

## کاربرد روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان

حامد نوذری<sup>۱\*</sup>، وجیهه محسنی<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینای همدان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشکده کشاورزی گروه علوم و مهندسی آب

دانشگاه بوعلی سینای همدان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۳/۴)

### چکیده

در این تحقیق استفاده تلفیقی از منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان، که یکی از شبکه‌های بحرانی حوضه زاینده‌رود است، با روش پویایی سیستم شبیه‌سازی شد. سپس، به منظور تعیین الگوی کشت بهینه، از تابع نسبت درآمد به هزینه استفاده شد. این هدف برای دو حالت توجه و عدم توجه به قید حفظ مجموع مساحت محصولات کشت‌شده در سال مبنا (سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶) با روش‌های مختلف مدیریت آب آبیاری و با اعمال محدودیت درصدهای مختلف تغییر در سطح زیر کشت هر یک از محصولات شبکه در این سال تعریف شد. به منظور اعتباریابی نتایج مدل، عملکرد محاسبه‌ای و مشاهده‌ای محصولات موجود در شبکه مقایسه شدند و مقدار شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای عملکرد این محصولات، به ترتیب، ۲۰۹۹۸ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۰۰۷ و ۰/۹۹ محاسبه شد که دقت بالای مدل را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد در صورت حفظ و عدم حفظ محدودیت مجموع مساحت زیر کشت در سال مبنا، بیشترین مقدار درآمد به هزینه، به ترتیب، برابر ۳۱۰۲۵ و ۳۱۴۴ و مربوط به نحوه برداشت از آب زیرزمینی بر اساس نیاز آبی با اجازه ۵۰ درصد تغییر در سطح زیر کشت هر یک از محصولات است. سطح زیر کشت موجود از سطح زیر کشت مطلوب فاصله زیادی دارد و ترکیب محصولات عمده شبکه نامناسب است.

**کلیدواژگان:** استفاده تلفیقی، الگوی کشت، بهینه‌سازی، درآمد به هزینه، منابع آب سطحی و زیرزمینی.

### مقدمه

الگوی کشت منطقه را، به منظور مدیریت برداشت آب، ضروری می‌سازد.

اما یکی از ابزارهای قوی مدیریتی، که در سال‌های اخیر از آن برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب بسیار استفاده شده، روش پویایی سیستم است. در این روش به روابط دینامیکی بین خصوصیات کمی و کیفی آب و حتی مسائل اجتماعی-اقتصادی توجه می‌شود و سیستم مورد نظر بدون نیاز به ریاضیات پیچیده به‌سهولت قابل شبیه‌سازی است (Salavitar et al., 2006).

Gohari et al. (2013) قابلیت انتقال آب به حوضه زاینده‌رود را، جهت تأمین تقاضای روبه‌رشد آب در این حوضه، بررسی کردند. آن‌ها به کمک روش پویایی سیستم یک مدل برای تعیین روابط متقابل بین زیرسیستم‌های مختلف کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی، و هیدرولوژیکی حوضه توسعه دادند و دریافتند تأمین آب بیشتر برای این حوضه به افزایش تقاضای آب منجر خواهد شد. بنابراین، انتقال آب به این حوضه را

محدودیت منابع آب، افزایش روزافزون تقاضای آب، و تغییر اقلیم حیات و کیفیت منابع آب را به مخاطره انداخته است. در دشت کوهپایه-سگری اصفهان منبع اصلی تأمین‌کننده آب سطحی رودخانه زاینده‌رود است که با توجه به خشک‌سالی‌های پیاپی به‌شدت دچار مشکل شده است. این موضوع باعث روی آوردن شدید کشاورزان منطقه به برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و عدم توجه به وضعیت آبخوان موجب ایجاد بیلان منفی در منطقه شده است. شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار یکی از شبکه‌های دشت مذکور است که بیلان آب زیرزمینی منفی دارد (Ministry of Energy, 2010). توجه به اهمیت این شبکه در منطقه از یک سو و وجود معضل افت شدید سطح ایستابی در این منطقه از سوی دیگر لزوم مطالعه منابع آب سطحی و زیرزمینی در این منطقه و بهینه‌سازی

نشان داد و نتایج حاکی از توانایی مدل در تلفیق منابع آب است. Elmahdi *et al.* (2004)، به منظور ماکزیمم کردن سود خالص ناشی از مصرف آب و به حداقل رساندن میزان آب مصرفی در آبیاری زمین‌های کشاورزی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی را با مدل دینامیکی NSOM<sup>۱</sup> ترکیب و نتایج را با نتایج روش پویایی سیستم مقایسه کردند. نتایج نشان داد دیدگاه سیستم دینامیکی پتانسیل بهینه‌سازی را دارد و می‌توان با استفاده از آن در مواقع کمبود آب کشاورزی را مدیریت کرد.

از مزیت‌های بهینه‌سازی به کمک Vensim سازگاری روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این محیط با سیستم‌های پیچیده و توانایی بهینه‌سازی همه پارامترها نسبت به زمان است. در این سیستم نیازی به لینک بین دو محیط مجزای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نیست. البته، با توجه به اینکه در این محیط از روش powell برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود، یکی از محدودیت‌های آن احتمال قرار گرفتن در کمینه موضعی است. گفتنی است محققان مختلف مانند Wilhelm (2012) این روش را با روش‌های دیگر مقایسه کرده‌اند و اختلاف نتایج را با کمینه عمومی ناچیز شمرده‌اند.

هدف تحقیق حاضر توسعه و بسط مدلی است که علاوه بر شبیه‌سازی عملکرد محصولات شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار، به کمک روش پویایی سیستم، بتواند الگوی کشت اراضی را به گونه‌ای بهینه کند که علاوه بر پایداری منابع آب منطقه درآمد به هزینه معقولی برای کشاورزان همراه داشته باشد.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعه شده

شبکه آبیاری سمت راست آبشار در قسمت میانی شبکه‌های آبیاری اصفهان و در حوضه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگری واقع شده است (شکل ۱). سطح اراضی کشاورزی طراحی شده زیردست کانال‌های آبیاری حدود ۱۵۰۰۰ هکتار است. این شبکه در محدوده طول جغرافیایی ۵۱/۵۰ تا ۵۲/۰۹ و عرض جغرافیایی ۳۲/۴۲ تا ۳۲/۶۷ و ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر از سطح دریا واقع است (Akbari *et al.*, 2003). آب مورد نیاز شبکه از طریق انحراف آب در محل سد انحرافی آبشار و چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق منطقه تأمین می‌شود.

سیاستی نامناسب معرفی کردند و به حداقل رساندن تقاضای آب کشاورزی از طریق تغییر الگوی کشت را بهترین راه‌حل برای حل مشکل کمبود آب دانستند. در تحقیقی که در کایروان تونس انجام شد نیز از روش پویایی سیستم جهت ارزیابی کمبود آب در این منطقه، با در نظر گرفتن وضعیت اقتصادی کشاورزان و حفظ محیط زیست، استفاده شد. این محققان استفاده از این روش را مفید قلمداد کردند (Susink *et al.*, 2012).

Alizadeh *et al.* (2014) با استفاده از مدل‌سازی به روش پویایی سیستم به ارزیابی سناریوهایی جهت توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی، با لحاظ جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، پرداختند. این محققان نشان دادند، در صورت استفاده از منابع آب سطحی، توسعه سیستم‌های آبیاری بارانی، اگر با افزایش سطح کشت همراه نباشد، باعث افزایش درآمدهای ملی و کاهش افت آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

Nozari and Liaghat (2014) به کمک روش پویایی سیستم نحوه حرکت آب و املاح را در خاک، در حضور لوله‌های زهکش زیرزمینی، شبیه‌سازی کردند و نشان دادند این روش به خوبی می‌تواند میزان زهاب و املاح خروجی از لوله‌های زهکش را شبیه‌سازی کند.

Hosseini and Bagheri (2012) مدل‌سازی سیستم منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت مشهد را برای تحلیل استراتژی‌های توسعه پایدار به روش پویایی سیستم انجام دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن سه شاخص تنش منابع آب، بهره‌وری اقتصادی، و متوسط نیاز آبی دشت به تبیین استراتژی‌های دشت، در جهت پایداری منطقه، اقدام کردند و نتیجه گرفتند تغییر الگوی کشت سیاستی برتر، به منظور بهبود وضعیت منابع آب دشت، است.

Verdinejad (2010) تأثیر کمیت و کیفیت آب آبیاری را بر عملکرد محصولات و انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک، در شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار، با استفاده از مدل SWAP، شبیه‌سازی کرد و نتایج شبیه‌سازی این مدل را خوب ارزیابی کرد.

Naseri *et al.* (2011) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی پایاب سد شهر چای (ارومیه) را به روش پویایی سیستم مدل کردند. واسنجی حجم مخزن شبیه‌سازی شده با رفتار مخزن سد و عملکرد سیستم آبخوان شبیه‌سازی شده با آب‌نگار معرف آب زیرزمینی تطابق مناسب

می‌توانند به صورت روابط جبری، نمودار، یا جدول باشند (Ho et al., 2005). ارتباط بین اجزای سیستم خطی نیست، بلکه به صورت حلقه‌های علت و معلولی است و به صورت دو نوع حلقه تقویت (بازخورد مثبت) و تعدیل (بازخورد منفی) وجود دارد. در بازخورد مثبت متغیر اولیه با کاهش یا افزایش در متغیر دیگر در نهایت منجر به کاهش یا افزایش در خود و در بازخورد منفی متغیر اولیه با کاهش یا افزایش در متغیر دیگر در نهایت منجر به افزایش یا کاهش در خود می‌شود.

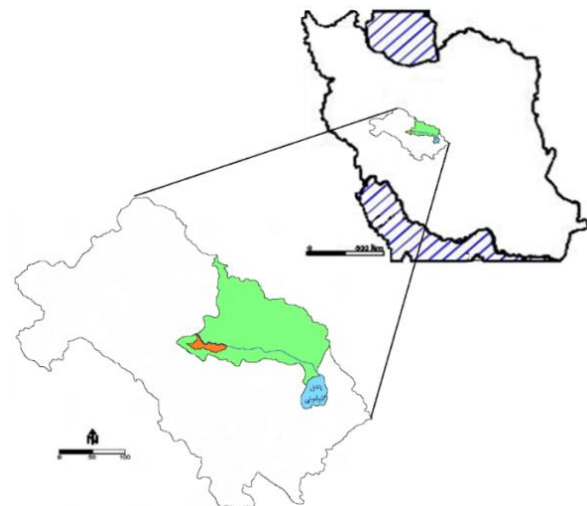
### ساختار مدل

هدف مدل‌سازی در این تحقیق ایجاد و توسعه یک مدل بهینه‌سازی جهت بهره‌برداری پایدار از آب زیرزمینی، از طریق تعیین الگوی بهینه کشت، با تعریف هدف حداکثرسازی درآمد به هزینه، در دو حالت توجه و عدم توجه به محدودیت حفظ مجموع مساحت در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ و محدودیت برداشت از آب زیرزمینی است.

### اطلاعات ورودی به مدل

داده‌های مورد نیاز برای این تحقیق عبارت است از ۱. سطح زیر کشت و الگوی کشت ماهیانه برای تعیین میزان آب مورد نیاز کشاورزی؛ ۲. میزان عملکرد محصولات؛ ۳. هزینه آب سطحی و پمپاژ آب زیرزمینی؛ ۴. قیمت فروش محصولات؛ ۵. حجم آب سطحی و زیرزمینی در دسترس.

به علت کامل بودن آمار و اطلاعات سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ در شبکه سمت راست آبخوار، این سال سال مبنا انتخاب شد.



شکل ۱. شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبخوار دشت کوهپایه-سگری

### روش پویایی سیستم

روش پویایی سیستم روش شبیه‌سازی شی‌گرا و بر پایه بازخورد است که می‌تواند، علاوه بر تشریح سیستم‌های پیچیده، امکان دخالت مؤثر کاربر در توسعه مدل و جلب اطمینان وی در طول فرایند مدل‌سازی را فراهم کند. در این پژوهش از محیط برنامه‌نویسی Vensim، که یکی از ابزارهای برنامه‌نویسی به روش پویایی سیستم است، استفاده شد. چهار عنصر اصلی مدل‌سازی سیستم‌ها در این محیط ذخیره، جریان، رابطه، و تبدیل‌کننده‌ها هستند. ذخیره یا تراز برای تشریح هر پارامتر یا متغیری که تجمع می‌یابد استفاده می‌شود. جریان‌ها فرایندهایی را نشان می‌دهند که ذخایر را پر یا خالی می‌کنند. اتصالات یا رابطه‌ها برای نشان دادن روابط بین متغیرهای مدل استفاده می‌شوند. مبدل‌ها ورودی را به خروجی اتصال می‌دهند، که

جدول ۱. سطح زیر کشت محصولات عمده شبکه در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ بر حسب هکتار

محصول زراعی	پياز	چغندر	ذرت	گندم	جو	یونجه	برنج	آفتابگردان
سطح زیر کشت	۸۸۵	۳۰	۳۰۳۰	۶۴۸۰	۱۲۳۰	۱۰۹۵	۸۵۵	۱۲۰

### مدل شبیه‌سازی

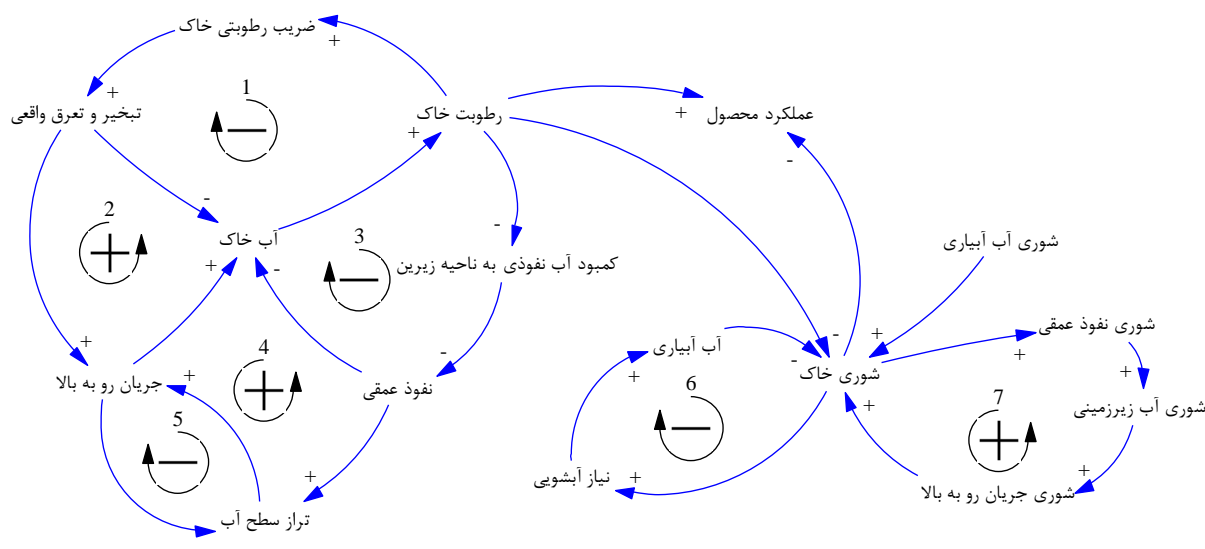
حلقه‌های علت و معلولی عملکرد محصول نسبت به کمیت و کیفیت آب آبیاری به منزله نمونه‌ای از حلقه‌های کار شده در این مدل، به صورت شکل ۲، و حلقه‌های زیرمدل برداشت آب زیرزمینی به صورت شکل ۳ است.

Nozari et al. (2014) مدل دینامیکی مزارع شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبخوار را با هدف شبیه‌سازی عملکرد محصولات شبکه با توجه به کمیت و کیفیت آب آبیاری آن ارائه و آن را واسنجی و اعتباریابی کردند. Azadi (2013) نیز، به

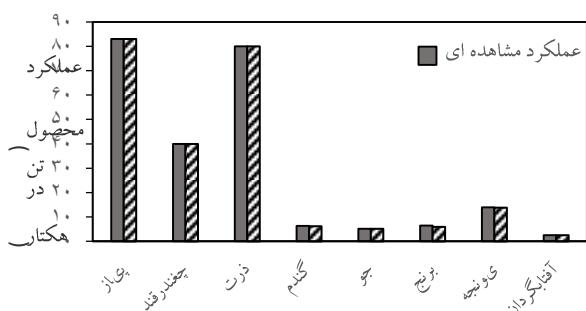
میزان حجم آب برای سه نحوه مدیریت آب آبیاری بر اساس آبیاری موجود در سال مبنا بر اساس پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی شبکه و بر اساس نیاز آبی محصولات، به ترتیب، برابر ۲۱۵، ۱۷۴/۱۵، و ۹۴ میلیون متر مکعب است. همچنین، آب سطحی در نظر گرفته شده برای هر نحوه مدیریت آب آبیاری ۵۹/۶ میلیون متر مکعب است. گفتنی است اطلاعات منابع آب شبکه از وزارت نیرو و سازمان آب منطقه‌ای اصفهان و اطلاعات نیاز آبی گیاهان زراعی از معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی تهیه شد.

بر هکتار و خطای استاندارد آن‌ها، به ترتیب، ۰/۲۴، ۰/۱۲، و ۰/۰۷ برآورد شد که دقت خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان داد. در تحقیق حاضر نیز ابتدا از این مدل جهت شبیه‌سازی الگوی کشت منطقه استفاده شد. به منظور ارزیابی نتایج مدل، رفتار مدل با رفتار مرجع مقایسه شد. یکی از متغیرهایی که صحت‌سنجی آن بررسی شد و در تحلیل نتایج این تحقیق از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است عملکرد محصولات است (شکل ۴).

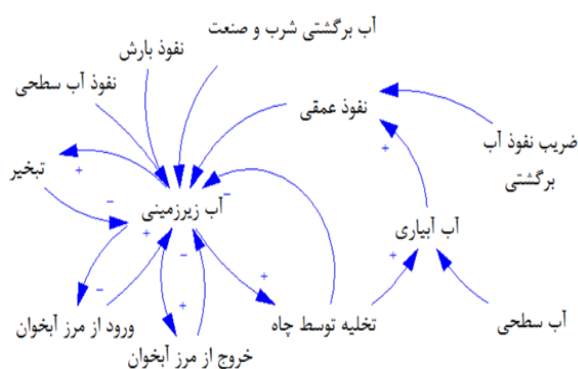
منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل مذکور، در مجموع از نه تیمار آزمایشی محصول چغندر قند، که از مزرعه تحقیقاتی شبکه فوق جمع‌آوری شده بود، استفاده کرد و میزان برآزش میان مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه رطوبت خاک، شوری خاک، و عملکرد محصول را برای همه تیمارها با محاسبه شاخص‌های آماری RMSE و خطای استاندارد به دست آورد. میانگین شاخص RMSE این پارامترها برای همه تیمارها، به ترتیب، ۰/۰۷۶ و ۱/۱۳ دسی‌زیمنس بر متر و ۲۷۷۶/۹۸ کیلوگرم



شکل ۲. حلقه‌های علت و معلولی عملکرد محصول (Nozari et al., 2014)



شکل ۴. عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده محصولات با توجه به شرایط موجود در شبکه در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶



شکل ۳. حلقه‌های علت و معلولی برداشت آب زیرزمینی

چغندر قند خوب ارزیابی کرده‌اند (Verdinejad, 2010). بنابراین، با توجه به مقادیر خطای استاندارد و همچنین جذر میانگین مربعات خطا می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های صحرائی را در تحقیق حاضر مناسب دانست.

سپس، با توجه به حفظ منابع آب شبکه و کشاورزی پایدار، مدل مذکور توسعه داده شد تا به کمک آن بتوان الگوی کشت بهینه را در منطقه برای محدودیت‌های مختلف منابع آب

مقدار شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای عملکرد این محصول، به ترتیب، ۲۰۹/۹۸ کیلوگرم بر هکتار، ۰/۰۰۷، و ۰/۹۹ محاسبه شد. گفتنی است در مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصول (مانند مدل SWAP) محققان شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا را تا ۵/۳۷ تن در هکتار، معادل ۵۳۷۰ کیلوگرم بر هکتار، برای گیاه

(رابطه ۲)

$$\sum_c \{(WN)_c * A_c\} \leq (IN-Surface Water)_c + (IN-Ground Water)_c$$

(رابطه ۳)

$$\sum_c \{(IN-Surface Water)_c * A_c\} \leq \sum (WA-Surface Water)$$

$$\sum_c \{(IN-Ground Water)_c * A_c\} \leq Potential \quad (رابطه ۴)$$

$Z_1$  تابع درآمد به هزینه،  $C$  محصولات موجود در الگوی کشت،  $Incom_c$  درآمد حاصل از محصولات بر حسب ریال،  $Cost_c$  کل هزینه‌های صرف‌شده برای محصولات بر حسب ریال،  $Y_c$  عملکرد محصولات بر حسب کیلوگرم بر متر مربع،  $A_c$  مساحت هر محصول بر حسب متر مربع،  $P_c$  قیمت هر محصول بر حسب ریال،  $(PC-SW)$  هزینه آب سطحی بر حسب ریال،  $(IN-Surface Water)_c$  آب سطحی مورد نیاز برای آبیاری هر محصول بر حسب متر،  $(IN-Ground Water)_c$  آب زیرزمینی مورد نیاز برای آبیاری هر محصول بر حسب متر،  $(PC-GW)$  هزینه پمپاژ آب زیرزمینی بر حسب ریال،  $VC_c$  هزینه متغیرهایی مثل علف‌کش، کاشت، و کود بر حسب ریال،  $TA$  مساحت کل شبکه بر حسب متر مربع،  $(WN)_c$  آب مصرفی برای هر محصول بر حسب متر مکعب،  $(WA-Surface Water)$  کل آب سطحی موجود بر حسب متر مکعب، و  $Potential$  میزان پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی بر حسب متر مکعب است.

محدودیت ۱ مربوط به سطح زیر کشت محصولات است. این محدودیت بدین جهت است که مجموع سطح زیر کشت همه محصولات از مساحت کل شبکه بیشتر نشود. بر اساس محدودیت ۲ آب مورد نیاز محصولات کشت‌شده از دو منبع جریان‌ات سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. طبق محدودیت ۳ حجم آب سطحی مصرفی برای محصولات الگوی کشت از میزان حجم آب سطحی موجود در شبکه بیشتر نخواهد شد. محدودیت ۴ با توجه به هدف پایداری آبخوان در منطقه تنظیم شده است. بر این اساس میزان برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی در هر سال نباید از میزان تغذیه سالانه این سفره‌ها بیشتر باشد تا سطح سفره ثابت بماند و افت نکند. به عبارت دیگر، میزان خروجی از سفره آب زیرزمینی باید با میزان ورودی آب به سفره برابر یا کمتر از آن باشد. گفتنی است میزان تغذیه سالانه سفره منطقه مورد مطالعه به کمک گزارش مطالعات به‌هنگام‌سازی اطلس منابع آب شرکت مدیریت منابع آب منطقه‌ای اصفهان، که در سال ۱۳۸۹ تهیه شده، محاسبه شده است.

و به منظور دستیابی به شرایط بهینه اقتصادی در منطقه تعیین کرد.

### ایجاد مدل بهینه‌سازی

#### طراحی و ارزیابی سیاست‌ها

از مواردی که در تعیین الگوی کشت برای یک شبکه اهمیت دارد در نظر گرفتن سودآوری محصولات کشت‌شده برای کشاورزان آن شبکه است. در پژوهش حاضر، میزان درآمد به هزینه‌ها برای سه حالت الگوی کشت موجود در سال مبنا، آبیاری بر اساس نیاز آبی محصولات، و آبیاری بر اساس پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی محاسبه شد. سپس، به منظور بهینه‌سازی درآمد به هزینه، الگوی کشت جدیدی پیشنهاد شد. از طرفی، با توجه به معضل کم‌آبی و ممنوعه بودن شبکه از نظر بهره‌برداری از آب زیرزمینی، برای الگوی کشت پیشنهادشده شبکه باید آب به میزان کافی در دسترس باشد و تأمین این میزان آب باید به گونه‌ای باشد که افت تراز سطح آب اتفاق نیفتد و برداشت آب پایدار بماند. در این زمینه سیاست‌هایی برای دست یافتن به بهترین الگوی کشت در سه نحوه مدیریت آبیاری، شامل ۱. برداشت از آب زیرزمینی مطابق با سال مبنا؛ ۲. برداشت از آب زیرزمینی مطابق با نیاز آبی محصولات؛ ۳. برداشت از آب زیرزمینی به گونه‌ای که افت تراز اتفاق نیفتد (پتانسیل برداشت) تعریف و نتایج آن‌ها بررسی شد. گفتنی است به منظور مدیریت صحیح و پایدار در امر آبیاری و برداشت از منابع آب زیرزمینی تغییر الگوی کشت حالات مذکور برای دو حالت حفظ و عدم حفظ مجموع سطح زیر کشت محصولات عمده در سال مبنا بررسی شد. همچنین، با توجه به عدم امکان تغییر ناگهانی الگوی کشت در منطقه، محدودیت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درصد تغییر در سطح زیر کشت هر یک از محصولات شبکه نسبت به سال زراعی مبنا در نظر گرفته و اجرا شدند.

#### الگوی کشت بهینه شبکه

به منظور تعیین الگوی کشت بهینه و بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی دو دسته محدودیت سطح زیر کشت و منابع آب به صورت روابط ۱ تا ۴ تعریف شد:

$$\text{Max } Z_1 = \sum_c (Incom_c / Cost_c)$$

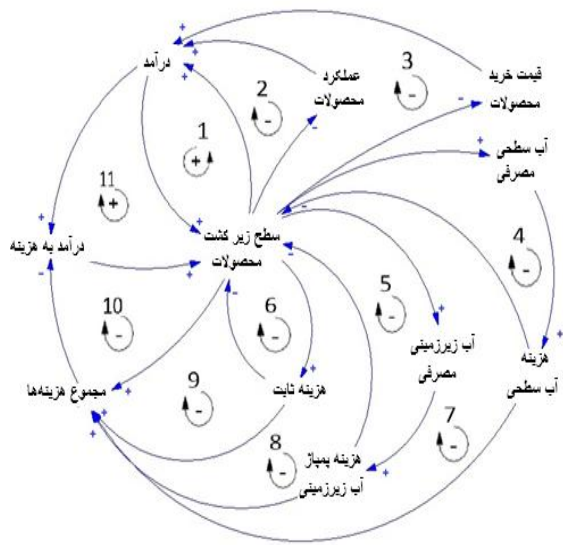
$$Incom_c = \sum_c (Y_c * A_c * P_c)$$

$$Cost_c = \sum_c \{(IN-Surface Water)_c * A_c * (PC-SW)\} + \sum_c \{(IN-Ground Water)_c * A_c * (PC-GW)\} + \sum_c \{A_c * VC_c\}$$

$$St: \sum_c A_c \leq \sum TA$$

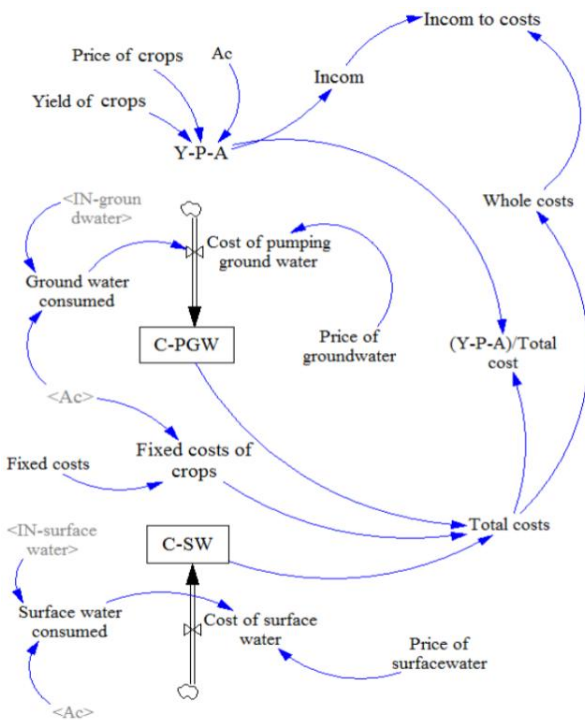
(رابطه ۱)

### حلقه‌های علت و معلولی شبکه



شکل ۵. حلقه‌های علت و معلولی درآمد به هزینه شبکه

شکل ۵ نمونه‌ای از نمودارهای علت و معلولی بهینه‌سازی مدل، مربوط به بخش درآمد به هزینه، را به صورت حلقه‌های بازخوردی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حلقه ۱، با افزایش سطح زیر کشت، میزان درآمد افزایش می‌یابد و همین موضوع باعث ایجاد انگیزه جهت افزایش سطح زیر کشت می‌شود و یک حلقه مثبت تشکیل می‌دهد. در حلقه ۲، با افزایش سطح زیر کشت، عملکرد محصولات به علت کاهش میزان آب در دسترس کاهش می‌یابد و باعث کاهش درآمد و در نتیجه تقاضا برای کاهش سطح زیر کشت می‌شود و یک حلقه منفی تشکیل می‌دهد. از طرفی، در حلقه ۳ نیز، با افزایش سطح زیر کشت، به علت زیاد شدن محصول، قیمت خرید محصول کاهش و در اثر کاهش قیمت آن درآمد کاهش می‌یابد که در نهایت موجب کاهش سطح زیر کشت، حجم آب سطحی مصرفی افزایش می‌یابد و در نتیجه هزینه آب سطحی بالا می‌رود. این خود باعث کاهش تقاضا برای افزایش سطح زیر کشت می‌شود. همین‌طور، با افزایش سطح زیر کشت، میزان آب زیرزمینی و هزینه پمپاژ آب زیرزمینی افزایش می‌یابد و در اثر افزایش آن‌ها تقاضا برای افزایش سطح زیر کشت کم می‌شود و حلقه‌ای منفی تشکیل می‌دهد (حلقه ۵). در حلقه ۶ نیز با افزایش سطح زیر کشت هزینه ثابت افزایش می‌یابد و افزایش هزینه ثابت باعث کاهش تقاضا برای افزایش سطح زیر کشت می‌شود. در هر یک از حلقه‌های ۷، ۸، و ۹ به ترتیب با افزایش هزینه‌های آب سطحی و پمپاژ آب زیرزمینی و ثابت هزینه کل شبکه افزایش می‌یابد و با افزایش آن سطح زیر کشت کم می‌شود. در حلقه ۱۰ با افزایش سطح زیر کشت هزینه کل شبکه افزایش می‌یابد که باعث کاهش سود به هزینه شبکه می‌شود. از طرفی در حلقه ۱۱، با افزایش سطح زیر کشت، میزان درآمد افزایش می‌یابد و در اثر افزایش آن میزان سود به هزینه شبکه بالا می‌رود که در نهایت منجر به افزایش سطح زیر کشت می‌شود و یک حلقه مثبت به وجود می‌آورد.



شکل ۶. نمودار ذخیره- جریان درآمد به هزینه در حالت حفظ مجموع مساحت کشت‌شده در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶

### یافته‌ها و بحث

برآورد پارامترهای اقتصادی در شرایط الگوی کشت موجود در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ با توجه به شرایط مذکور، پارامترهای اقتصادی کشت محصولات در شبکه بررسی شد که نتایج آن در جدول ۲ می‌آید.

### نمودار ذخیره- جریان درآمد به هزینه شبکه

روابط مؤلفه‌های درآمد، هزینه‌ها، سیستم آب سطحی، و زیرزمینی بخش بهینه‌سازی مدل به صورت ذخیره- جریان در شکل ۶ می‌آید.

جدول ۲. پارامترهای اقتصادی برآوردی برای سناریوهای مختلف (میلیون ریال)

نحوه آبیاری	سال زراعی مبنا		پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی		نیاز آبی محصولات	
	درآمد	هزینه‌ها	درآمد به هزینه	درآمد	هزینه‌ها	درآمد به هزینه
پیاز	۴۷۰۰۰	۲۵۲۵۵٫۲	۱٫۸۶	۴۶۵۹۰	۲۴۵۵۹٫۸	۱٫۹
چغندر قند	۶۰۰	۴۵۷٫۳	۱٫۳	۶۵۲۵	۴۲۲٫۵	۱٫۳۵
ذرت	۸۴۸۲۰	۲۷۲۶۴٫۵	۳٫۱	۸۴۰۱۰	۲۵۱۹۰٫۴	۳٫۵
گندم	۱۲۳۳۷۰	۵۳۸۷۳٫۴	۲٫۳	۱۲۳۳۲۰	۵۰۱۳۰٫۲	۲٫۶
جو	۱۷۲۷۰	۸۸۲۹٫۲	۱٫۹۶	۱۷۱۵۰	۸۱۷۴٫۶	۲٫۲
برنج	۷۶۳۰۰	۲۰۴۲۲٫۹	۳٫۷۴	۷۷۱۰۰	۱۹۳۲۳٫۳	۴٫۱
یونجه	۴۹۸۲۰	۱۸۳۴۹٫۹	۲٫۷	۴۹۳۶۰	۱۶۸۱۲	۳٫۱
آفتابگردان	۲۷۰۰	۱۲۶۳٫۵	۲٫۱۴	۲۶۸۷	۱۱۹۱٫۶	۲٫۴

محدودیت حفظ مجموع مساحت در سال مبنا اعمال نشده است. بنابراین، امکان دارد مجموع مساحت‌هایی که مدل پیشنهاد می‌کند کمتر یا بیشتر از مقدار مساحت کشت‌شده در سال مذکور شود.

با توجه به نتایج جدول ۳، بیشترین مقدار درآمد به هزینه برابر ۳/۱۴۴ و مربوط به نحوه برداشت از آب زیرزمینی، بر اساس نیاز آبی، با اجازه ۵۰ درصد تغییر در سطح زیر کشت هر یک از محصولات است.

شکل ۷ الگوی کشت بهینه پیشنهادی توسط مدل (برای بیشترین مقدار درآمد به هزینه ارائه شده در جدول ۳) را با الگوی کشت اجرا شده در سال مبنا مقایسه می‌کند.

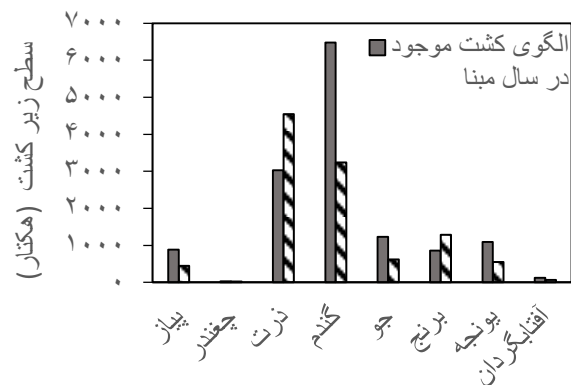
با توجه به جدول ۲، متوسط نسبت درآمد به هزینه محصولات، مطابق شرایط مبنا، پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی، و نیاز آبی محصولات، به ترتیب، ۲/۵۸، ۲/۷۵ و ۲/۸۸ است. ملاحظه می‌شود که بیشترین نسبت درآمد به هزینه محصولات مربوط به زمانی است که مطابق نیاز آبی محصولات آبیاری صورت گیرد و کمترین این مقدار نیز متعلق به شرایط سال زراعی مبناست. این بدان مفهوم است که مصرف آب مطابق با نیاز آبی محصولات بیشترین کارکرد و آبیاری مطابق با سال مبنا کمترین کارکرد را داراست.

اعمال سناریوها با تغییر مساحت سطح زیر کشت شبکه در سال زراعی مبنا در این سیاست، برای تعیین الگوی کشت توسط مدل،

جدول ۳. مقادیر بهینه شده درآمد به هزینه برای محدودیت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد تغییر در مساحت سطح زیر کشت هر یک از محصولات در سال مبنا

نحوه برداشت از آب زیرزمینی	درآمد به هزینه				
	٪۱۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۴۰	٪۵۰
بر اساس برداشت سال مبنا	۲۳۹۵	۲۴۳۹	۲۴۴۵	۲۵۴۶	۲۶۰۵
بر اساس پتانسیل برداشت	۲۴۸	۲۵۳۱	۲۵۳۲	۲۶۴۹	۲۷۱۶
بر اساس نیاز آبی	۲۸۵۱	۲۹۰۶	۲۸۹۸	۳۰۰۴	۳۱۱۴

مشاهده می‌شود سطح زیر کشت همه محصولات به جز دو محصول ذرت و برنج نسبت به سال مبنا کاهش یافته است. بالاترین سطح زیر کشتی که با محدودیت تغییر سطح زیر کشت به میزان ۵۰ درصد برای این دو محصول وجود دارد، به ترتیب، ۴۵۴۵ و ۱۲۸۲٫۵ هکتار است. به عبارت دیگر، طبق جدول و نمودار مربوطه، برای هر یک از این محصولات نهایت سطح زیر کشت مجاز به آن‌ها اختصاص داده شده است. این نتیجه به این علت است که دو محصول ذرت و برنج، به ترتیب، با داشتن درآمد به هزینه‌های ۳/۱۱ و ۳/۷۴ سودآورترین محصولات نسبت



شکل ۷. الگوی کشت بهینه مدل و الگوی کشت سال مبنا

محصول) در سه سناریوی برداشت مطابق شرایط سال مبنا، بر اساس پتانسیل برداشت (حد مجاز) و بر اساس نیاز آبی، به ترتیب، ۸۲ و ۷۸ و ۳۰ درصد از مقدار کل است و مقادیر آن‌ها، به ترتیب، برابر ۱۷۶/۲۶ و ۱۳۵/۷۸ و ۲۸/۷۹ میلیون متر مکعب است.

#### اعمال سناریوها با حفظ مقدار مجموع مساحت کشت‌شده در سال زراعی مبنا

در این دسته سناریوها دقیقاً مشابه سناریوهای قبلی عمل شده است؛ با این تفاوت که محدودیت حفظ مجموع مساحت کشت‌شده در سال شاخص اعمال شده است. بنابراین، مجموع سطح زیر کشت الگوی کشت این سناریوها برابر ۱۳۷۲۵ هکتار خواهد بود.

نتایج مقادیر درآمد به هزینه حاصل از بهینه‌سازی در جدول ۴ می‌آید. با توجه به نتایج، بیشترین مقدار درآمد به هزینه برابر ۳/۰۲۵ است و این مقدار برای محدودیت ۵۰ درصد و مربوط به نحوه برداشت از آب زیرزمینی بر اساس نیاز آبی است.

شکل ۸ الگوی کشت بهینه پیشنهادی توسط مدل (برای بیشترین مقدار درآمد به هزینه ارائه‌شده در جدول ۴) را با الگوی کشت اجراشده در سال مبنا مقایسه می‌کند.

به دیگر محصولات در منطقه‌اند. بنابراین، افزایش سطح زیر کشت آن‌ها می‌تواند بیشترین عملکرد را در جهت تأمین هدف، که بیشینه‌سازی درآمد به هزینه است، داشته باشد. مقدار درآمد به هزینه بقیه محصولات بین ۱/۳۱ تا ۲/۷۲ متغیر است و سطح زیر کشت آن‌ها نسبت به حالت موجود تا حداکثر میزان ممکن کاهش یافته است. گفتنی است افزایش سطح زیر کشت این محصولات نیز با توجه به محدودیت برداشت از آب زیرزمینی است و مقدار برداشت نباید از حد مجاز بیشتر شود.

در ارتباط با الگوی کشت، مورد شایان توجه دیگر مجموع سطح زیر کشت محصولات است. مجموع مساحت‌های محصولات کشت‌شده از محدودیت ۱۰ درصد تغییر به ۵۰ درصد پیوسته کاهش یافته است؛ طوری که مقدار این عدد برای محدودیت ۵۰ درصد برابر ۱۰۷۴۷/۵ هکتار است. این در حالی است که مجموع سطح زیر کشت شبکه در سال مبنا ۱۳۷۲۵ هکتار بوده است. به عبارت دیگر، چنانچه محدودیت حفظ مجموع مساحت در سال مبنا برداشته شود، مجموع سطح‌های زیر کشت کاهش خواهند داشت. این مطلب گویای نامتناسب بودن الگوی کشت فعلی با شرایط اقتصادی و ویژگی‌های گیاهی محصولات عمده شبکه است.

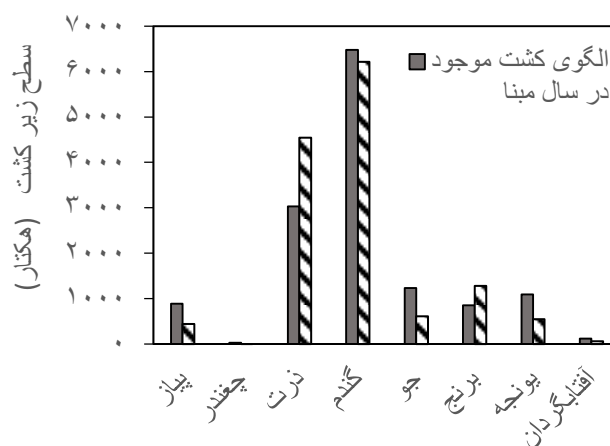
گفتنی است میزان برداشت از آب زیرزمینی برای الگوی کشت بهینه (با محدودیت ۵۰ درصد تغییر سطح زیر کشت هر

جدول ۴. مقادیر بهینه‌شده درآمد به هزینه برای محدودیت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد تغییر در مساحت سطح زیر کشت هر یک از محصولات در سال مبنا

نحوه برداشت از آب زیرزمینی	درآمد به هزینه				
	٪۱۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۴۰	٪۵۰
بر اساس برداشت موجود	۲/۳۸۵	۲/۴۱۸	۲/۳۷۸	۲/۴۸۶	۲/۵۱۸
بر اساس پتانسیل برداشت	۲/۴۸۲	۲/۵۳۳	۲/۴۷۷	۲/۶۳۸	۲/۶۹۳
بر اساس نیازآبی	۲/۸۴۲	۲/۸۸۶	۲/۸۳	۲/۹۷۸	۳/۰۲۵

مواردی که در این سناریو مورد توجه است دستیابی به بالاترین درآمد به هزینه، حداقل میزان برداشت آب زیرزمینی، و حفظ حداقل مجموع مساحت برابر ۱۳۷۲۵ هکتار است. انتظار می‌رود مدل، با توجه به حفظ میزان مجاز برداشت آب زیرزمینی، جهت تأمین بالاترین درآمد به هزینه برای شبکه، تمایل به کاهش سطح زیر کشت محصولات با درآمد به هزینه پایین و افزایش سطح زیر کشت محصولات با درآمد به هزینه بالا داشته باشد.

مشابه موارد قبلی، سطح زیر کشت دو محصول ذرت و برنج بر خلاف بقیه محصولات افزایش یافته است. بالاترین سطح زیر کشتی که در حالت تغییر سطح زیر کشت به میزان ۵۰



شکل ۸. الگوی کشت بهینه مدل و الگوی کشت موجود در سال زراعی



در (با محدودیت ۵۰ درصد تغییر سطح زیر کشت هر محصول) در سه سناریوی برداشت، مطابق شرایط سال مبنای بر اساس پتانسیل برداشت (حد مجاز) و بر اساس نیاز آبی، به ترتیب، ۹۹ و ۸۷ و ۳۷ درصد از مقدار کل و مقادیر آن‌ها، به ترتیب، برابر ۲۱۳/۵۹ و ۱۴۲/۳۵ و ۳۴/۸۷ میلیون متر مکعب است. علت افزایش سطح زیر کشت ذرت نیز عملکرد آن است. زیرا عملکرد مشاهده‌ای ذرت در منطقه حدود ۸۰ تن در هکتار است؛ در حالی که عملکرد گندم و جو، به ترتیب، حدود ۶ تن در هکتار و ۵ تن در هکتار گزارش شده است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق الگوی کشت محصولات در مقیاس یک شبکه آبیاری و زهکشی، به روش پویایی سیستم شبیه‌سازی و پارامترهای اقتصادی ناشی از آن، در شبکه بررسی شد. با اجرای مدل فوق می‌توان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر درآمد به هزینه را در شبکه بررسی کرد. در نتیجه، به منظور اعمال یک مدیریت صحیح و کارآمد، درصدهای مختلف از سطح زیر کشت در سال مبنای در نظر گرفته شد و سه نحوه برداشت از آب زیرزمینی، بر اساس آبیاری در سال شاخص، پتانسیل برداشت از آبخوان شبکه، و نیاز آبی محصولات در دو حالت توجه و عدم توجه به حفظ مجموع مساحت محصولات کشت‌شده در سال زراعی مبنای شبیه‌سازی شد. در نهایت، تأثیر هر یک از این پارامترها روی درآمد به هزینه مدل‌سازی و الگوی کشت هر حالت استخراج شد.

همچنین، از قابلیت مدل تهیه‌شده در این تحقیق، علاوه بر نمایش تغییرات همه پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم، قابلیت تحلیل حساسیت، و صرف زمان کمتر در اجرای برنامه اشاره کرد.

نتایج بهینه‌سازی نیز عبارت‌اند از:

- بالاترین سود به هزینه مربوط به نحوه برداشت از آب زیرزمینی بر اساس نیاز آبی است. پس توصیه می‌شود در شبکه مورد نظر، به منظور پایداری منابع آب شبکه و تأمین درآمد به هزینه بالا برای کشاورزان، آبیاری محصولات مطابق با نیاز آبی آن‌ها صورت گیرد.

- همواره مدل تمایل به تغییر زیاد در سطح زیر کشت دارد و این بدین معنی است که سطح زیر کشت موجود در سال زراعی مبنای از سطح زیر کشت مطلوب فاصله زیادی دارد.

- افزایش سطح زیر کشت برای این شبکه توصیه نمی‌شود. به عبارت دیگر، چنانچه محدودیت حفظ مجموع

درصد برای این دو محصول وجود دارد، به ترتیب، ۴۵۴۵ و ۱۲۸۲/۵ هکتار است. طبق جدول و نمودار مربوطه مشاهده می‌شود نهایت سطح زیر کشت مجاز برای هر یک از این محصولات به آن‌ها اختصاص داده شده است. این نتیجه به این علت است که دو محصول ذرت و برنج با داشتن درآمد به هزینه‌های ۳/۱۱ و ۳/۷۴ سودآورترین محصولات نسبت به دیگر محصولات در منطقه‌اند. بنابراین، افزایش سطح زیر کشت آن‌ها می‌تواند بیشترین عملکرد را در جهت تأمین هدف، که بیشینه‌سازی درآمد به هزینه است، داشته باشد.

مقدار درآمد به هزینه بقیه محصولات بین ۱/۳۱ تا ۲/۷۲ متغیر است. به منظور دستیابی به بالاترین درآمد به هزینه، سطح زیر کشت این گیاهان، که درآمد به هزینه کمتری نسبت به محصولات ذرت و برنج دارند، کاهش یافته است. گفتنی است سطح زیر کشت بهینه برای محصولات یونجه، آفتابگردان، جو، پیاز، و چغندر حداقل مساحت موجود (بر اساس تغییرات ۵۰ درصد از سطح زیر کشت) است. اما سطح زیر کشت گیاه گندم به این میزان کاهش پیدا نکرده است.

در مورد محصول گندم باید گفت سطح زیر کشت این محصول در سال مبنای ۴۷ درصد از سطح زیر کشت شبکه در این سال بوده و یگانه محصولی است که چنین سطح زیر کشت بالایی داشته است. همچنین، مساحت گیاهان یونجه، آفتابگردان، جو، پیاز، و چغندر به دلیل درآمد به هزینه پایین باید حتماً کاهش یابد و از طرفی افزایش مساحت محصولات ذرت و برنج حتی به میزان بیشترین سطح زیر کشت مجاز برای آن‌ها در محدودیت ۵۰ درصد نمی‌تواند قید حفظ حداقل مجموع مساحت‌های کشت‌شده را تأمین کند و علاوه بر آن از نظر میزان مصرف آب توسعه آن‌ها محدود است. بنابراین، یگانه محصولی که می‌تواند این قید را برقرار کند گندم است که سطح زیر کشت آن در الگوی کشت بهینه زیاد و نزدیک به مساحت آن در الگوی کشت در سال مبنای شده است.

از سوی دیگر، نیاز آبی برنج نسبت به گندم و جو، به ترتیب، ۲/۲ و ۲/۵ برابر است؛ در حالی که قیمت تضمینی این محصول نسبت به گندم و جو در سال مبنای، حدود ۵ و ۵/۵ برابر بوده است. با توجه به تفاوت قیمت تضمینی محصول، کاهش سطح زیر کشت گندم و افزایش برنج پیشنهاد شده است. گفتنی است این تغییرات با توجه به محدودیت برداشت آب زیرزمینی صورت می‌گیرد و در الگوی پیشنهادی میزان برداشت آب زیرزمینی شبکه، نه تنها افزایش نیافته، بلکه به مقدار شایان توجهی کاهش یافته است.

میزان برداشت از آب زیرزمینی برای الگوی کشت بهینه

حفظ مجموع مساحت در سال مبنا منجر به افزایش هزینه آب و در نتیجه باعث کاهش درآمد به هزینه می‌شود. گفتنی است نتایج مذکور برای حالتی است که قیمت آب مصرفی واقعی نیست. در صورتی که از قیمت واقعی آب استفاده شود و قیمت تضمینی خرید محصولات تغییر کند، ممکن است نتایج تغییر یابد و الگوی کشت پیشنهادی متفاوت باشد.

مساحت در سال مبنا برداشته شود، مدل تمایل به کاهش شدید مجموع سطح زیر کشت دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد ترکیب محصولات عمده شبکه با ویژگی‌هایی از جمله نیاز آبی، درآمد به هزینه، و عملکرد آن‌ها مناسب نیست و به تغییر در نوع محصولات شبکه نیاز است. - مقایسه جداول درآمد به هزینه نشان می‌دهد محدودیت

## REFERENCES

- Alizadeh, H. A., Liaghat, A. M., and Sohrabi, T. (2014). Assessing pressurized irrigation systems development scenarios on groundwater resources using system dynamics modeling. *Journal of water and soil resources conservation*, Volume 3, Number 4, Pages 1-15. (In Farsi)
- Akbari, M., Mirlatifi, M., Morid, S., and Droogers, P. (2003). Application of remote sensing to estimate the usefulness of water in irrigation networks. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 4, Number 17, Pages 65-82. (In Farsi)
- Azadi, S. (2013). Effect of Quantity and Salinity of Irrigation Water on Crop Yield Using System Dynamic Approach. *MSc Dissertation, Bu-Ali Sina University*. (In Farsi)
- Elmahdi, A., Malano, H., Etschells, T., and Khan, S. (2004). System Dynamics Optimisation Approach to Irrigation Demand Management, Environmental Engineering Research Event. Published by University of Wollongong Press.
- Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., Wang, D., and Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442:405-419.
- Ho, Ch., Yang, Ch., Chang, L., and Chen, T. (2005). The application of system dynamics modeling to study impact of water resources planning and management in Taiwan, The 23rd International System Dynamics Conference, Boston.
- Hosseini, S. A. and Bagheri, A. (2012). System Dynamics Modeling of the Water Resources System in Mashad Plain to Analyze Strategies for Sustainable Development, water and wastewater consulting engineers research Development, Volume 24, Number 4, Pages 28-39. (In Farsi)
- Ministry of Energy. (2010). The update of Atlas of water catchment area of study Gavkhoni, Volume 3, Number 1, Appendix 5. water balance of Kohpaye-Segzi study area.
- Naseri, H. R., Ahmadi, S., and Salavitarbar, A. (2011). System dynamics modeling for conjunctive operation of down stream water resources of Shahrchay dam (URMIA). *Quarterly Iranian journal of geology*. Volume 4, Number 16, pages 97-108. (In Farsi)
- Nozari, H., Heydari, M., and Azadi, S. (2014). Simulation of a Right Abshar Irrigation Network and Its Cropping Pattern Using a System Dynamics Approach. *J. Irrig. Drain Eng.* 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000777 , 05014008.
- Nozari, H. and Liaghat, A. M. (2014). Simulation of Drainage Water Quantity and Quality Using System Dynamics. *J. Irrig. Drain Eng.* 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000748.
- Salavitarbar, A., zarghami, M., and abrishamchi, A. (2006). System dynamics model of urban water management in Tehran. *Journal of Water and Wastewater*, Volume 59. (In Farsi)
- Susink, J., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Savic, D., and Kapelan, Z. (2012). Integrated system dynamics modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. *Science of The Total Environment*, 440:290-306.
- Verdinejad, V. R. (2010). Optimization of Cropping Pattern and Water Use Allocation under Salinity and Limited Water Supply Conditions in Right Abshar Irrigation Network .Ph.D. dissertation, University of Tehran. (In Farsi)
- Wilhelm, F. (2012). Online optimization for the locomotion of Roombots structures. semester project at BioRob lab, EPFL.