدیریتی در عملکرد محصول اعمال شد. در این راستا، به جهت بررسی تنش آبی، با توجه به اعمال گزینه های مدیریتی هشت گانه در حاشیه رودخانه قزل اوزن، میزان آب مجازی بخش آبیاری، مهم ترین محصول کشاورزی استان گیلان (برنج)، بر اساس معادله (۱) محاسبه شد. در این راستا، مجموع حجم آب خروجی سد سفیدرود و تفاضل مشاهدات ایستگاه هیدرومتری گیلوان و خروجی مدل SWAT در هر گزینه مدیریتی که نشانگر میزان آب مورد استفاده در مجموع اراضی شالیزار استان گیلان است، بر میزان محصول تولیدی تقسیم شد. بر اساس طرح جامع آب (۲۰۱۱) و آمارنامه های جهاد کشاورزی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳)، بیش از ۹۰ درصد آب موجود در استان گیلان به کشت برنج اختصاص دارد؛ بنابراین ۹۰ درصد آب ورودی از هر گزینه مدیریتی به کشت برنج در سطح اراضی شالیزار استان گیلان



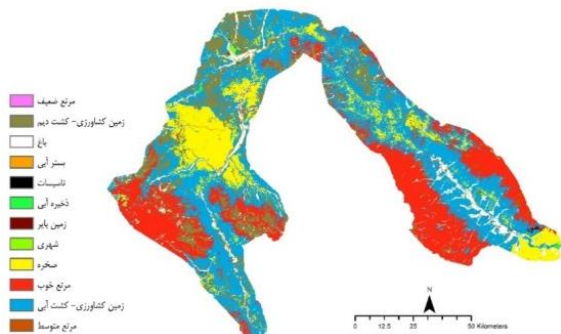
الف



ب

شکل ۳- الف: روند تغییرات بارندگی سالانه ب: روند تغییرات درجه حرارت

سالانه



شکل ۴- نقشه اولیه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

اطلاعات زراعی مناطق تحت کشت به تفکیک نوع محصول زراعی آبی و دیم در مساحت‌های تقریبی برگرفته از نقشه‌ها و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی و آبخیزداری زنجان و سند توسعه استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی (۲۰۱۳) وارد مدل SWAT شد. میزان دبی ورودی سدهای در دست بهره‌برداری منطقه (استور و میرزاخانلو ۱) نیز اعمال گردید. موقعیت مکانی سدهای در دست‌ساخت منطقه نیز در نقشه کاربری اراضی فعلی معرفی شد. در اجرای مدل SWAT در گزینه مدیریتی S₂ سدهای در دست احداث پایه رود و مراش به‌صورت فرضی آبدگیری شدند تا تأثیر سدهای در دست‌ساخت، در شرایط آبی رودخانه قزل‌اوزن مشخص شود. در این راستا با استفاده از هیدرومدول الگوی کشت مناطق تحت مدیریت سدهای مذکور، از طریق معادله بیلان آب با اعمال نفوذ و نشت، تبخیر از سطح دریاچه سد و میزان بارندگی سالانه، دبی

از آنجایی که بر اساس آمارنامه‌های جهاد کشاورزی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳)، متوسط مصرف سم و کود به ترتیب در کشت برنج، سیب‌زمینی، گندم، جو، یونجه آبی و گندم، جو، یونجه دیم کاهش یافته است فرض‌های زیر اعمال شد: ۱- در گزینه مدیریتی S₃ به جهت آیش قرار دادن زمین‌های شالیزاری، کیفیت آب رودخانه قزل‌اوزن در نقطه خروجی ۱۰ درصد بهبود می‌یابد. ۲- در گزینه‌های مدیریتی S₆، S₇، S₄، S₅ و S₈ به جهت کشت محصولات زراعی گندم، جو و سیب‌زمینی شوری آب رودخانه قزل‌اوزن ۵ درصد افزایش می‌یابد. به این ترتیب، روند شوری الگوی S₈ در مقایسه با گزینه مدیریتی S₆، ۲۵ درصد افزایش یافت. ۳- در گزینه مدیریتی S₂ نیز به جهت کاهش حجم آب قزل‌اوزن، شوری در مقایسه با گزینه مدیریتی S₁ به میزان ۱ درصد بیشتر فرض شد. بر این اساس، گزینه‌های مدیریتی S₃ و S₈ به ترتیب کمترین و بیشترین شیب تغییرات شوری را به خود اختصاص دادند. این فرضیات بر اساس مقدار شوری آب حاصل از کشت‌های متنوع مربوط به گزارش‌های متعدد ارزیابی کمی و کیفی منابع آب در منطقه در نظر گرفته شد.

اطلاعات ورودی مدل SWAT

به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه آبریز سفیدرود، با توجه به ایستگاه‌های موجود در مسیر رودخانه قزل‌اوزن، از داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک آبر، ماهنشان و زنجان در محدوده سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۱ استفاده شد. خلأ اطلاعات اقلیمی این سال‌ها، توسط مدل WXGEN تکمیل شد. اطلاعات هواشناسی روزانه به تفکیک ماه میلادی، در سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ توسط مدل سری زمانی ARIMA تولید شد. متوسط سالانه اطلاعات پیش‌بینی‌شده، حد بالا و پایین مقادیر تولیدشده درجه حرارت و بارندگی در شکل (۳) ارائه شده است. به جهت دسترسی به داده‌های روزانه تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد محاسبه تبخیرتغرق پتانسیل به روش پنمن مونتیث صورت پذیرفت.

در این پژوهش، به جهت مطالعه مدیریت زراعی و هیدرولوژیکی از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک‌پذیری ۳۰ متر از تصاویر ماهواره ASTER استفاده شده است. نقشه شبکه رودخانه نیز از طریق نقشه DEM، در بسته نرم‌افزاری ArcGIS تولید شد. نقشه کاربری اراضی بر اساس ۱۲ کلاس مختلف (شکل ۴) و نقشه خاک حوضه آبریز شامل ۵۷ نوع خاک با ویژگی‌های متفاوت می‌باشند.

خروجی سدهای مراش و پاورود برآورد شد (معادله ۳).

$$Q_{out-dam} = A'q + PA' + Q_{ind} - Q_{inf} - ET_a A \quad (3)$$

که در معادله بالا، $Q_{out-dam}$ دبی خروجی از سد (مترمکعب بر ثانیه)، A' مساحت اراضی تحت آبیاری سد (هکتار)، q هیدرومدول الگوی کشت (مترمکعب بر ثانیه هکتار)، P متوسط بارندگی سالانه منطقه، Q_{ind} ۱۰ درصد هیدرومدول الگوی کشت برای سهم صنعت و خانگی، Q_{inf} تلفات سالانه نفوذ و نشت بدنه سد، ET_a تبخیر از دریاچه سد، A مساحت دریاچه سد می باشند.

واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل SWAT

در این پژوهش، پس از جمع‌آوری داده‌های فیزیوگرافی و هیدروولوژی منطقه، ابتدا مدل SWAT بر اساس بافت خاک، توپوگرافی حوضه و کاربری اراضی در ۱۹ زیرحوضه تولیدی برای شرایط فعلی منطقه اجرا شد. اجرای مدل بر اساس گام زمانی ماهانه از ۱۱ دی‌ماه ۱۳۸۰ تا ۱۰ دی‌ماه ۱۴۰۴ صورت گرفت. در سال اول شبیه‌سازی، به مدل اجازه داده شد تا با شرایط اولیه متعادل (Warm up) شود.

از برنامه SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP به‌منظور واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل SWAT استفاده گردید. مشاهدات دبی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری گیلوان، ماهنشان و قره‌گونی، در یک دوره ۱۱ ساله برای واسنجی (۱۳۸۸-۱۳۸۱) و اعتبارسنجی (۱۳۹۳-۱۳۸۹) وارد مدل شد. سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ به‌عنوان پیش‌بینی در نظر گرفته شد.

در مرحله واسنجی، انتخاب پارامترهای واسنجی اهمیت بسیاری دارد. تحلیل حساسیت یکی از روش‌های انتخاب پارامترهای واسنجی به شمار می‌رود. در این پژوهش از الگوی دومرحله‌ای برای واسنجی مدل SWAT استفاده شد. در مرحله اول به دلیل حساسیت زیاد مدل به پارامتر شماره منحنی (Faramarzi et al. 2010; Lu et al. 2015)، این پارامتر (CN2) در تنوع کاربری اراضی و الگوی کشت مختلف بهینه‌سازی شد. در مرحله دوم، با ثابت در نظر گرفتن CN2 بهینه‌شده، ۴۵ پارامتر ورودی دیگر به‌منظور انتخاب پارامترهای مؤثر در نتایج خروجی SWAT، حساسیت‌سنجی شد. در این راستا، حساسیت پارامترهای مؤثر در ذوب برف، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی، هندسه مسیر جریان و زبری بستر بررسی شد.

نتایج تحلیل حساسیت جهانی در روش حل SUFI2، برای پارامترهای مؤثر در دبی رودخانه قزل‌اوزن در (جدول ۲) ارائه شده است. در این شکل، مقادیر t-test بزرگ و p-value کوچک، نشانگر حساس‌ترین پارامترها در برآورد دبی رودخانه قزل‌اوزن

هستند.

مطابق با نتایج، در مرحله اول حساسیت‌سنجی، پارامتر شماره منحنی (CN2) به تفکیک کاربری اراضی و الگوی کشت مرتع، شهری، محصولات کشاورزی ردیفی، گندم پاییزه، باغ و شالیزار دارای بیشترین حساسیت معرفی شدند. در مرحله دوم حساسیت‌سنجی به ترتیب پارامترهای $v_SURLAG.bsn$ و $v_CH_N2.rte$ که بیانگر ویژگی‌های مؤثر بستر خاک در تولید رواناب هستند و پارامترهای $v_SMFMN.bsn$ ، $v_TIMP.bsn$ و $v_SFTMP.bsn$ نشانگر ویژگی‌های برف دارای درجه زیاد اهمیت بودند. این نتایج با مطالعات سایر مناطق کوهستانی تطابق دارد (Nossent et al., 2011) و (Akhavan et al., 2010).
سنجش آماری عدم قطعیت در روش SUFI2، توسط ضرایب R-factor و P-factor انجام شد. به‌منظور بررسی دقت واسنجی و اعتبارسنجی، پارامترهای آماری R^2 و NSE به کار گرفته شد (Faramarzi et al., 2010).

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در رودخانه قزل‌اوزن

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از دبی ماهانه مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری قره‌گونی، ماهنشان و گیلوان انجام شد. تحلیل‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی دبی رودخانه قزل‌اوزن، توسط گزاره‌های آماری معرفی‌شده، در (جدول ۳) ارائه شده است. مقادیر نسبتاً کوچک (حالت ایده آل صفر) r-factor بیانگر واسنجی خوب و مقادیر زیاد (حالت ایدئال یک) P-factor، نشان‌دهنده درصد مناسب داده‌های مشاهده‌ای در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌باشد (Faramarzi et al., 2009). در تمام ایستگاه‌ها، مقدار شاخص‌های آماری NSE و R^2 بیش از ۰/۵ هستند که نشانگر دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی می‌باشد.

در این پژوهش، به جهت توجه به منابع عدم قطعیت و اعمال مدیریت‌های زراعی (تفکیک زمین‌های کشاورزی بر حسب نوع محصول در نقشه کاربری اراضی) و مدیریت‌های تاسیساتی (تعیین محل احداث سدهای در دست ساخت در نقشه کاربری اراضی) در ورودی مدل SWAT و به دلیل عدم پیچیدگی شرایط هیدروولوژیکی و فیزیوگرافی در بخش‌های میانی و انتهایی محدوده مورد مطالعه، نتایج اعتبارسنجی ایستگاه‌های گیلوان و ماهنشان تا حدی از دقت بیشتری برخوردار است. به‌گونه‌ای که میزان ضریب R^2 در این ایستگاه‌ها به ترتیب از ۰/۷۱ به ۰/۷۷ و از ۰/۶۴ به ۰/۶۷ ارتقاء یافت.

نتایج پژوهشی در حوضه بهار نیز نشان داد که در برخی ایستگاه‌های موردبررسی عدم توجه به تغییرات کاربری اراضی طی زمان، منجر به کاهش شدید دقت اعتبارسنجی شده است (Akhavan *et al.*, 2010).

حال آنکه در ایستگاه قره‌گونی نتایج اعتبارسنجی دبی نسبت به واسنجی دچار افت شده است؛ بنابراین می‌توان گفت، در ابتدای محدوده مورد مطالعه، اعمال عدم قطعیت مدیریت‌های منطقه، در سال‌های پایانی شبیه‌سازی به‌خوبی صورت نگرفته است.

جدول ۲- حساسیت‌سنجی و مقدار بهینه پارامترهای مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رودخانه قزل اوزن

P- value	t- test	مقدار بهینه	مرحله	توضیح	پارامتر
$3/6 \times 10^{-32}$	30/47	73	1	شماره منحنی مرتع	r_CN2- RNGE.mgt
$1/9 \times 10^{-27}$	26/70	91	1	شماره منحنی مناطق شهری	r_CN2- URBN.mgt
$3/8 \times 10^{-21}$	19/39	71	1	شماره منحنی محصولات کشاورزی ردیفی	r_CN2- AGRRR.mgt
$7/3 \times 10^{-17}$	14/71	75	1	شماره منحنی گندم پاییزه	r_CN2- SWHT.mgt
$5/8 \times 10^{-14}$	12/73	69	1	شماره منحنی باغ	r_CN2- ORCD.mgt
$4/6 \times 10^{-9}$	8/46	87	1	شماره منحنی اراضی شالیزاری	r_CN2- RICE.mgt
$8/0 \times 10^{-12}$	1/0/2	1/23	2	زمان تأخیر رواناب سطحی	v_SURLAG.bsn
$9/2 \times 10^{-3}$	2/98	0/0156	2	مقدار ضریب مانینگ در کانال اصلی	v_CH_N2.rte
$6/8 \times 10^{-11}$	9/26	1/23	2	حداقل نرخ ذوب برف در سال	v_SMFMN.bsn
$4/2 \times 10^{-9}$	8/0/3	0/018	2	فاکتور تأخیر دمای برف	v_TIMP.bsn
$9/1 \times 10^{-7}$	7/39	0/36	2	دمای ریزش برف (درجه سانتی‌گراد)	v_SFTMP.bsn
$4/0 \times 10^{-3}$	2/78	3/45	2	متوسط شیب کانال اصلی	v_CH_S2.rte
$6/3 \times 10^{-4}$	4/0/6	12/75	2	حداکثر نرخ ذوب برف در سال	v_SMFMX.bsn
$3/3 \times 10^{-5}$	4/19	0/0098	2	فاکتور آلفای جریان پایه (روز)	v_ALPHA_BF.gw
$2/4 \times 10^{-1}$	0/63	0/0062	2	ضریب مانینگ در کانال‌های فرعی	v_CH_N1.rte
$3/3 \times 10^{-2}$	1/0/7	0/78	2	ضریب واسنجی زمان ذخیره در جریان نرمال در روش ماسکینگ‌هام	v_MSK_CO1.bsn
$5/8 \times 10^{-1}$	0/87	1/89	2	ضریب واسنجی زمان ذخیره در جریان کم در روش ماسکینگ‌هام	v_MSK_CO2.bsn
$9/0 \times 10^{-2}$	1/63	57	2	متوسط طول شیب (متر)	v_SLSUBBSN.hru
$6/3 \times 10^{-2}$	1/32	0/0013	2	مقدار ضریب مانینگ در جریان زمینی	v_OV_N.rte
$3/9 \times 10^{-3}$	2/43	0/0068	2	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر ساعت)	r_SOL_K.sol
$1/4 \times 10^{-3}$	2/11	1/3	2	چگالی ظاهری خاک	r_SOL_BD.sol
$4/7 \times 10^{-12}$	9/56	2/38	2	انحراف معیار بارندگی روزانه در ماه	r_PCPSTD.wgn
$1/9 \times 10^{-1}$	0/39	231/65	2	ضریب هدایت هیدرولیکی در کانال اصلی (میلی‌متر بر ساعت)	v_CH K2.rte

جدول ۳- نتایج آماری واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مورد مطالعه

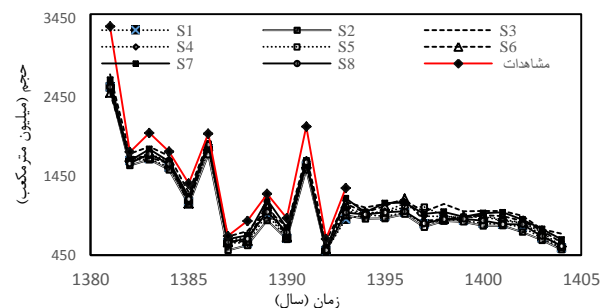
P- factor	r- factor	NSE	R ²	گزینه ارزیابی	نام ایستگاه
0/55	0/69	0/61	0/59	واسنجی	قره‌گونی
0/53	0/76	0/57	0/54	اعتبارسنجی	
0/55	0/59	0/69	0/64	واسنجی	ماه‌نشان
0/61	0/51	0/63	0/67	اعتبارسنجی	
0/72	0/43	0/70	0/71	واسنجی	گیلوان
0/78	0/40	0/75	0/77	اعتبارسنجی	

قابل‌رؤیت است. در گزینه مدیریتی S_1 که بیانگر شرایط واقعی منطقه است، بیشترین اختلاف مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی SWAT در سال ۱۳۸۱ مشاهده شد. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین میزان بارش برف منطقه و بیشترین دبی‌های ماهانه در رودخانه قزل‌اوزن متعلق به سال ۱۳۸۱ است، به‌گونه‌ای که در ماه‌های زمستان و بهار دبی‌های اوج فراتر از میزان متوسط درازمدت منطقه رخ داد؛ بنابراین ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی‌های اوج ماه‌های مورد مطالعه، در نتایج سالانه حجم رودخانه آشکار شد. علی‌رغم این‌که تلاش شد، ضعف شبیه‌سازی دبی‌های اوج، توسط واسنجی دومرحله‌ای برطرف گردد، اما نتایج خروجی مدل SWAT نشان داد که این روش در تمامی سال‌ها قادر به بهبود نتایج مدل SWAT نبود. در پژوهشی در هندوستان، برای کاهش ضعف مدل SWAT در برآورد رواناب سطحی، روش CN بر اساس رطوبت خاک اصلاح شد. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری میانگین‌گیری مدل بیزن^۱ موجب بهبود جزئی شبیه‌سازی مدل SWAT شد (Yen et al., 2015). در مطالعه دیگری که به‌منظور تحلیل اجزای بیلان آب توسط مدل SWAT در منطقه کوهستانی شمال غرب چین انجام شد، نتایج نشانگر عدم دقت در برآورد دبی اوج رودخانه بود (Lu et al., 2015).

توجه کلی به نتایج مدل SWAT در زمینه حجم آب تحویلی رودخانه قزل‌اوزن به استان گیلان (سد سفیدرود) نشان داد که یکی از دلایل تشدید بحران آب در استان گیلان، کشت محصولات زراعی پرمصرف مانند برنج در استان‌های بالادست (زنجان و آذربایجان شرقی) است (شکل ۵). گزینه مدیریتی S_3 به جهت آیش قرار دادن اراضی شالیزاری، موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع آب سطحی حوضه آبریز قزل‌اوزن شد به‌گونه‌ای که گزینه مدیریتی S_3 ، به‌طور متوسط موجب ۱۲ درصد افزایش در آب ورودی به استان گیلان شد. بررسی اجمالی گزینه‌های هشت‌گانه مدیریت اعمال‌شده در منطقه نشان داد که تغییر الگوی کشت و عدم کشت برنج در برخی سال‌ها در گزینه‌های مدیریتی S_7 و S_6 در حدود ۱۲۰-۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال موجب مصرف آب در محدوده مطالعه است؛ بنابراین جایگزین کردن سایر محصولات زراعی، قادر است مصرف آب کشاورزی را کاهش دهد به‌گونه‌ای که سیستم‌های کشت جایگزین گندم ۱۰۰ درصد دیم، گندم آبی- دیم، گندم- جو، گندم- سیب‌زمینی و گندم ۱۰۰ درصد آبی به ترتیب در

خطای مدل‌سازی در ایستگاه گیلوان را می‌توان ناشی از فاصله زیاد این ایستگاه از ایستگاه ماقبل (ماهنشان) دانست؛ زیرا در منطقه میانه واقع در استان آذربایجان شرقی به دلیل محدودیت دسترسی به دانه‌های هیدرولوژی، اطلاعات ایستگاه هیدرومتری موردبررسی قرار نگرفت. از سوی دیگر، شرایط پیچیده هیدرولوژیکی منطقه، وجود معادن متعدد فلزی و غیرفلزی، تراکم صنعت و کشاورزی و بارش زیاد برف، عامل مهمی در ضعف نتایج ایستگاه‌های قره‌گونی و ماهنشان محسوب می‌شود. به‌طورکلی، مدل SWAT دبی رودخانه قزل‌اوزن را در ایستگاه قره‌گونی با کمترین دقت و بیشترین عدم قطعیت واسنجی و اعتبارسنجی نمود. در مجموع با توجه به تحقیقات پیشین (Gassman et al. 2007; Akhavan et al. 2010; Faramarzi et al. 2010) می‌توان گفت نتایج واسنجی و اعتبارسنجی کل حوضه آبریز قزل‌اوزن، با توجه به نتایج مطلوب به‌دست‌آمده در خروجی حوضه آبریز (ایستگاه گیلوان) قابل‌قبول و رضایت‌بخش می‌باشد. با توجه به دقت مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی منطقه در گزینه مدیریت S_1 ، می‌توان دقت نتایج این مدل در شبیه‌سازی گزینه‌های S_2 تا S_8 قابل‌قبول ارزیابی کرد و مدل SWAT را در شرایط مختلف کاربری اراضی اجرا نمود.

انتخاب مناسب‌ترین گزینه مدیریتی بر اساس منافع هیدرولوژیکی بالادست و پایین‌دست محدوده مورد مطالعه حجم سالانه آب خروجی از استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی، با توجه به گزینه‌های مدیریت هشت‌گانه‌ای که در پژوهش حاضر برای مدل SWAT تعریف شد، طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۸۱ از نتایج دبی ماهانه مدل SWAT در ایستگاه خروجی گیلوان (ورودی به استان گیلان) استخراج شد (شکل ۶).



شکل ۵- مقادیر سالانه حجم آب ورودی به استان گیلان از شاخه قزل‌اوزن با استفاده از خروجی مدل SWAT

نتایج شکل (۵) نشان داد که خروجی مدل SWAT طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۹۳ همواره کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است. این مطلب در مورد همه گزینه‌های مدیریتی

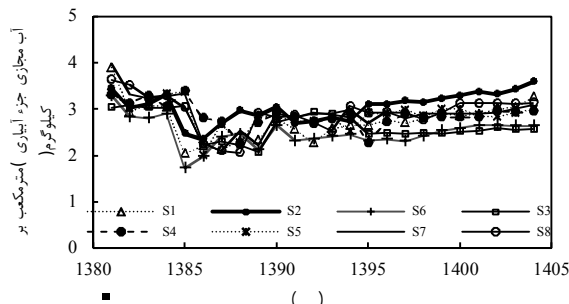
در آینده، میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج تا سال ۱۴۰۴ همواره رو به افزایش است درحالی‌که آب مجازی بخش آبیاری محصول گندم دارای شیب افزایشی کند و گاهی با کاهش آب مجازی بخش آبیاری همراه است؛ بنابراین در آینده نزدیک، حفظ شرایط فعلی الگوی کشت در استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی منجر به شرایط نامطلوب کشت برنج در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن می‌شود و بهره‌وری آب در کشت برنج کاهش خواهد یافت.

از سوی دیگر، گندم محصول زراعی راهبردی ایران محسوب می‌شود که خودکفایی در تولید محصول گندم، امنیت غذایی کشور را فراهم می‌سازد (Zare et al. 2006)؛ بنابراین اهمیت برنامه‌ریزی برای تولید روزافزون گندم به جهت خوداتکایی آشکار است. از آنجایی‌که عملکرد گندم دیم با کاهش زیادی روبرو است (Daneshvar et al., 2006)، به جهت ترغیب کشاورزان به تغییر الگوی کشت، گزینه‌های S4 و S6 با اعمال سیستم کشت ترکیبی آبی و دیم به‌منظور افزایش تولید محصول گندم، در محدوده مورد مطالعه قابل توصیه است. از طرفی، آمارنامه جهاد کشاورزی (۲۰۱۳) نیز نشان داد که هزینه‌های کشت گندم در مراحل مختلف آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت در مقایسه با کشت برنج بسیار اندک (حدود نصف) است. درنهایت، با توجه به مطالعات (Zare et al. 2006) برای مقابله با بحران امنیت غذایی، تأکید بر خودکفایی ملی گندم، استفاده بهینه از منابع آب، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کمیت و کیفیت آب بالادست حوضه آبریز سفیدرود گزینه مدیریتی S6 به‌عنوان الگوی کشت مناسب در بالادست حوضه آبریز سفیدرود در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن توصیه می‌شود.

انتخاب مناسب‌ترین گزینه مدیریتی بر اساس آب مجازی بخش

آبیاری برنج استان گیلان

برآورد آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان، پس از اعمال تنش آبی و شوری متأثر از شرایط الگوی کشت در استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی و بهره‌برداری از منابع آب در گزینه‌های مختلف مدیریتی بالادست در شکل (۷) نشان داده شده است.



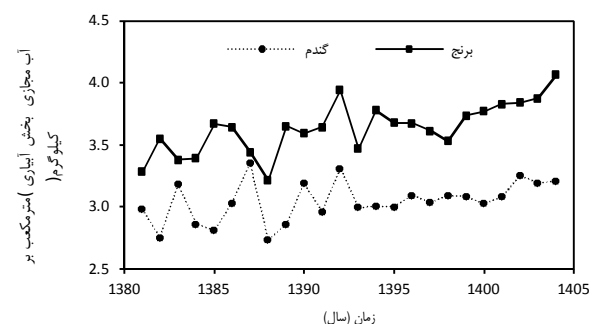
شکل ۷- میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج استان گیلان با تأثیر شوری بر عملکرد محصول در گزینه‌های مدیریتی مختلف

گزینه‌های مدیریتی S7، S6، S4، S5 و S8 موجب افزایش ۴، ۵، ۶ و ۸ درصدی حجم سالانه خروجی رودخانه قزل‌اوزن شدند. کمترین حجم سالانه آب در خروجی رودخانه قزل‌اوزن در گزینه مدیریتی S2 به دست آمد. در این گزینه مدیریتی، حفظ الگوی کشت فعلی، کاشت برنج در زمین‌های حاشیه قزل‌اوزن و آبیاری فرضی سدهای مخزنی در دست ساخت منطقه (پاوه‌رود، مراش) موجب شد حجم آب سد سفیدرود به‌طور متوسط ۶ درصد کاهش یابد.

به‌طور کلی، شکل (۵) نشان داد که روند کاهش حجم آب ورودی به استان گیلان از شاخه قزل‌اوزن طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ در تمام گزینه‌های مدیریتی قابل مشاهده است. از سویی، در اثر تغییر الگوی کشت و عدم کشت برنج در مناطق مورد مطالعه و جایگزینی محصول گندم، همواره حجم آب قزل‌اوزن در نقطه ورودی به استان گیلان نسبت به شرایط فعلی (S1) افزایش یافت؛ بنابراین، افزایش حجم آب قزل‌اوزن در گزینه‌های مدیریتی S4-S8 موجب بهبود در تخصیص آب به کشت برنج در پایین دست (استان گیلان) شد.

انتخاب مناسب‌ترین گزینه مدیریتی بر اساس منافع کشاورزی بالادست محدوده مورد مطالعه

به جهت نقش راهبردی محصولات گندم و برنج در کشور و استقبال برای کشت این محصولات در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن، در راستای انتخاب الگوی کشت مناسب در استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی، نگاه اصلی به این دو محصول صورت گرفت. متوسط آب مجازی بخش آبیاری محصولات گندم و برنج حاشیه قزل‌اوزن، در گزینه‌های مدیریتی هشت‌گانه طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۸۱ بر اساس نتایج مدل SWAT در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۶- میانگین آب مجازی بخش آبیاری محصولات زراعی برنج و گندم در بالادست سفیدرود بر اساس گزینه‌های مدیریتی هشت‌گانه

با استناد به شکل (۶)، مشخص شد آب مجازی بخش آبیاری برنج در بالادست حوضه آبریز سفیدرود، همواره بالاتر از متوسط آب مجازی بخش آبیاری گندم است. با توجه به روند کاهش حجم (شکل ۵) و افزایش شوری (شکل ۲) آب قزل‌اوزن

گندم آبی- دیم (S_6) در اراضی کشاورزی حاشیه قزل‌اوزن (میانه، طارم و گیلوان) علاوه بر بهبود کمیت و کیفیت آب ورودی به استان گیلان موجب جلوگیری از افزایش نامتعارف آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان شد. نتایج این پژوهش، با تأیید مطالعات (Khalilian et al (2012)؛ و Shinde et al. (2015) نشان داد که تغییر الگوی کشت از طریق کاهش مصرف آب منجر به دستیابی به اهداف تبادل آب مجازی بخش آبیاری در بخش‌هایی از حوضه آبریز دریای مازندران شد.

نتیجه‌گیری

بررسی تبادل آب مجازی بخش آبیاری در مقیاس درون حوضه‌ای دریای مازندران، در بخش‌هایی از حوضه آبریز دریای مازندران در حاشیه قزل‌اوزن و استان گیلان، نشان داد، علی‌رغم گستردگی حوضه مورد مطالعه، توجه به عوامل مؤثر در عدم قطعیت حوضه آبریز، منجر به برآورد نسبتاً مطلوب دبی رودخانه (R^2 و NS بیش از ۵۰ درصد) توسط مدل SWAT گردید.

بررسی الگوهای کشت هشت‌گانه از طریق ترکیب مدل SWAT و مدل سری زمانی ARIMA نشان داد که در بالادست محدوده مطالعه (طارم، ماهنشان و میانه) در راستای کاهش آب مجازی بخش آبیاری، کشت گندم در مقایسه با برنج مناسب‌تر است؛ زیرا در منطقه مذکور، آب مجازی بخش آبیاری گندم و برنج به ترتیب در محدوده ۲/۷۳-۳/۲۴ و ۲/۰۶-۳/۲۸ مترمکعب بر کیلوگرم برآورد شد. به‌طور کلی، کشت گندم در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن، به دلیل میزان کمتر آب مجازی بخش آبیاری در مقایسه با کشت برنج، کاهش هزینه تولید، هم‌سویی با سیاست‌های کلان کشور و کاهش فشار به منابع آب در درازمدت موجب رضایت کشاورزان، برنامه‌ریزان صنعت آب و سیاستمداران کشوری و منطقه‌ای خواهد شد.

بررسی شرایط پایین‌دست مطالعه نیز نشان داد که گزینه مدیریت S_6 آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان را نسبت به گزینه S_1 از ۲/۰۳-۳/۸۹ به ۱/۷۲-۳/۲۸ مترمکعب بر کیلوگرم کاهش داد. در نهایت بر اساس ارزیابی کلی می‌توان، گزینه مدیریتی S_6 را به دلیل بهبود کمیت (افزایش سالانه حدود ۵ درصدی)، کیفیت (شوری) آب رودخانه قزل‌اوزن و مناسب‌تر بودن وضعیت اقتصادی کشاورزان بالادست و پایین‌دست به جهت کاهش آب مجازی بخش آبیاری گندم در حاشیه قزل‌اوزن (استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی) و برنج در استان گیلان قابل توصیه دانست.

نتایج ارائه‌شده در (شکل ۷) نشان می‌دهد که با اعمال شرایط فعلی، حداکثر میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج در سال ۱۳۸۱ رخ داد که در این سال علی‌رغم افزایش حجم آب ورودی از شاخه قزل‌اوزن، محصول برنج گیلان متناسب با حجم آب ورودی به استان تولید نگردید. نکته حائز اهمیت در شکل (۷)، اختلاف میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج در الگوی S_1 و S_2 است. نتایج حاکی از آن است که استمرار کشت برنج در بالادست سفیدرود و احداث سدهای مخزنی، به جهت کاهش عملکرد محصول و کاهش حجم آب ورودی به استان گیلان می‌تواند باعث افزایش میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان شود که امری نامطلوب در مدیریت منابع آب است. نتایج (شکل ۷) نشان داد، طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ بر اساس الگوهای S_1 و S_2 ، روند افزایشی آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان، با شیب تند و در الگوهای S_6 ، S_7 ، S_4 ، S_5 و S_8 با شیب نسبتاً ثابت همراه است؛ زیرا در گزینه‌های مدیریتی S_1 و S_2 کاهش کمیت و کیفیت آب ورودی و در نتیجه کاهش عملکرد محصول برنج ملموس‌تر است. بر اساس فرض اولیه، شیب تغییرات شوری آب رودخانه قزل‌اوزن، به ترتیب در الگوهای مدیریتی S_6 ، S_7 ، S_4 ، S_5 و S_8 و S_1 افزایش یافت؛ بنابراین تغییرات کاهش عملکرد محصول بر اساس معادله (۲)، در گزینه مدیریتی S_2 شدیدتر است. در حالی که در گزینه‌های مدیریتی S_6 ، S_7 ، S_4 ، S_5 و S_8 روند تغییرات کمیت و کیفیت آب ورودی به‌گونه‌ای است که با کاهش جزئی عملکرد محصول، میزان آب مجازی بخش آبیاری تا حدی ثابت ماند.

مقایسه شکل‌های (۶ و ۷) نیز نشان داد که میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج در بالادست سفیدرود در اکثر سال‌ها بیش از ۳ مترمکعب بر کیلوگرم و در سال ۱۴۰۴، به میزان حدود ۴ مترمکعب بر کیلوگرم برآورد شد. در حالی که کشت برنج در استان گیلان، بر اساس مدیریت فعلی بالادست (S_1)، به جز سال پرآب ۱۳۸۱، همواره کمتر از ۳/۲ مترمکعب بر کیلوگرم می‌باشد؛ بنابراین حتی با حفظ شرایط فعلی، کشت برنج در استان گیلان به لحاظ مصرف مناسب آب و عملکرد محصول در مقایسه با کشت برنج در حاشیه قزل‌اوزن از توجیه فنی و اقتصادی بالاتری برخوردار است. نتایج نشان داد در سال‌های ۱۴۰۴-۱۳۹۴ میزان آب مجازی بخش آبیاری برنج گیلان به میزان ۳/۲-۲/۵ مترمکعب بر کیلوگرم نوسان داشت، حال آنکه در این بازه زمانی آب مجازی بخش آبیاری برنج بالادست سفیدرود، حداقل ۳/۵ مترمکعب بر کیلوگرم تعیین شد. در مجموع، نتایج شکل (۷) نشان داد که مدیریت کشت ترکیبی

REFERENCES

Abbasi, F., Naseri, A., Sohrab, F., Baghani, J., Abbasi, N. and Akbari, M. (2015). Improve water use

efficiency. Agricultural engineering research institute. (In Farsi)

- Allan, J. A. (1997). Virtual water: A long-term solution for water short Middle Eastern economies. Paper presented at the 1997 British Assoc. Festival of Sci., University of Leeds, UK.
- Agricultural Jihad statistics. (2013). Agricultural products and Cost of production, from <http://amar.maj.ir>. (In Farsi)
- Agricultural Jihad studies. (2012). Detailed studies of the Sefidrud basin, from <http://www.zwd.ir>. (In Farsi)
- Akhavan, S., Abedi-Koupai, J., Mousavi, S. F., Afyuni, M., Eslamian, S. S. and Abbaspour, K. (2010). Application of SWAT model to investigate nitrate leaching Hamadan–Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139 (4), 675-688.
- Antonelli, M. and Sartori, y. (2015). Unfolding the potential of the virtual water concept. What is still under debate? *Environmental science & policy*, 50 (2), 240 – 251. (In Farsi)
- Daneshvar, M., Dehghanian, S., Hatef, H. and Sarvari, A. A. (2006). The analysis of wheat comparative advantage in Mashhad plain. *Agricultural sciences and thechnology*, 21 (1), 45-52.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrol. Process*, 23 (3), 486–501.
- Faramarzi, M., Yang, H., Mousavi, J., Schulin, R., Binder, C. and Abbaspour, K. (2010). Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 7 (3), 2609-2649.
- Fracasso, A., Sartori, M. and Schiavo, S. (2015). Determinants of virtual water flows in the Mediterranean. *Science of the Total Environment*, xxx (x) xxx–xxx. (Accepted Manuscript)
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. and Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Direction. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211-1250.
- Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, Sh. and Oki, T. (2010). An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*. 384 (3), 232–244.
- Khalilian, S., Chizari, A. and Afsari Badi, R. (2012). Determining the Optimum-Cropping Pattern of Crops with Emphasis on Maximization of Social Profit and Virtual Water Trade (Case Study: Varamin Plain). *Agricultural Economic and Development*, 79 (3), 1-23. (In Farsi)
- Lu, Z., Zou, S., Xiao, H., Zheng, C., Yin, Z. and Wang, W. (2015). Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 79 (1), 76–85.
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Science*, 15 (5), 1577–1600.
- Nossent, J., Elsen, P. and Bauwens, W. (2011). Sobol’ sensitivity analysis of a complex environmental model *Environmental Modelling & Software*, 26 (3), 1515-1525.
- Salami, H. and Mohtashami, T. (2015). The projection model of Iran’s crop production in 2025. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 45 (4), 585-599.
- Shi, C. and Zhan, J. (2015). An Input-Output table based analysis on the virtual water by sectors with the five northwest provinces in China, *Physics and Chemistry of the Earth*, xxx (x) xxx–xxx. (Accepted Manuscript)
- Shinde, S.E., Ingle, P.M., Mane, M.S., Thoka R.T. and Ayare, B.L. (2015). Optimal cropping pattern for sustainable water use in canal command AREA. *Research Journal of Recent Sciences*, 3(4), 25-28.
- Sun, Sh., Wang, Y., Engel, and Wu, P. (2016). Effects of virtual water flow on regional water resources stress: A case study of grain in China. *Science of the Total Environment*, 550 (3), 871-879.
- Tian, G. (2013). Effect of Consumption of Livestock Products on Water Consumption in China Based on Virtual Water Theory. *International Conference on Future Information Engineering*, 5 (3), 112 – 117.
- Valipour, M., Banihabib, M. E., Seyyed. and Behbahani, M. R. (2013). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *Journal of Hydrology*, 476 (7), 433-441.
- Van Genuchten, M. Th. and Hoffman, G. J. (1984). Analysis of crop salt tolerance data. Soil Salinity under Irrigation- process and management. *Ecological Studies* 51, Springer-Verlag, New York, United State, pp. 258-271.
- Water Comprehensive plan. (2011). Environmental report in the Sefidrood Basin. (In Farsi)
- Yen, H., White, M., Jeong, J., Arabi, M. and Arnold, G. (2015). Evaluation of lternative surface runoff accounting procedures using the SWAT model *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8 (1), 1-17.
- Zare, A., koocheki, A. and Nassiri, M. (2006). Trend analysis of yield, production and cultivated area of cereal in Iran during the last 50 years and prediction of future situation. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 4 (1), 49-69. (In Farsi)