

مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی

بهنوش فرخ‌زاده^{۱*}، محمد مهدوی^۲، علی سلاجقه^۳ و آرش ملکیان^۴

چکیده

جهت در نظر گرفتن ابعاد و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب، امروزه مدیران و برنامه‌ریزان برای رسیدن به تصمیمات بهینه، به استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی به عنوان ابزاری کارآمد روی آورده‌اند. در پژوهش حاضر برای بررسی الگوی کشت موجود در دشت همدان - بهار و تدوین سناریوهای مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی، از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار لینگو استفاده شد. این مدل با هدف تعیین الگوی کشت بهینه، تعیین میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و حداکثر کردن سود حاصل از کشت محصولات تدوین شد و با توجه به قیود و محدودیت‌ها به اجرا درآمد. به منظور بررسی گزینه‌های مدیریتی، سه شیوه‌ی بهینه‌سازی الگوی کشت در وضع موجود، بهینه‌سازی الگوی کشت با اعمال محدودیت برداشت از منابع زیرزمینی، بهینه‌سازی الگوی کشت با تغییر در شیوه آبیاری تدوین و با استفاده از مدل اجرا شد. نتایج به دست آمده از اجرای مدل، حاکی از برتری تغییر شیوه آبیاری نسبت به دو شیوه‌ی دیگر است؛ به گونه‌ای که میزان آب مصرفی الگوی کشت ۲۳/۸ درصد کاهش و میزان تولید، سطح قابل کشت و سود به دست آمده به ترتیب ۱۳/۱ درصد، ۱۲/۷ درصد و ۱۵/۸ درصد نسبت به الگوی موجود افزایش نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی، دشت همدان - بهار، لینگو، مدیریت منابع آب.

ارجاع: فرخ‌زاده ب. محمد مهدوی م. سلاجقه ع. و آرش ملکیان آ. ۱۳۹۶. مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۱-۲۵: ۱۹-۱۱.

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر.

۲- استاد بازنشسته گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۴- استادیار گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: b.farokhzadeh@malaveru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۲

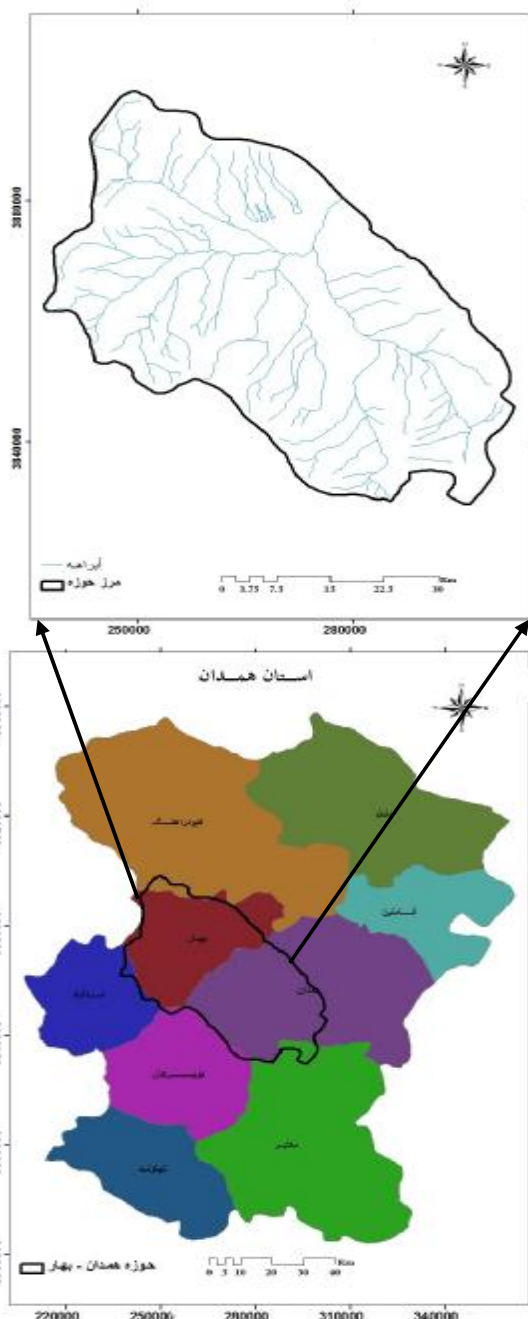
مقدمه

به منظور در نظر گرفتن ابعاد و پیچیدگی‌های متنوع و متفاوت سیستم‌های منابع آب، امروزه مدیران و برنامه‌ریزان برای رسیدن به تصمیمات بهینه، به استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی به عنوان ابزاری کارآمد روی آورده‌اند. گسترش دانش بشر، ایجاد ابزارهای نوین و ترکیب آنها با مدل‌های بهینه‌سازی موجود، فرصت‌های جدیدی را برای تصمیم‌گیری بهتر در زمینه‌ی توسعه و برنامه‌ریزی منابع آب در اختیار قرار داده است (ملکیان، ۱۳۸۷). استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، به تصمیم‌گیران این امکان را می‌دهد که بتوانند در بین راه‌حل‌های موجود در مسایل مربوط به منابع آب و خاک، مناسب‌ترین تصمیم و جواب بهینه را برای تخصیص منابع محدود به نیازهای نامحدود اتخاذ و دستیابی به حداکثر سود و حداقل هزینه و خسارت به منابع را امکان‌پذیر کنند (جلیلی و همکاران، ۱۳۸۴). بهینه‌سازی، روشی است که توسط آن بهترین جواب ممکن برای یک مسأله با توجه به هدف تعیین‌شده و قیدهای موجود که همه با توابع و روابط ریاضی مشخص شده‌اند، تعیین می‌شود. مسأله بهینه، دارای یک تابع هدف و چندین قید است که در مجموع خصوصیات سیستم مورد نظر را در بر می‌گیرد (قدمی، ۱۳۸۷). تصمیم‌گیری برای مدیریت منابع طبیعی، بسیار پیچیده است؛ زیرا شامل بهره‌برداران متعدد است و مکانیسم‌های ارتباط متقابل بین آنها وجود دارد (سینگ و سینگ، ۱۹۹۹). تصمیم‌گیران معمولاً با بهینه کردن همزمان چندین هدف مواجه‌اند؛ لذا استفاده از روش‌های نوین مدیریتی برای دستیابی به توسعه پایدار امری اجتناب‌ناپذیر است و برنامه‌ریزی ریاضی به عنوان یک روش مفید و کارا برای حل مسایل تخصیص منابع به خصوص زمانی که متغیرهای تصمیم، محدودیت‌ها و پارامترهای مختلفی بررسی شود، پیشنهاد می‌گردد (جلیلی و همکاران، ۱۳۸۴). در این زمینه و با توجه به نقش مدل‌های برنامه‌ریزی در مدیریت منابع آب، تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است. هال و دراکاپ (۱۹۷۰) از اولین پژوهش‌گرانی بودند که برنامه‌ریزی خطی را در تخصیص منابع آب و تعیین الگوی کشت پیشنهاد دادند. از آن پس از برنامه‌ریزی خطی به دلیل کاربردی بودن پژوهش‌گران مختلف استفاده کردند. خاره و جات (۲۰۰۵) به بررسی استفاده تلفیقی از منابع آب با توجه به

گزینه‌های مختلف کشت در اندونزی پرداختند. آنها از یک مدل بهینه‌سازی مهندسی- اقتصادی استفاده کردند تا امکان برداشت تلفیقی آب را با توجه به یک برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های مدیریتی و هیدرولوژیکی بسنجند. به این ترتیب به یک الگوی کشت بهینه برای استفاده بهینه از منابع آب با حداکثر سود خالص با توجه به محدودیت‌های فیزیکی- اقتصادی دست یافتند.

منتظر و رحیمی‌خوب (۲۰۰۸) مدل بهینه‌سازی غیرخطی را برای تخصیص بهینه‌ی آب و الگوی کشت تحت شرایط منابع آبی محدود توسعه دادند. ایشان سود خالص حجم آب تخصیص داده شده برای محصولات آبی را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند و در نهایت با مدل پیشنهادی، توانستند توزیع بهینه‌ی زمین، محصولات، تخصیص آب و حداکثر سود را به دست آورند. روحانی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار LINDO، چهار الگوی زراعی در دشت همدان- بهار برای دستیابی به الگوی کشت بهینه‌ای که با صرفه‌جویی در میزان آب مصرفی، موجب تعادل در بیلان منفی آبخوان شود، تدوین کردند. در این پژوهش در الگوی زراعی بهینه ارائه شده صرفه‌جویی در مصرف آب ۱۱/۷۴ درصد در نیروی کار ۲۱/۳۹ درصد در هزینه‌های جاری ۱۴/۴۲ درصد و در سرمایه‌گذاری سیستم‌های آبیاری تحت فشار ۱/۰۵ درصد و زمین ۲/۱۳ درصد بوده است و بازده برنامه‌ای آن ۳/۱۱ درصد بیش از وضع موجود است. بلالی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی با استفاده از برنامه‌ریزی پویا در دشت همدان- بهار به بررسی تأثیر قیمت‌گذاری آب آبیاری بر حفظ و بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی و شرایط اقتصادی بخش کشاورزی پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در صورت ادامه شرایط فعلی در سال ۱۳۸۹ حاکم بر قیمت آب آبیاری در منطقه مورد مطالعه آبخوان با بیلان منفی بیش از ۱۷۱ میلیون مترمکعب در انتهای دوره‌ی برنامه‌ریزی پنج ساله مواجه خواهد شد و در ازای افزایش قیمت آب آبیاری به ۱۵۰۰ ریال می‌رسد برای هر مترمکعب آب بیلان حجم آبخوان به صفر می‌رسد. طبری (۲۰۱۲) در پژوهشی با اهداف تأمین نیازهای آبی داخل حوضه، کاهش میزان آب خروجی از حوضه‌ی مرز ایران و افزایش انتقال آب به حوضه‌ی دریاچه ارومیه از مدل الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد با اعمال برنامه بهینه بهره‌برداری

اراضی باغی است. بخشی از اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه در شهرستان همدان و بخشی دیگر در شهرستان بهار قرار دارد. سیب‌زمینی، یونجه، گندم و جو، از مهم‌ترین محصولات کشت شده در این منطقه است (وزارت نیرو، ۱۳۸۹).



شکل ۱- نقشه موقعیت عمومی استان همدان و حوزه همدان -

بهار

تدوین شده می‌توان حجم قابل توجهی از منابع آبی داخل حوضه را به منظور احیای منابع آبی به بیرون از حوضه انتقال داد. طبری و همکاران (۲۰۱۲) به منظور برنامه‌ریزی بلندمدت تلفیقی، مدلی با هدف به حداقل رساندن میزان عدم تأمین نیاز سیستم با توجه به منابع آبی موجود در شهر تهران و کرج با استفاده از الگوریتم ژنتیک تدوین کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای سیاست‌های ارائه شده برای بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویهی آب در نتیجه استفاده نامطلوب از آن در اراضی کشاورزی بوده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه مدیریت منابع آب، با توجه به کمبود منابع آب، افت منابع زیرزمینی و منفی بودن بیلان آب زیرزمینی در حوضه همدان - بهار در سال‌های اخیر، در این تحقیق سعی شده با توجه به اولویت‌های تخصیص منابع آب در بحث بهره‌برداری تلفیقی و با در نظر گرفتن درصد تأمین نیاز آبی در بخش کشاورزی که در سایر پژوهش‌ها به آن کمتر توجه شده است، با مقایسه روش‌های مختلف برنامه‌ریزی، الگوی بهینه در زمینه کاهش افت منابع زیرزمینی و حذف بیلان منفی آبخوان ارائه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه همدان - بهار با عرض جغرافیایی بین طول شرقی $۴۸^{\circ} ۱۷'$ تا $۴۸^{\circ} ۳۳'$ و عرض شمالی $۳۴^{\circ} ۴۹'$ تا $۳۵^{\circ} ۰۲'$ است (شکل ۱). دشت فوق را از سمت جنوب ارتفاعات الوند، از سمت غرب ارتفاعات آلموبلاغ، شیخی جان و کمزرد از سمت شرق ارتفاعات ارجنی و قافلانته احاطه کرده‌اند.

از مجموع ۳۸۰ میلیون مترمکعب مصرف سالانه آب در حوضه همدان - بهار بیش از ۸۰٪ (۳۱۰ میلیون مترمکعب) به مصرف بخش کشاورزی می‌رسد. قابل ذکر است که از ۳۱۰ میلیون مترمکعب آب مصرفی بخش کشاورزی، حدود ۷۸٪ از منابع زیرزمینی و مابقی از منابع سطحی تأمین می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۸۹).

سطح کل زیرکشت محصولات باغی و زراعی در این منطقه، ۲۳ هزار و ۵۰۰ هکتار است که از این مقدار ۱۹ هزار هکتار سهم اراضی زراعی و ۴ هزار و ۵۰۰ هکتار سهم

Y_a عملکرد واقعی محصول i (کیلوگرم در هکتار)، Y_m عملکرد حداکثر محصول i (کیلوگرم در هکتار) ETa_i و ETp_i به ترتیب تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل گیاه در طول دوره رشد (میلی‌متر) Ky_i ضریب حساسیت گیاه نسبت به آب در مراحل مختلف رشد، و n بیانگر تعداد دوره‌های رشد گیاه است. از آن جایی که تعیین مقدار تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل گیاه نیازمند محاسبات بیلان آب در خاک دارد (نیری و ریدزوسکی، ۱۹۹۷) و (میبر و همکاران، ۱۹۹۳) به جای نسبت تبخیر- تعرق واقعی به پتانسیل در معادله (۱)، از نسبت آب تخصیص یافته به نیاز آبی گیاه استفاده کرده‌اند، که در این پژوهش نیز از این نسبت استفاده شده است.

ساختار مدل پیشنهادی در این تحقیق

معادله (۲) بیانگر تابع هدف مدل پیشنهادی است. هدف این تابع به حداکثر رسانیدن سود حاصل از فروش محصولات است.

$$\text{Maximize} = \sum_{i=1}^c A_i \times \left(\frac{y_{a_i}}{y_{m_i}} \right) \times y_{m_i} \times p_i \quad (2)$$

$i=1,2,3,\dots,c$

در این معادله A_i سطح زیرکشت محصول i (هکتار)،

$$= \frac{y_{a_i}}{y_{m_i}} \text{ تابع تولید (معادله (۱))}.$$

محصول i (کیلوگرم در هکتار). p_i سود محصول i به ریال (مجموع هزینه‌های تولید منهای قیمت فروش محصول) و i بیانگر نوع محصول است.

$$IR = \sum_{i=1}^c A_i dij \quad (3)$$

معادله (۳) بیانگر میزان آب مورد نیاز الگوی کشت (IR) با توجه به سطح زیرکشت محصول (A_i) و نیاز آبی محصول i ام (مترمکعب در هکتار) در سناریو زام است.

بر اساس معادله (۴) میزان کل حجم آب قابل تخصیص (V_t) (میلیون مترمکعب) به الگوی کشت برابر حجم قابل برداشت از منابع سطحی (S) و منابع زیرزمینی (G) است (معادله (۴)).

$$Vt = S + G \quad (4)$$

بخشی از اراضی کشاورزی در حوضه همدان- بهار در شهرستان بهار و بخش دیگر در شهرستان همدان قرار دارد. آب مورد نیاز بخش کشاورزی در شهرستان بهار به

برنامه‌ریزی خطی (LP)

با توجه به عوامل متغیرها، میزان دسترسی به داده‌ها، محدودیت و اهداف، سه روش عمده برای حل مسایل آب می‌توان بیان کرد که شامل برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و برنامه‌ریزی ریسکی است (اهرابی و شاکری، ۱۳۷۷). برنامه‌ریزی خطی، یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های بهینه‌سازی است. این نوع برنامه‌ریزی برای مسایل با روابط ساده مانند تخصیص مستقیم منابع تا مسایل پیچیده بهره‌برداری و مدیریتی قابل استفاده است. از آنجا که تمامی روابط ریاضی موجود در این مدل، از نوع درجه یک است، مدل خطی نامیده می‌شود (مهرگان، ۱۳۷۹). در مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، می‌توان تعداد زیادی از محدودیت‌های مختلف را در الگو وارد کرد که این امر سبب می‌شود جواب‌های بهینه بسیار نزدیک‌تر به الگوی واقعی باشند (روحانی و همکاران، ۱۳۸۶).

روش پژوهش

در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی خطی با اهداف ۱- تعیین الگوی کشت بهینه، ۲- تعیین میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و ۳- حداکثر کردن سود حاصل از کشت محصولات تدوین شد. مدل ارائه شده با توجه به میزان منابع آب موجود و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اعمال شده، الگوی کشت و میزان آب تخصیص یافته را به گونه‌ای محاسبه می‌کند که بیشترین سود حاصل از کشت محصولات به دست آید.

روابطی که شامل میزان مصرف آب و بازده محصولات و بیانگر زمان‌بندی و کمیت آبیاری هستند، توابع تولید نامیده می‌شوند. این معادلات به دلیل آنکه می‌بایست تأثیر تنش آبی را در مراحل مختلف رشد گیاه در نظر بگیرند معادلاتی پیچیدانه. با استفاده از یک تابع تولید مناسب می‌توان میزان تخصیص موجودی منابع آب محدود را به حداکثر رساند (قهرمان و سپاسخواه، ۲۰۰۴). از توابعی که به خوبی کلیه مراحل رشد گیاهی را پوشش می‌دهد، معادله (۱) است (راوو و همکاران ۱۹۸۸؛ دورنبوس و کاسم، ۱۹۷۹ و قهرمان و سپاسخواه، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۴). ویژگی این تابع لحاظ کردن تأثیر تغییرات تخصیص آب در میزان تولید و عملکرد محصول است.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[1 - Ky_i \left(1 - \frac{ETa_i}{ETp_i} \right) \right] \quad (1)$$

ب- رویکرد شماره دو: بهینه‌سازی الگوی کشت با اعمال محدودیت برداشت از منابع زیرزمینی؛ این روش به منظور بررسی تأثیر کاهش برداشت از آبخوان بر روی وضعیت الگوی کشت، تدوین شد. مطالعات انجام گرفته در حوضه همدان- بهار نشان می‌دهد میزان برداشت مجاز از منابع زیرزمینی با توجه به بیلان متوسط طولانی‌مدت آبخوان، سالانه در حدود ۲۴۷ میلیون مترمکعب است (وزارت نیرو، ۱۳۸۹). این میزان برداشت موجب می‌شود تا بین میزان تغذیه به آبخوان و میزان برداشت از آن، حالت توازن به وجود آید. در این روش میزان برداشت مجاز از منابع زیرزمینی به عنوان یک محدودیت به مدل وارد شد. در این روش نیز میزان راندمان مشابه روش یک است (معادله (۸)).

$$\sum_{i=1}^c A_i dij < 247 \dots \dots \dots \quad (8)$$

ج- رویکرد شماره سه: بهینه‌سازی الگوی کشت در تغییر شیوه آبیاری؛ راندمان پایین آب در روش‌های آبیاری سطحی از یک سو و نگرش جدید جهانی که آب را کالایی اجتماعی- اقتصادی می‌داند، از سوی دیگر امکان استفاده بهینه از آب کشاورزی را با اصلاح و یا تغییر در روش‌های آبیاری میسر کرده است. این امر در سال‌های اخیر، توجه برنامه‌ریزان و پژوهش‌گران کشاورزی را به منظور حصول راندمان ۷۰-۷۵ درصد با به کارگیری سیستم‌های تحت‌فشار به عنوان سیستمی مناسب و قابل جایگزین با سیستم سطحی معطوف ساخته است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۴). به منظور تعیین الگوی کشت زراعی بهینه در حالت تغییر شیوه آبیاری از سنتی به تحت‌فشار و بررسی میزان کاهش مصرف آب مورد نیاز هر محصول در راندمان ۷۰ درصد از نرم‌افزار AGWAT استخراج و وارد مدل شد. جدول ۱ میزان آب مورد نیاز محصولات غالب منطقه را در روش‌های تدوین شده نشان می‌دهد.

طور کامل از منابع زیرزمینی و در شهرستان همدان حدود ۸۰ درصد از منابع زیرزمینی و مابقی از منابع سطحی تأمین می‌شود. در این منطقه، اولویت اول تخصیص منابع آب با بخش شرب و اولویت دوم متعلق به بخش صنعت است و بخش کشاورزی در اولویت سوم قرار دارد. به دلیل این اولویت‌بندی و نیز کمبود منابع آبی در منطقه نیاز آبی الگوی کشت در منطقه به طور کامل تأمین نمی‌شود (فرخزاده، ۱۳۹۰؛ بی‌نام، ۱۳۸۶) که این مسأله با توجه به تابع تولید (معادله (۱)) باعث تنش آبی در مراحل مختلف رشد و کاهش تولید محصول می‌شود.

در معادله (۵)، Tp بیانگر میزان تولید محصول با توجه به سطح زیرکشت، تابع تولید و عملکرد حداکثری هر محصول است. معادلات (۶) و (۷) بیانگر محدودیت‌های اعمال شده در مدل هستند. معادله (۶) نشان‌دهنده محدودیت آب است؛ به گونه‌ای که مجموع کل آب تخصیص یافته به الگوی کشت، نباید از کل موجودی آب قابل تخصیص در حوضه بیشتر شود و معادله (۷) بیانگر محدودیت زمین می‌باشد به طوری که مجموع سطح کشت محصولات نباید از کل سطح قابل کشت در منطقه فراتر رود. در نهایت مدل با توجه به داده‌های وارد شده بر مبنای اطلاعات سال ۸۹ اجرا شد.

$$Tp = \prod_{i=1}^n \left[1 - Ky_i \left(1 - \frac{ETa_i}{ETP_i} \right) \right] y_{mi} \times \quad (5)$$

$$A_i \sum_{i=1}^c V_i < V_{max} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^c A_i < A_{max} \quad (7)$$

رویکردهای اعمال شده در مدل بهینه‌سازی

الف- رویکرد شماره یک: بهینه‌سازی الگوی کشت در وضع موجود؛ در این رویکرد، آب مورد نیاز الگوی کشت با توجه به راندمان آبیاری متوسط منطقه (۴۵ درصد) (وزارت نیرو، ۱۳۸۹) با استفاده از نرم‌افزار AGWAT و با توجه به نوع اقلیم، خصوصیات خاکشناسی، نوع و راندمان آبیاری و نوع الگوی کشت، تعیین شد.

جدول ۱- میزان آب مورد نیاز محصولات و میزان برداشت از منابع آب تحت رویکردهای مختلف (میلیون مترمکعب)

محصول	سطح زیرکشت (هکتار)	رویکرد یک	رویکرد دو	رویکرد سه
سیب‌زمینی	۷۰۰۰	۱۲۳/۹	۱۲۳/۹۰	۸۸/۲۸
گندم	۵۱۰۰	۳۰/۶۲	۳۰/۶۲	۲۱/۹۲
جو	۱۸۵۰	۱۱/۲۰	۱۱/۲۰	۶/۵۹
یونجه	۱۷۰۰	۳۰/۳۲	۳۰/۳۲	۲۲/۲۸
سیر	۱۲۰۰	۱۴/۱۰	۱۴/۱۰	۹/۸۷
چغندر	۶۲۰	۹/۹۵	۹/۹۵	۷/۳۲
گوجه‌فرنگی	۶۱۰	۱۱/۰۷	۱۱/۰۷	۷/۴۰
مجموع	۱۸۰۸۰	۲۳۱	۲۳۱/۱۶	۱۶۳/۶۶
	میزان برداشت از منابع سطحی	۴۶	۴۶	۳۲/۷۳
	میزان برداشت از منابع زیرزمینی	۱۸۴	۱۸۴	۱۳۰

نتایج و بحث

دلیل کاهش میزان درآمد، سطح کشت و تولید محصول، این روش الگوی بهینه‌ای نخواهد بود. در سناریو شماره سه، به دلیل افزایش راندمان و کاهش آب مورد نیاز محصول، درصد بیشتری از آب مورد نیاز الگوی کشت تأمین شده در نتیجه میزان عملکرد؛ تولید محصول و میزان درآمد افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که در این رویکرد، نسبت به رویکرد اصلاح وضع موجود، میزان آب مصرفی الگوی کشت ۲۳/۸ درصد کاهش و میزان تولید، سطح قابل کشت و سود به دست آمده به ترتیب ۱۳/۱ درصد، ۱۲/۷ درصد و ۱۵/۸ درصد نسبت به الگوی موجود (رویکرد اول) افزایش نشان می‌دهد. این رویکرد علاوه بر تأمین منافع اقتصادی، با کاهش برداشت از منابع زیرزمینی، موجب استفاده پایدار از منابع آبی می‌شود. قابل ذکر است محصول سیب‌زمینی به دلیل سطح زیرکشت و قیمت بالا نسبت به سایر محصولات دارای سود بیشتری است.

نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی در سه رویکرد اعمال شده، به ترتیب در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ آورده شده است. در رویکرد دوم در مقایسه با شیوه‌ی شماره یک به دلیل اعمال محدودیت در میزان آب برداشتی از منابع زیرزمینی، موجودی آب قابل تخصیص به الگوی کشت کاهش یافته و سطح قابل کشت محصولاتی مانند سیب‌زمینی، سیر و چغندر قند که نیاز آبی بالایی دارند، کمتر شده است. به دلیل اعمال محدودیت و کاهش آب تخصیص یافته، نسبت به آب مورد نیاز الگوی کشت، میزان سود، عملکرد و تولید محصول نسبت به روش اول کاهش یافته است؛ به طوری که در این رویکرد، سطح بهینه ۶/۷ درصد، میزان تولید ۱۸/۷ درصد و میزان سود خالص، ۹ درصد کاهش یافته است. هرچند که در این رویکرد، میزان آب برداشتی از آبخوان در حد مجاز بوده و با اجرای این گزینه، بیلان آبخوان منفی نخواهد بود، به

جدول ۲- نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت در شیوه وضع موجود (رویکرد اول)

محصول	سطح اولیه	سطح بهینه محصول (هکتار)	تولید (تن)	آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب در سال)	سود خالص (ده هزار ریال)
گندم	۵۱۰۰	۴۵۰۰	۵۱۹۵۵	۲۸/۸	۱۱۷۲۹۰۷
جو	۱۸۵۰	۱۴۰۰	۵۰۹۶	۹/۰۳	۱۹۶۲۷۰
چغندر قند	۶۲۰	۶۰۰	۲۵۱۷۳	۱۰/۲	۴۱۹۶۳۸
سیب‌زمینی	۷۰۰۰	۶۰۰۰	۱۰۸۷۲۳	۱۰/۸	۳۰۹۹۳۹۷۸
سیر	۱۲۰۰	۷۰۰	۲۲۳۸	۱۰/۵	۱۰۰۶۱۷۷
یونجه	۱۷۰۰	۱۴۰۰	۲۲۰۰۲	۲۶/۶	۲۲۴۲۹۸
گوجه‌فرنگی	۶۱۰	۴۰۰	۱۴۵۷۵	۷/۶	۱۱۲۸۱۸
مجموع	۱۸۰۸۰	۱۵۰۰۰	۲۲۹۷۶۲	۲۰۰/۷۳	۳۴۱۲۶۰۸۶

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت در شیوه برداشت محدود از آبخوان (رویکرد دوم)

محصول	سطح اولیه	سطح بهینه محصول (هکتار)	تولید (تن)	آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب در سال)	سود خالص* (ده هزار ریال)
گندم	۵۱۰۰	۴۵۰۰	۴۵۶۱۲	۲۸/۸	۱۱۷۲۹۰۷
جو	۱۸۵۰	۱۵۰۰	۴۷۱۶	۹/۶۸	۲۱۰۲۹۰
چغندر قند	۶۲۰	۶۰۰	۲۲۲۸۵	۱۰/۲	۴۱۹۶۳۸
سیب‌زمینی	۷۰۰۰	۵۵۰۰	۸۴۶۶۱	۹۹	۲۸۴۱۱۱۴۷
سیر	۱۲۰۰	۴۰۰	۱۱۸۳	۶	۵۷۴۹۵۸
یونجه	۱۷۰۰	۱۱۰۰	۱۵۵۹۰	۲۰/۹	۱۷۶۲۳۴
گوجه‌فرنگی	۶۱۰	۴۰۰	۱۲۷۳۲	۷/۶	۱۱۲۸۱۸
مجموع	۱۸۰۸۰	۱۴۰۰۰	۱۸۶۷۷۹	۱۸۲/۱۸	۳۱۰۷۷۹۹۱

جدول ۴- نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت در شیوه تغییر راندمان آبیاری (رویکرد سوم)

محصول	سطح اولیه	سطح بهینه محصول (هکتار)	تولید (تن)	آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب در سال)	سود خالص* (ده هزار ریال)
گندم	۵۱۰۰	۵۲۰۰	۶۰۳۴۸	۲۲/۷۸	۱۳۵۵۳۵۹
جو	۱۸۵۰	۱۵۰۰	۵۴۹۲	۵/۲۵	۲۱۰۲۹۰
چغندر قند	۶۲۰	۶۰۰	۲۵۳۸۷	۷/۲	۴۱۹۶۳۸
سیب‌زمینی	۷۰۰۰	۷۰۰۰	۱۲۷۶۵۴	۸۵/۷۵	۳۶۱۵۹۶۴۱
سیر	۱۲۰۰	۷۱۰	۲۴۰۳	۷/۱	۱۰۲۰۵۵۰
یونجه	۱۷۰۰	۱۵۰۰	۲۳۸۳۴	۲۰/۱	۲۴۰۳۲۰
گوجه‌فرنگی	۶۱۰	۴۰۰	۱۴۷۴۸	۴/۸	۱۱۲۸۱۸
مجموع	۱۸۰۸۰	۱۶۹۱۰	۲۵۹۸۶۵	۱۵۲/۹۸	۳۹۵۱۸۶۱۶

بیان آب زیرزمینی در سال آبی ۸۸-۸۹ در حوضه همدان بهار با توجه به میزان ۱۹۷ میلیون مترمکعب تغذیه و ۲۳۶ میلیون مترمکعب تخلیه از آبخوان برابر با منفی ۳۹ میلیون مترمکعب می‌باشد (فرخزاده، ۱۳۹۰). با توجه به نتیجه رویکرد سوم، در تغییر راندمان آبیاری از ۴۵ درصد به ۷۰ درصد، نیازی آبی محصولات عمده از ۲۳۱ میلیون مترمکعب در سال به ۱۵۰ میلیون مترمکعب می‌رسد و حدود ۸۰ میلیون مترمکعب در برداشت از منابع آبی صرفه‌جویی صورت می‌گیرد. از آنجایی که میزان برداشت بخش کشاورزی از منابع زیرزمینی در محدوده بیان حدود ۸۰ درصد است، با افزایش راندمان ۶۴ میلیون مترمکعب صرفه‌جویی صورت می‌گیرد و بیان آب زیرزمینی از منفی ۳۹ میلیون مترمکعب به مثبت ۲۵ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد. نتایج پژوهش روحانی و همکاران (۱۳۸۶)، قدمی (۱۳۸۷)، قاسمی (۱۳۸۹)، بانزاد و سیفی (۱۳۸۵)، خار و جات (۲۰۰۵) و منتظر و رحیمی خوب (۲۰۰۸) نشان داد در صورت اعمال محدودیت بر مصرف آب زیرزمینی در بخش کشاورزی و اصلاح و بهینه‌سازی الگوی کشت، می‌توان به طور قابل توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی و از بیان منفی منابع زیرزمینی منطقه جلوگیری کرد. میزان صرفه‌جویی در مصرف آب در رویکرد سوم (شیوه بهینه) نسبت به روش اصلاح وضع موجود، ۲۳/۸ درصد کاهش نشان می‌دهد؛ در صورتی که در پژوهش روحانی (۱۳۸۵) در دشت همدان، میزان صرفه‌جویی در مصرف آب در الگوی بهینه ارائه شده ۱۱/۷۴ درصد است؛ زیرا در الگوی بهینه ارائه شده در تحقیق ایشان، فقط ۴۷/۵۲ درصد سطح الگوی کشت به روش آبیاری تحت‌فشار، آبیاری می‌شود.

البته در این میان، به مسأله‌ای که باید توجه کرد هزینه‌ی سیستم‌های آبیاری است که رویکرد سوم نشان داد با

بیان آب زیرزمینی در سال آبی ۸۸-۸۹ در حوضه همدان بهار با توجه به میزان ۱۹۷ میلیون مترمکعب تغذیه و ۲۳۶ میلیون مترمکعب تخلیه از آبخوان برابر با منفی ۳۹ میلیون مترمکعب می‌باشد (فرخزاده، ۱۳۹۰). با توجه به نتیجه رویکرد سوم، در تغییر راندمان آبیاری از ۴۵ درصد به ۷۰ درصد، نیازی آبی محصولات عمده از ۲۳۱ میلیون مترمکعب در سال به ۱۵۰ میلیون مترمکعب می‌رسد و حدود ۸۰ میلیون مترمکعب در برداشت از منابع آبی صرفه‌جویی صورت می‌گیرد. از آنجایی که میزان برداشت بخش کشاورزی از منابع زیرزمینی در محدوده بیان حدود ۸۰ درصد است، با افزایش راندمان ۶۴ میلیون مترمکعب صرفه‌جویی صورت می‌گیرد و بیان آب زیرزمینی از منفی ۳۹ میلیون مترمکعب به مثبت ۲۵ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد. نتایج پژوهش روحانی و همکاران (۱۳۸۶)، قدمی (۱۳۸۷)، قاسمی (۱۳۸۹)،

منابع

۱. اهرابی ف. و عباس ش. ۱۳۷۷. اصول بهینه‌یابی پویا، نشر نی. ۲۸۰ ص.
۲. بانژاد ح. و سیفی الف. ۱۳۸۵. کنترل سطح آب زیرزمینی به وسیله تغییر الگوی کشت در دشت همدان بهار، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
۳. بلالی ح. خلیلیان ص و احمدیان م. ۱۳۸۹. بررسی نقش قیمت گذاری آب در بخش کشاورزی بر تعادل منابع آب زیرزمینی، نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی. ۲۴(۲): ۱۸۵-۱۹۴.
۴. بی‌نام. ۱۳۸۶. آمار پایه‌ای دفتر آب و خاک، سازمان جهاد کشاورزی استان همدان.
۵. جعفری ع. م. ۱۳۷۶. تحلیل اقتصادی سرمایه‌گذاری در تکنولوژی آب اندوز. مطالعه موردی در استان همدان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد اقتصاد کشاورزی، دانشگاه شیراز. ۱۷۵ ص.
۶. جلیلی خ. صادقی ح. ر. و نیک‌کامی د. ۱۳۸۴. مدیریت بهینه منابع آب و خاک با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی و مدل‌های کامپیوتری. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. کرمان. ۱۰۳۰-۱۰۴۳.
۷. علیزاده ح. احسانی م. ر. و زارع ابیانه ح. ۱۳۸۴. ارزیابی راندمان سیستم‌های تحت‌فشار در شرایط مزرعه. پنجمین کنفرانس دوسالانه اقتصاد کشاورزی ایران. دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.
۸. روحانی س. ۱۳۸۵. تعیین الگوی زراعی بهینه با تأکید بر پایداری منابع آب: مطالعه موردی دشت همدان- بهار. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران. ۱۸۰ ص.
۹. روحانی س. پیکانی غ. ر. و تقدیری ب. ۱۳۸۶. تعیین الگوی زراعی بهینه با تأکید بر پایداری منابع آب، مطالعه موردی دشت همدان بهار، پژوهش کشاورزی، آب، خاک و گیاه در کشاورزی. ۹۶-۸۵: (۱)۷

تغییر راندمان آبیاری سود حاصل نسبت به روش رویکرد اول، ۱۵ درصد افزایش نشان می‌دهد که این مسأله می‌تواند موجب جبران بخشی از هزینه‌های سیستم‌های آبیاری بارانی باشد. در همین زمینه جعفری (۱۳۷۶) بر اساس پژوهشی در استان همدان، نشان داد روش‌های آبیاری می‌تواند باعث گسترش سطح زیرکشت محصولات سودآور شود و در نتیجه افزایش هزینه سیستم‌های آبیاری بارانی با افزایش درآمد حاصل جبران و در نهایت راندمان تولید را به همراه داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، رویکرد سوم نسبت به دو رویکرد دیگر، موجب افزایش میزان تولید، سطح زیرکشت و کاهش برداشت از مخازن زیرزمینی خواهد شد و میزان سود به دست آمده نیز نسبت به دو رویکرد دیگر بیشتر است بنابراین رویکرد سوم نسبت به دو رویکرد دیگر بهینه است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق، لزوم تغییر الگوی مصرف آب در بخش کشاورزی را به عنوان راهکار بهینه برای غلبه بر مشکلات کم آبی و کاهش ذخایر آبخوان ضروری می‌داند. در این میان، فراهم شدن زمینه‌های اجتماعی و فرهنگی برای اصلاح و تغییر الگوی کشت از طریق جایگزینی محصولات با نیاز آبی کمتر و دارای صرفه‌ی اقتصادی بیشتر، به جای محصولات با نیاز آبی بالا، می‌تواند در کاهش مصرف آب و بهبود شرایط و استفاده پایدار از منابع آب منطقه کمک بسزایی داشته باشد. از طریق تخصیص مناسب آب، مدیریت تقاضا و تنظیم الگوی مصرف آب به خصوص در بخش کشاورزی می‌توان وضعیت اقتصادی بهتر و پایداری را ایجاد کرد. در نهایت می‌توان گفت به کمک مدل‌های برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی امکان بررسی و مقایسه روش‌های مختلف در زمینه‌ی مدیریت منابع آب و اتخاذ بهترین تصمیم فراهم می‌شود.

پیشنهاد می‌شود از سایر مدل‌ها مانند برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده و تعداد بیشتری محدودیت و سناریو، به خصوص تغییر الگوی کشت، تدوین و با نتایج حاصل از این تحقیق مقایسه شود. همچنین برای برآورد میزان واقعی میزان سود حاصل از اجرای رویکردهای مختلف، میزان هزینه‌ای اجرای سیستم‌های نوین نیز برآورد شود.

20. Khare D. and Jat M. K. 2005. Assessment of conjunctive use of planning options: a case study of sapon irrigation command area of Indonesia. *Journal of Hydrology .ASCE*. 328: 764-777.
21. Meyer S. J. Hubbard K. G. and Wilhite D. A. 1993. A crop-specific drought index for corn: I, Model development and validation. *Agronomy Journal*. 85: 388-395
22. Montazer A. and Rahimikhob A. 2008. Optimal water productivity of irrigation networks in arid and semi arid regions. *Journal of irrigation and dranaige*. 57: 411-423.
23. Nairizi S. and Rydzewski J. R. 1997. Effects of dated soil moisture stress on crop yields. *Journal of Experrimental Agriculture*. 13: 51-59.
24. Rao N. H. Sarma O. B. S. and Chander S. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*. 13: 25-32.
25. Sing A. K. and Sing J. p. 1999. Production and benefit maximization throught optimal crop planning, A case study of Mahi command. *Indian Journal of Soil Conservation*. 27: 152-157.
26. Tabari M. M. R. 2012. Conjunctive Use of Surface and Groundwater with Inter-Basin Transfer Approach: Case Study Piranshahr Plain. *Journal Water & Wastewater*. 22(80): 103-113.
27. Tabari M. M. R. Maknoon R. and Ebadi T. 2012. Development Structure for Optimal Long-Term Planning in Conjunctive Use. *Journal of Water & Wastewater*. 23: 56-84.
۱۰. فرخزاده ب. ۱۳۹۰. برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به منظور ارائه الگوی بهینه بهره‌برداری (مطالعه موردی حوضه همدان- بهار). پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. ۱۷۲ ص.
۱۱. قاسمیه ه. ۱۳۸۹. مدیریت جامع منابع آب با استفاده از روش DSS (مطالعه موردی: حوضه کاشان). پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. ۱۹۰ ص
۱۲. قدمی م. ۱۳۸۷. برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی (مطالعه موردی دشت نیشابور- سبزوار. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
۱۳. ملکیان الف. ۱۳۸۷. مقایسه وضعیت فعلی با الگوهای بهینه مدیریتی تخصیص منابع آب (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز حبله‌رود). پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. ۱۹۷ ص.
۱۴. مهرگان م. ر. ۱۳۷۹. پژوهش عملیاتی: برنامه‌ریزی خطی و کاربردهای آن، نشر کتاب دانشگاهی. ۵۳۶ ص.
۱۵. وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. ۱۳۸۹. مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور با رویکرد مدیریت به‌هم پیوسته منابع آب حوزه آبخیز دریاچه نمک، فصل نهم: ارزیابی منابع خاک، مطالعات کشاورزی و مصارف آب در بخش کشاورزی. ۲۸۲ ص.
16. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage paper No. 33*, FAO, Rome. 193 p.
17. Ghahraman B. and Sepaskhah A. R. 1999. Use of different irrigation water deficit schemes for economic operation of a reseviior. *Iranin Jornal of Science and Technology*. 23(1B): 239-257.
18. Ghahraman B. and Sepaskhah A. R. 2004. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Jornal of Irrigation and Drainage*. 53: 39-54.
19. Hall W. A. and Dracup J. A. 1970. *Water resources system engineering*. McGraw-Hill, New York.

