اثر کم‌آبیاری بر مدیریت بهینه مصرف آب زیرزمینی

حامد نجفی علمدارلو، محمد علی اسعدی[1]

hamed_najafi@modares.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر دشت دهگلان که یکی از دشت‌های غنی از نظر منابع آب و کشاورزی در استان کردستان است، در اثر کمبود نزولات جوی و نیز برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی به وسیله چاه‌های کشاورزی، با کاهش شدید سطح آب زیرزمینی روبرو بوده است. بنابراین شناخت اثرات سیاست‌های مدیریت تقاضای آب کشاورزی جهت تقویت سفره‌های آب زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است. در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است تا اثرات سیاست‌های کم‌آبیاری بر الگوی کشت محصولات، درآمد کشاورزان و میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی دشت مورد بررسی قرار گیرد. برای این هدف، اثر درصدهای کاهش آب مصرفی در دوره‌های مختلف رشد محصولات به‌عنوان سناریوهای آبیاری در قالب روش برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (*PMP*) با رهیافت حداکثر آنتروپی (*ME*) برای سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶مدل‌سازی و برآورد شد. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل *PMP* تحت دو سناریوی مختلف کم‌آبیاری، درصد کاهش سود کمتر از درصد کاهش برداشت آب زیرزمینی است، به‌گونه‌ای‌که با کاهش ۲۲/۱ و ۳۰/۵ در صد آب مصرفی در سناریوی اول و سناریوی دوم، مقدار سود به ترتیب ۴/۶ و ۱۴/۳ در صد کاهش یافته است. از دیگر نتایج این تحقیق، سطح زیرکشت کل محصولات منتخب در سناریوی اول و سناریوی دوم به ترتیب ۳/۵ و ۷/۴ در صد نسبت به سال پایه کاهش و به صورت کشت‌نشده و آیش درآمده است که به‌نوبه‌ی خود فشار بر زمین را کاهش و امکان عملیات خاک‌ورزی و حفاظت خاک را افزایش می‌دهد.

طبقه‌بندی *JEL*: *Q25, Q01, D04, C61*

کلمات کلیدی: کم‌آبیاری، برنامه‌ریزی اثباتی، آب زیرزمینی، دشت دهگلان

---

[1]- به ترتیب استادیار و دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

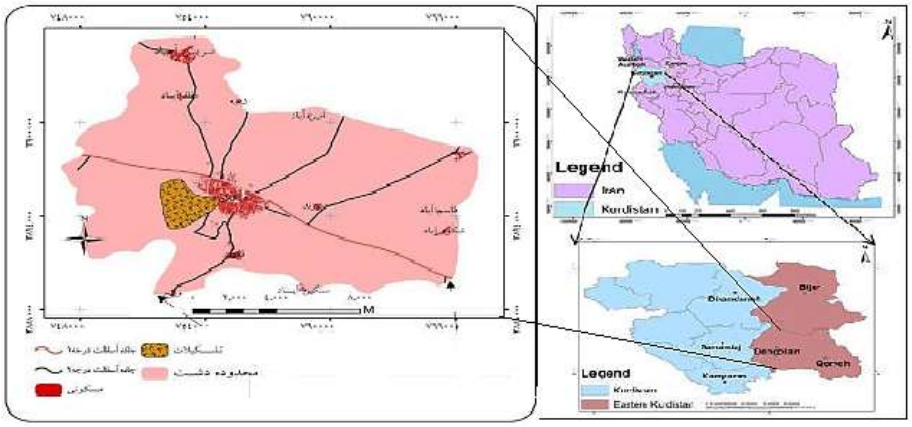
افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز به تولید غذایی بیشتر و از طرفی گسترش سطح زیرکشت محصولات آبی طی دهه‌های اخیر، بهره‌برداری از منابع آب در سرتاسر جهان را افزایش داده و باعث افزایش مقدار تقاضای آب از مقدار عرضه آن و درنتیجه کمیابی منابع آب شده است (هلگرس، ۲۰۰۲؛ شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۸). در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان برداشت آب از منابع زیرزمینی از میزان تغذیه سالیانه آنها بیشتر شده است (براون و همکاران، ۲۰۰۷) که این امر به معنای استخراج و استفاده از آبی است که در طول هزاران سال در لایه‌های آبدار زمین ذخیره‌شده است (شورای انرژی جهانی[۱] ۲۰۰۱). به‌گونه‌ای که برداشت بیش‌ازحد از منابع آب منجر به کاهش و افت شدید سطح سفره‌های آب زیرزمینی و به وجود آمدن بیلان منفی در بسیاری از نقاط جهان شده است (کراوس و برونستیرت،[۲] ۲۰۰۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به سهم بالای مصرف آب در بخش کشاورزی (شرقی و همکاران، ۱۳۹۵) و محدودیت این منبع مهم و حیاتی، صرفه‌جویی در مصرف و استفاده بهینه از آب موجود امری ضروری است و در این زمینه، انتخاب روش‌های مناسب برای بیشینه کردن محصول تولیدی به ازای مصرف هرچه کمتر آب ضروری است (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۷). در این راستا یکی از راه‌های اصلاح الگوی مصرف آب، استفاده از کم‌آبیاری می‌باشد (کیردا و همکاران، ۱۹۹۹) که با صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند به‌عنوان یک راهکار سودمند در وضعیت محدودیت آب و با هدف حداکثر استفاده از واحد حجم آب مصرفی، مطرح شود. با اعمال کم‌آبیاری، به‌طور آگاهانه به گیاه اجازه داده می شود، با دریافت آب کمتر از نیاز، محصول خود را کاهش دهد. به‌عبارت‌دیگر مقداری تنش رطوبتی را در طول فصل رشد تحمل نماید (انگلیش و همکاران، ۱۹۹۰). هرچند به اعتقاد گوکسوی و همکاران (۲۰۰۴) قبل از شروع فعالیت زراعی اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد و کیفیت گیاه باید به‌دقت موردبررسی قرار گیرد. هدف اصلی در کم‌آبیاری افزایش کارایی مصرف آب با کاهش نیاز آبیاری گیاه و حذف جزئی از آب آبیاری است که تأثیر معنی‌داری در افزایش عملکرد ندارد. مدیریت آبیاری در کم‌آبیاری با مدیریت آبیاری کامل تفاوت زیادی دارد (ژانگ و اویس، ۱۹۹۹). در کم‌آبیاری مدیر مزرعه بایستی سطح بهینه کاهش آب را که به ازای آن سود و کارایی مصرف آب بیشتر حاصل می‌گردد، برای هر محصول تعیین نماید (انگلیش، ۱۹۹۰؛ انگلیش و راجا، ۱۹۹۶، سپاسخواه و اکبری، ۲۰۰۵، سپاسخواه و همکاران،

[۱] World Energy Council (WEC)

[۲] Krause & Bronstert

۲۰۰۶). ممکن ا ست در برهه خا صی از دوره ر شد مح صول، از مقدار آب کا سته و در سایر مراحل ر شد آبیاری کامل را اعمال نماید یا ممکن است مقدار آب کمتری را در هر تناوب به کار برد تا استفاده بهینه از آب موجود صورت گیرد.

منطقه د شتی و فلات گونه دهگلان واقع در ا ستان کرد ستان که به نام د شت دهگلان معروف ا ست، یکی از د شت‌های حا صلخیز و قطب ک شاورزی مکانیزه ا ستان به‌ح ساب می‌آید، که نقش مهمی در اقت صاد ک شاورزی پی شرو ا ستان ایفا می‌کند. انتخاب این دشت از این لحاظ دارای اهمیت است که این دشت به دلیل برداشت بیش‌ازحد از سفره آب زیرزمینی و منفی شدن بیلان آب این منطقه با م شکل جدی کمبود منابع آب روبرو خواهد شد. این منطقه دارای درجه حرارت متوسط ۱۰-۱۳درجه سانتی‌گراد، متوسط تبخیر۲۰۳۳ میلی‌متر، متوسط بارندگی سالیانه آن در حدود ۳۴۸ میلی‌متر و تعداد روز های بارانی آن ۷۸روز می باشد. وسعت حوضه ۲۵۸۷ کیلومترمربع دشت دهگلان در حدود ۶۲۴ کیلومتر می‌با شد. جنس سازنده‌های ت شکیل‌دهنده و میزان منابع تغذیه‌کننده آب زیرزمینی موجب سفره آزاد با حجم ذخیره حدود ۸۰۰ میلیون مترمکعب شده ا ست (شرکت سهامی آب منطقه‌ای ا ستان کرد ستان، ۱۳۹۲). آبخوان د شت دهگلان اصلی‌ترین و بزرگترین منبع آبی زیرزمینی استان کردستان است. طی سال‌های اخیر، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در دشت‌های این شهرستان روندی صعودی داشته است، به‌طوری‌که اغلب آنها از این نظر در شرایط بحرانی به سر می‌برند. افزون بر این، تمایل کشاورزان به توسعه سطح زیر کشت محصولات زراعی و استحصال شدیدتر منابع آب از چاه‌های موجود، تقاضا برای حفر چاه‌های جدید را افزایش داده است (شرکت مهندسان مشاور ژرفاب پایش، ۱۳۹۰). این د شت از ۲۷ بهمن ۱۳۸۲ به دلیل افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در شمار د شت‌های ممنوعه برداشت قرارگرفته است (قادرزاده و همکاران، ۱۳۹۵). موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه در شکل (۱) نشان داده‌شده است:



شکل ۱. نقشه استان و موقعیت دشت دهگلان

با توجه به کاهش عرضه آب‌های سطحی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از دشت‌های حاصلخیز دشت دهگلان، اتخاذ برنامه‌های سیاستی مناسب در جهت مدیریت تقاضای آب در سطح مزارع ضروری و حائز اهمیت است. از طرفی دیگر، با توجه به اهمیت آب آبیاری در کشت تابستانه گیاهان، کمبود آب در این زمان و نیاز سایر محصولات زراعی به آب، اعمال کم‌آبیاری از طریق قطع آبیاری در مراحلی از رشد که دارای حساسیت کمتری به کمبود آب می‌باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین منظور، مطالعه حاضر تلاش می‌کند با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی و رهیافت حداکثر آنتروپی ، اثرات استراتژی کم‌آبیاری را به‌عنوان راهکاری عملی و قابل‌اجرا برای حل مشکل آب و حفاظت منابع آب منطقه موردبررسی قرار دهد. در حال حاضر، نصب کنتور هوشمند آب بر روی اکثر چاه‌های منطقه نصب‌شده است، در صورت همت و برنامه‌ریزی دولت و جلب همکاری و مشارکت بهره‌برداران، این راهکار در کوتاه مدت و میان‌مدت در کنار سایر سیاست‌های مدیریت تقاضا به‌راحتی قابل‌اجرا و دارای اثرات قابل‌توجهی خواهد بود.

پیرو این ضرورت در سال‌های اخیر، در خصوص به‌کارگیری روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی مطالعات متعددی به ارزیابی سیاست‌های مختلف کم‌آبیاری در خارج و داخل کشور پرداخته‌اند که به‌اجمال به برخی از آنها اشاره می‌شود.

مشتاق و مقدسی (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای در حوضه‌ی آبریز ماری دارلینگ استرالیا، سیاست کم‌آبیاری را باعث افزایش در بازده ناخالص و کارایی مصرف آب می‌دانند، به‌طوریکه،کورتیگنانی و سورینی[1](۲۰۰۹) برای منطقه‌ای از ایتالیا نشان دادند که اعمال این سیاست به همراه افزایش قیمت آب، بهبود معنی‌داری بر کارایی مصرف آب ایجاد نمی‌کند، اما افزایش قیمت محصولات اثرات مناسب‌تری خواهد داشت. لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۵) در استان خوزستان اعمال تکنیک کم‌آبیاری را در در طی دوره میانی رشد محصولات نامناسب می‌داند. اسعدی (۱۳۹۶) برای شبکه آبیاری دشت قزوین نشان داد که اعمال راهبرد کم‌آبیاری علی‌رغم کاهش سطح زیرکشت و صرفه‌جویی در مصرف آب ، باعث افزایش درآمد مزرعه خواهد شد. اما در مطالعات بنی اسدی و همکاران (۱۳۹۶) برای دشت ارزوئیه استان کرمان، یزدانی و همکاران (۱۳۹۵) و پرهیزکاری و همکاران (۱۳۹۵) برای استان قزوین این یافته تایید نشده است. سلطانی و موسوی (۱۳۹۴) نیز برای دشت همدان-بهار، اعمال تکنیک کم‌آبیاری را موجب کاهش در سود مزرعه می‌دانند. اعمال تکنیک کم آبیاری، بر روی تک محصولات نیز انجام گرفته است، که البته در این میان، بیشتر بر روی جنبه‌های زراعی تاکید شده است. برای

[1]- Cortignani and Severini

نمونه برروی ذرت (کیردا و همکاران، ۲۰۰۵؛ جیا و همکاران، ۲۰۱۷)، پیاز (بیکیل و تایلاهان، ۲۰۰۴؛ ایگبادون و همکاران،۲۰۱۲)، گندم آبی (توکلی،۱۳۸۲)، آفتابگردان (کرم و همکاران، ۲۰۰۷؛ اسماعیلی و گلچین،۱۳۸۴)، پنبه (شیروانیان و همکاران،۱۳۹۳) و ذرت شیرین (کیانی و صابری، ۱۳۹۳؛ کاشیانی و همکاران، ۲۰۱۱) تحقیقات کم‌آبیاری انجام شده است.

با عنایت به مطالعات فوق، بررسی محققان نشان می‌دهد تاکنون مطالعه‌ای در خصوص اثرات استراتژی کم‌آبیاری در راستای کاهش عرضه منابع آب زیرزمینی و پذیرش آن توسط کشاورزان شهرستان دهگلان که یکی از قطب‌های مهم استان کردستان محسوب می‌شود، انجام‌نشده است. از طرفی دیگر، در بیشتر مطالعات، محققان تأثیر کم‌آبیاری بر الگوی کشت را عموماً به‌صورت کاهش میزان کل منابع آب در دسترس کشاورزان و یا به‌صورت یکنواخت بر مراحل رشد محصول اعمال کرده‌اند و تأکید این تحقیقات بیشتر بر تغییر الگوی کشت از گیاهان پرمصرف به گیاهان کم‌مصرف ازلحاظ نیاز آبی بوده است. درصورتی‌که کشاورزان کمتر تمایل دارند چنین تغییراتی در الگوی کشت بدهند. با توجه به اهمیت آب آبیاری در کشت تابستانه بعضی از محصولات، کمبود آب در این زمان و نیاز سایر محصولات زراعی به آب، اعمال کم‌آبیاری از طریق قطع آبیاری در مراحلی از رشد محصول که دارای حساسیت کمتری به کمبود آب می‌باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. ازاین‌رو در مطالعه حاضر، سعی بر این شده است اثرات استراتژی‌های مختلف کم‌آبیاری برای هر محصول طی چند سناریو در راستای حفاظت و پایداری منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی و رهیافت حداکثر آنتروپی موردبررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

اولین گام در ساختن مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری یا فعالیت‌هاست. در انتخاب استراتژی‌های مناسب توجه به بیشینه کردن محصول تولیدی به ازای مصرف هر چه کمتر آب ضروری است. ازاین‌رو کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهبرد عملی و روشی اقتصادی در حصول الگوی بهینه مصرف آب به شمار می‌رود. با توجه به منابع محدود می‌توان استراتژی‌های کم‌آبیاری را نیز مانند استراتژی‌های آبیاری کامل برای گیاهان مختلف، در مدل‌های تخصیص بهینه آب و زمین به کار برد. برای آنکه بتوان منافع حاصل از آبیاری را در زراعت تحلیل کرد، ابتدا باید تابع عملکرد محصول را به دست آورد. به‌عبارت‌دیگر رابطه بین مقدار آبی که به زراعت داده می‌شود و مقدار محصول تولیدی را بررسی کرد (هیکزیم و هیدی، ۱۹۷۸؛ دورنبوس و کاسام، ۱۹۷۹؛ تایلور و همکاران، ۱۹۸۳؛ میر و همکاران، ۱۹۹۳؛ آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ علیزاده، ۱۳۸۵). بدین منظور میزان عملکرد هر یک از محصولات به ازای مقادیر مختلف

آب آبیاری با ا ستفاده از رابطه (۱) به د ست آمد (میر و همکاران، ۱۹۹۳) و بر این ا ساس، تابع عملکرد ن سبی هر یک از محصولات، نسبت به آب آبیاری تعیین شد.

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^{n} \left[1- KY_i \left(1-\frac{W_a}{W_p}\right)_i\right] \quad (۱)$$

که در آن Y_p و Y_a به ترتیب حداکثر محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی و مقدار محصول تولیدی در شرایط واقعی (شرایط تنش آبی)، i: مرحله مشخصی از ر شد، n: تعداد مراحل ر شد و KY_i: ضریب واکنش عملکرد نسبت به تنش آبی در مرحله ر شد i یا عامل کاهش محصول نامیده می شود. W_p، حداکثر آب آبیاری موردنیاز گیاه و W_a، مقدار آب آبیاری موردنیاز گیاه در دوره‌های مختلف ر شد و ضرایب KY_i برای مراحل مختلف ر شد گیاهان در ن شریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی سازمان خواروبار جهانی(*FAO*) گزارش و در جدول (۱) ارائه‌شده است (کیردا و همکاران، ۲۰۰۴). رابطه فـــوق در هریـــک از مراحـــل مختلـــف رشد اعمال می‌شود. در این تابع استراتژی‌های کم‌آبیاری به‌گونه‌ای تعریف‌شده است که اگر کم آبیاری در یک دوره اتفاق افتد در سایر دوره‌های آبیاری به‌صورت کامـل در نظـر گرفته‌شده است. برای تعیین اثر کم‌آبیاری در طول دوره‌های مختلف رشد از رابطه (۲) استفاده شد که در آن x، مقدار کاهش نسبی مصرف آب طی دوره رشد (کوچکتر یا مساوی یک) می‌باشد.

$$W_{ai} = (1 - x)W_{pi} \quad (۲)$$

در این مطالعه ا ستراتژی کم‌آبیاری (میزان تنش) در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ در صد در مراحل مختلف ر شد محصولات اعمال شد. لازم به ذکر است، پـــس از محاســـبه حداکثر عملکرد محصول در شرایط بدون تنش، عملکرد واقعی با در نظر گرفتن تنش آبی برای محصولات منتخب بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار Excel محاسبه شد.

مراحل رشـد محصـولات شـامل مرحله رشـد رویشـی، گل‌دهی، شـکل‌گیری عملکرد محصـول و رسـیدن محصـول برای محصولات آبی گندم، جو، یونجه، شبدر، اسپرس، سیب‌زمینی، پیاز[۱] در نظر گرفته شد. در جدول (۱) ملاحظه می‌شود که مرحله گلدهی برای محصـولات، حسـاس‌ترین مرحله نسـبت به کم آبی می‌باشـد و کاهش آبیاری در این مرحله، موجب بیشترین کاهش عملکرد محصول می‌گردد. لذا در این مرحله، آبیاری بدون کم آبیاری در مدل لحاظ شد.

[۱] محصولات منتخب مطالعه حاضر، ۹۷/۲ درصد کل سطح زیرکشت دشت دهگلان را به خود اختصاص داده است.

جدول ۱. ضریب واکنش عملکرد محصول به آب در مراحل مختلف رشد نسبت به کم‌آبیاری

محصول	مراحل رشد			
	رشد رویشی	گلدهی	عملکرد محصول	رسیدن محصول
گندم	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰/۲
جو	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰/۲
یونجه	۰/۷	–	–	–
سیب‌زمینی	۰/۶	–	۰/۷	۰/۲
اسپرس	۰/۷	–	–	–
شبدر	۰/۷	–	–	–
پیاز	۰/۴۵	–	۰/۸	۰/۳

ماخذ: نشریه شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی سازمان خواروبار جهانی (فائو)

همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، در این مطالعه، جهت تحلیل سیاست‌های اعمال کم‌آبیاری برای کشاورزان دشت دهگلان از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی استفاده شد. هدف عمده این نوع مدل‌ها، بیان واکنش‌های تولیدکنندگان به تغییرات خارجی می‌باشد، که سیاست‌گذاران را به مدل‌های *PMP* علاقه‌مند نموده است (باسی، ۲۰۰۶). بحث اصلی برای ساختن این مدل‌ها، افزایش اطمینان با اجتناب از تفاوت بین موقعیت پایه فعلی و موقعیت پایه شبیه‌سازی و نیز بازسازی رفتار کشاورزان در محیط خاص آنها بر اساس داده‌های کمی می‌باشد که در فرایند تصمیم مزرعه (استفاده زمین و مقدار تولید) موجود هستند. روش کالیبراسیون اتخاذشده در این مدل بر تابع هزینه یا تابع تولید غیرخطی به هر فعالیت تولیدی مشاهده‌شده از تخصیص زمین در سطح منطقه‌ای در دوره مبنا اشاره می‌کند (قرقانی و همکاران، ۱۳۸۸). *PMP* پیشتر خود را به‌عنوان روش غالب در مدل‌های برنامه‌ریزی جهت تحلیل سیاست‌ها مطرح کرده است (هاوس، ۱۹۸۷؛ کسناکوگلیو و بائر، ۱۹۸۸؛ هورنر و همکاران، ۱۹۹۲؛ آرفینی و پاریس، ۱۹۹۵؛ هاویت، ۱۹۹۵؛ بارکاوی و بوتالت، ۱۹۹۹؛ پاریس و همکاران، ۲۰۰۰؛ سایپریس، ۲۰۰۰؛ گرایندورگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ هلمینگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ آرفینی و همکاران، ۲۰۰۳). مدل‌های *PMP* در کشاورزی بیشتر برای ارزیابی تاثیر تغییرات احتمالی در شرایط بازار و سیاست‌های کشاورزی بر روی الگوی‌کشت کشاورزان، مصرف آب و پیامدهای اقتصادی آن صورت گرفته است (مدلین-آزورا و همکاران، ۲۰۱۰؛ کورتیگنانی و سورینی، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹؛ ایگیسیاس و بلانکو[1] ۲۰۰۸؛ هی، ۲۰۰۴؛ بلانکو و

[1] Iglesias & Blanco

همکاران، ۲۰۰۴). مهمترین مزیت این الگوها توانایی آنها در بررسی تأثیر سیاست‌ها در سطح مزرعه به‌صورت تجمیعی و با بهره‌گیری از اطلاعات و داده‌های خرد و جزئی است (پاریس و هاویت، ۱۹۹۸؛ بخشی و همکاران، ۱۳۹۰).*PMP* به‌عنوان رایج‌ترین روش کاربردی برای کالیبرا سیون یک مدل برنامه‌ریزی ریا ضی طی سه مرحله دنبال می شود (هاویت، ۱۹۹۵؛ پاریس و هاویت، ۱۹۹۸):

الف) تصریح مدل برنامه‌ریزی خطی با درنظرگرفتن محدودیت‌های کالیبراسیون: در این مرحله، قیدهای کالیبراسیون به برنامه خطی سال پایه با مقید کردن حل این برنامه به فعالیت‌های م شاهده شده ا ضافه می شود که مقادیر دوگانه برای منابع قابل تخصیص برای هر فعالیتی به‌جز فعالیت نهایی به دست می‌آورد.

ب) کاربرد مقادیر دوگان مدل مرحله اول جهت تعیین پارامترهای تابع هدف غیرخطی: در این مرحله، ارزش‌های دوگانه هر فعالیت همراه مجموعه داده سال پایه با مشتق‌گیری پارامترهای غیرخطی کل توابع تولید متغیر فعالیت به کار گرفته می‌شوند.

ج) کاربرد تابع هدف کالیبره شده در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به‌منظور تحلیل سیا ست‌ها: در مرحله پایانی نیز پارامترهای تابع تولید مشتق شده و مجموعه داده سال مبنا در مشخص نمودن برنامه غیرخطی PMP استفاده می شوند که قیدهای ا صلی، به‌جز قیدهای کالیبرا سیون را شامل می شود. مدل تجربی نهاییPMP به‌صورت روابط (۳) تا (۱۰) نشان داده‌شده است:

$$\text{Max GM} = \sum_{i=1}^{n} X_i \left(P_i \left(\sum_{j=1}^{m} a_{ij} X_{ij} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} q_{ijk} X_{ik} X_{kj} \right) - CW_i - \sum_{j=1}^{m} C_j \right) \quad (۳)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{n} X_i \leq Tland \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i X_i \leq SW \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{n} L_i X_i \leq TLabor \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{n} M_i X_i \leq TMachin \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Fertilize_i X_i \leq TFertilize \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Poison_i X_i \leq TPoison \quad (۹)$$

$$X_i \geq 0 \quad (۱۰)$$

در معادلات فوق، رابطه (۳) تابع هدف غیرخطی مدل PMP را نشان می‌دهد که شامل تابع تولید غیرخطی واسنجی شده برای نهاده‌های مصرفی آب، زمین، نیروی کار، ماشین‌آلات، کودهای شیمیایی و سموم مصرفی می‌باشد. q_{ijk} ضریب جزء درجه دوم تابع تولید و X_{kj} مصرف نهاده k (جایگزین نهاده j است) در تولید محصول i است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، به‌منظور برآورد ضرایب تابع تولید غیرخطی (تخمین پارامترهای a_{ij} و q_{ijk} تابع تولید)، از روش حداکثر آنتروپی استفاده شد. بر اساس مطالعات مختلف در حال حاضر کامل‌ترین روش جهت کالیبراسیون مدل‌های PMP ، بر اساس روش حداکثر آنتروپی استوار است (هاویت، ۲۰۰۵؛ کاپولو و پاریس، ۲۰۰۸). X_i میزان سطح زیر کشت محصول i برحسب هکتار و W_i، L_i، M_i، $Fertilize_i$ و $Poison_i$ به ترتیب بیانگر میزان مصرف آب زیرزمینی، نیروی کار، ماشین‌آلات، کود شیمیایی و سموم مصرفی برای تولید محصول i در یک هکتار زمین زراعی هستند. علاوه بر این، $Tland$، SW، $TLabor$، $TMachin$، $TFertilize$ و $TPoison$ به ترتیب مقدار کل زمین‌های اختصاص‌یافته به ، منابع آب، نیروی کار، ماشین‌آلات، کودهای شیمیایی و سموم مصرفی در دسترس برای فعالیت‌های زراعی محصولات مدنظر در منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهند. روابط (۴) تا (۹) محدودیت نهاده‌های مصرفی لحاظ شده در مدل برای تولید محصولات منتخب زراعی در منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد و بیانگر آن هستند که میزان استفاده از هر یک از منابع ذکرشده برای تولید هر هکتار محصول i نمی‌تواند از کل منابع در دسترس منطقه موردمطالعه بیشتر باشد. همچنین رابطه (۱۰) نیز بیانگر محدودیت غیر منفی بودن سطح فعالیت‌های زراعی یا محدودیت غیر منفی بودن اراضی زیر کشت می‌باشد.

لازم به ذکر است که مدل بکار گرفته‌شده تغییرات عوامل تولیدی بیان‌شده را نسبت به سیاست کم‌آبیاری مشخص می‌نماید. به دلیل اهمیت نهاده آب و سطح زیر کشت تغییرات این دو عامل اساسی در مطالعه حاضر گزارش‌شده است. جامعه آماری پژوهش شامل اراضی آبی واقع در دشت دهگلان می‌باشد. در این مطالعه، داده‌ها و اطلاعات مربوط به محصولات زراعی و منابع آب قابل دسترس (آب زیرزمینی) از طریق مراجعه به سازمان‌ها و نهادهای مربوطه (سازمان جهاد

کشاورزی و امور منابع آب) برای سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ گردآوری شد. گفتنی است که برای ساخت الگوهای موردبررسی و شبیه‌سازی سیاست‌ها از نرم‌افزار GAMS[1] (سیستم مدل‌سازی جبری تعمیم‌یافته) استفاده‌شده است.

نتایج

در ابتدا، نتایج به‌دست‌آمده از حل الگو و سپس اثرات اتخاذ سیاست کم‌آبیاری بر الگوی کشت، مصرف نهاده آب و سود مزارعه نشان داده می‌شود. با توجه به به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در رابطه با تعیین الگوی بهینه کشت در منطقه موردمطالعه، نتایج حاصل از اجرای مدل در دو حالت کالیبره و حالت بهینه در جدول شماره (۲) نشان داده‌شده است. همانگونه که در جدول قابل‌مشاهده است، مقادیر سال پایه بر مقادیر به‌دست‌آمده از الگوی بهینه به‌دست‌آمده از PMP تا حدود بسیار بالایی منطبق است که نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب مدل می‌باشد.

جدول۲. مقایسه سطح زیر کشت مدل مبنا و نتایج کالیبره حل مدل PMP واحد: هکتار

محصول	مدل مبنا	نتایج حل PMP
گندم	۷۰۰۰	۷۰۰۰/۷
جو	۶۰۶	۶۰۴/۲
یونجه	۵۵۱۴	۵۵۱۴/۵
سیب‌زمینی	۴۹۳۵	۴۹۳۵/۵
اسپرس	۱۱۹	۱۱۹
شبدر	۱۵۳	۱۵۳
پیاز	۱۷۲	۱۷۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که پیشتر بیان شد، کم‌آبیاری در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در مراحل مختلف رشد ازجمله مرحله رشد رویشی، گل‌دهی، شکل‌گیری عملکرد و مرحله رسیدن محصول برای محصولات آبی گندم، جو، یونجه، شبدر، اسپرس،

[1] Generalized Algebraic Modeling System, GAMS/MINOS (Brooke et al., 1988)

سیب‌زمینی و پیاز اعمال و در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، از میان نتایج سناریوهای مختلف، فقط نتایج دو سناریوی برتر گزارش‌شده است.

نتایج برآورد الگو در شرایط سناریوی اول، یعنی کاهش ۱۰ در صد کم آبیاری در مرحله ر سیدن مح صولات گندم، جو، سیب‌زمینی و پیاز و ۱۰ در صد در مرحله ر شد رویـ شی برای مح صولات یونجه، شبدر و ا سپرس در جدول (۳) ن شان داده شده ا ست. اثر تنش کم‌آبیاری در این مراحل با کمترین کاهش عملکرد در مح صولات مواجه می‌با شد. طبق نتایجی که در جدول قابل‌مشاهده است در اثر اعمال این سیاست، سطح زیر کشت محصولات گندم، جو، شبدر، پیاز و سیب‌زمینی ن سبت به الگوی ک شت فعلی کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که مح صولاتی که صرفه اقت صادی بالاتری به ازای مصرف هر مترمکعب آب آبیاری دارند، با افت کمتری از لحاظ سطح زیرکشت مواجه شده‌اند. یونجه به دلیل اینکه یکی از مهمترین گیاهان علوفه‌ای برای تغذیه دام می‌باشد و بازدهی اقتصادی بالایی به ازای مصرف هر مترمکعب آب آبیاری دارد، سطح زیر کشت آن نسبت به سال پایه افزایش‌یافته است. درمجموع سطح زیر کشت محصولات منتخب به میزان ۳/۵ درصد نسبت به سال پایه کاهش و به‌صورت کشت‌نشده و آیش درآمده است، که نوبه خود فشار بر زمین را کاهش می‌دهد و امکان عملیات خاک‌ورزی و حفاظت خاک را افزایش می‌دهد. در شرایط سناریوی اول، تغییراتی در سطح زیر کشت گیاه علوفه‌ای اسپرس ایجاد نشده است. می‌توان گفت که گیاه اسپرس، به دلیل عدم ایجاد نفخ، علوفه بسیار مرغوبی برای دام‌ها به‌ویژه دام‌های شیرده است. از طرفی دیگر این محصول در شرایط فعلی کمترین سطح زیر کشت را دارد، به‌نحوی‌که درمجموع کمتر از یک درصد زمین‌های منطقه به کشت این محصول اختصاص پیداکرده است و با اعمال کم‌آبیاری واکنش چندانی به این سیاست نشان نخواهند داد. زارعان پس از کاهش آب در دسترس سعی می‌کنند، محصولاتی که به نسبت سایر محصولات به ازای هر مترمکعب آب، صرفه اقتصادی بیشتری دارند را در الگو حفظ کنند و در عوض سطح زیر کشت محصولاتی را که از آب‌بری بالاتر و درعین‌حال از سود ناخالص پایین‌تر برخوردارند را به میزان بیشتری کاهش دهند.

جدول۳. مقایسه الگوی فعلی کشت محصولات با نتایج حاصل از حل مدل PMP در سناریوی اول

محصول	نتایج حل PMP		اعمال راهبرد کم‌آبیاری			
	الگوی کشت (هکتار)	مقدار آب مصرفی (هزار مترمکعب)	الگوی کشت		مقدار آب مصرفی	
			هکتار	درصد تغییرات	هزار مترمکعب	درصد تغییرات
گندم	۷۰۰۰/۷	۵۱۱۰۰	۶۳۵۹	-۹/۱	۴۱۷۷۸/۶	-۱۸/۵
جو	۶۰۴/۲	۳۳۳۳	۴۴۸	-۲۵/۸	۲۲۱۷/۷	-۳۳/۴

یونجه	۵۵۱۴/۵	۹۰۹۸۱	۵۷۱۰	۳/۵	۶۴۲۳۷/۵	-۲۹/۴
سیب‌زمینی	۴۹۳۵/۵	۵۶۷۵۲/۵	۴۹۱۱	-۰/۵	۴۸۷۵۹/۵	-۱۴
اسپرس	۱۱۹	۱۴۲۸	۱۱۹	۰	۱۲۸۵/۲	-۱۰
شبدر	۱۵۳	۱۸۳۶	۱۵۰	-۲	۱۶۲۰	-۱۱/۸
پیاز	۱۷۲	۲۰۶۴	۱۵۵	-۹/۹	۱۶۷۴	-۱۸/۹
مجموع	۱۸۴۹۸/۹	۲۰۷۴۹۴/۵	۱۷۸۵۲	-۳/۵	۱۶۱۵۷۲/۵	-۲۲/۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج به‌د ست‌آمده از محا سبه مدل و اعمال سناریوی دوم، یا سیا ست کم‌آبیاری در سطح ۱۰ در صد در مرحله ر شد رویشی برای محصولات گندم، جو و پیاز ، ۲۰ در صد در مرحله ر سیدن محصول سیب‌زمینی و ۲۰ در صد کم‌آبیاری در مرحله ر شد رویشی برای مح صولات یونجه، شبدر و ا سپرس در جدول (۴) ن شان داده شده ا ست. در این سناریو نیز تغییرات الگوی کشت شدیدتر از وضعیت قبلی است، به‌گونه‌ای که برعکس سناریوی اول، در این سناریو اسپرس بیشترین کاهش را نسبت به سطح زیر کشت سال پایه داشته است. از دلایل کاهش شدید سطح زیر کشت جو، اسپرس و شبدر می‌توان گفت که این مح صولات ن سبت به مح صولات زراعی منطقه کمترین منافع اقت صادی را دارا ه ستند و سیا ست کم‌آبیاری باعث گردیده ا ست که ک شاورزان الگوی ک شت آبی را انتخاب نمایند که منافع اقت صادی بالایی در مقابل سایر محصولات داشته باشند. از طرفی دیگر به ترتیب مجموع سطح زیر کشت محصولات منتخب و مقدار آب مصرفی به‌اندازه ۷/۴ و ۳۰/۵ در صد کاهش‌یافته ا ست. سطح زیر ک شت مح صولات یونجه، سیب‌زمینی و پیاز، به دلیل ارزش اقت صادی یا صرفه اقتصادی بالاتر، حا صل از هر هکتار آنها ن سبت به دیگر مح صولات الگو در منطقه موردبرر سی نسبت به سیا ست کم‌آبیاری کمتر واکنش نشان داده و کاهش‌یافته‌اند.

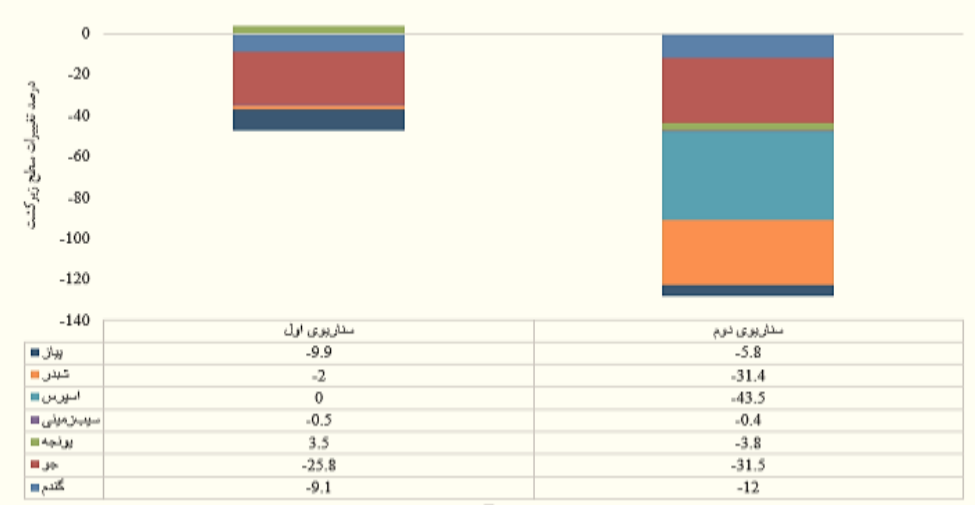
جدول۴. مقایسه الگوی فعلی کشت محصولات با نتایج حاصل از حل مدل PMP در سناریوی دوم

محصول	نتایج حل PMP		اعمال راهبرد کم‌آبیاری			
	الگوی کشت	مقدار آب مصرفی	الگوی کشت		مقدار آب مصرفی	
	(هکتار)	(هزار مترمکعب)	هکتار	درصد تغییرات	هزار مترمکعب	درصد تغییرات
گندم	۷۰۰۰/۷	۵۱۱۰۰	۶۱۵۴	-۱۲	۴۰۴۳۱/۸	-۲۰/۸
جو	۶۰۴/۲	۳۳۳۳	۴۱۴	-۳۱/۵	۲۰۴۹/۳	-۳۵/۵
یونجه	۵۵۱۴/۵	۹۰۹۸۱	۵۳۰۲	-۳/۸	۵۳۰۲۰	-۴۱/۷
سیب‌زمینی	۴۹۳۵/۵	۵۶۷۵۲/۵	۴۹۱۷	-۰/۴	۴۵۲۳۶/۴	-۲۰/۳
اسپرس	۱۱۹	۱۴۲۸	۶۷	-۴۳/۵	۶۴۳/۲	-۵۵

شبدر	۱۵۳	۱۸۳۶	۱۰۵	-۳۱/۴	۱۰۰۸	-۴۵
پیاز	۱۷۲	۲۰۶۴	۱۶۲	-۵/۸	۱۷۴۹/۶	-۱۵/۲
مجموع	۱۸۴۹۸/۹	۲۰۷۴۹۴/۵	۱۷۱۲۱	-۷/۴	۱۴۴۱۳۸/۳	-۳۰/۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق

به‌طورکلی نتایج این بخش حاکی از آن است که اعمال استراتژی کم‌آبیاری بر مراحل کم حساس رشد محصولات منتخب نسبت به تنش آبی، باعث شده است که کشاورزان الگوی کشت آبی محصولاتی را انتخاب نمایند که منافع اقتصادی بالایی در مقابل سایر محصولات داشته باشند. درصد تغییرات الگوی کشت محصولات منتخب در اثر سیاست‌های مختلف کم‌آبیاری در سناریوی اول و سناریوی دوم در شکل (۲) نشان داده‌شده است.



شکل۲. درصد تغییرات الگوی کشت در اثر سناریوهای کم‌آبیاری

در مطالعه حاضر اثرات استراتژی کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد محصولات علاوه بر الگوی کشت و مصرف نهاده آب، بر درآمد مزرعه که یکی دیگر از متغیرهای تأثیرپذیر از این سیاست می‌باشد، تحلیل و ارزیابی شد. جدول (۵) نتایج به‌دست‌آمده در این زمینه را نشان می‌دهد.

جدول۵. تغییرات سود، آب مصرفی و سطح زیر کشت محصولات زراعی در سناریوهای مختلف کم‌آبیاری

	الگوی فعلی	سناریوی اول	سناریوی دوم
بازده برنامه‌ای (میلیون تومان)	۱۳۹۸۱۶/۴	۱۳۳۳۷۳/۳	۱۲۶۷۸۰/۳
(درصد تغییرات)	-	-۴/۶	-۹/۳
مقدار آب مصرفی (هزار مترمکعب)	۲۰۷۴۹۴/۵	۱۶۱۵۷۲/۵	۱۴۴۱۳۸/۶
(درصد تغییرات)	-	-۲۲/۱	-۳۰/۵
سطح زیر کشت محصولات (هکتار)	۱۸۴۹۸/۹	۱۷۸۵۲	۱۷۱۲۱
(درصد تغییرات)	-	-۳/۵	-۷/۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با توجه به نتایج جدول (۵)، ملاحظه می‌شود که اعمال سیاست کم‌آبیاری در سناریوی اول، ضمن کاهش سطح زیر کشت محصولات زراعی منطقه و کاهش فشار بر زمین کشاورزی و همچنین مقدار مصرف آب به ترتیب به میزان ۳/۵ و ۲۲/۱ درصد، موجب کاهش سود ناخالص حاصل از کشت محصولات تولیدی منطقه به میزان حدود ۴/۶ درصد شده است. همچنین نتایج سناریوی دوم نشان می‌دهد، اگرچه که سود ناخالص کشاورزان دشت دهگلان نسبت به سال پایه کاهش می‌یابد، اما این کاهش سود با صرفه‌جویی در برداشت حجم زیادی از نهاده کمیاب آب زیرزمینی در سطح مزارع همراه است. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت، با کاهش مصرف آب، میزان درآمد به دلیل کاهش عملکرد محصولات زراعی نیز کاهش می‌یابد، اما در تمام حالات درصد کاهش سود نسبت به درصد کاهش آب مصرفی کمتر است. این مطلب بیانگر این است که با وارد شدن محصولات با استراتژی‌های کم‌آبیاری در مراحل خاصی از رشد محصول می‌توان به هدف کاهش مصرف آب رسید به‌گونه‌ای که درصد کاهش درآمد مزرعه نسبت به درصد کاهش مصرف آب، کمتر باشد. بنابراین می‌توان با انتخاب سناریوهای کم‌آبیاری در مصرف آب صرفه‌جویی کرده و از این طریق به پایداری و حفظ منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان کمک شایانی نمود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به وضعیت نامناسب بهره برداری از منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان و برداشت بی رویه این منبع طبیعی ارزشمند، ارتفاع سطح آب آبخوان این دشت به‌شدت کاهش‌یافته و پایداری ذخایر آب زیرزمینی آن با خطر جدی مواجه شده است. ادامه این روند، ضمن ایجاد مشکلاتی نظیر نشست زمین، اقتصاد منطقه را که بر شالوده کشاورزی استوار است به مخاطره می اندازد و حتی تامین آب صنعتی و آب شرب روستاها را با چالش مواجه می کند. بنابراین، ضروت انجام مطالعات راهگشا و اقدامات مطالعه شده روشن و مبرهن است. در این راستا مطالعه حاضر درصدد است، اثرات استراتژی

کم‌آبیاری در یک الگوی برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP) و رهیافت حداکثر آنتروپی (ME) بر روی میزان درآمد و سطح زیرکشت محصولات عمده و میزان مصرف آب از منابع آب زیرزمینی در دشت دهگلان را بررسی کرده و با توجه به نتایج حاصله، راهکارهایی را برای استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از تخریب این منابع ارئه نماید. برای حل مدل از داده‌های سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ و نرم‌افزار GAMS استفاده شد. نتایج حاصل از اعمال سیاست کم‌آبیاری بر مراحل رشد محصولات منتخب با حساسیت کمتر نسبت به تنش آبی بصورت ۱۰ درصد کم آبیاری در مرحله رسیدن محصولات گندم، جو، سیب‌زمینی و پیاز و ۱۰ درصد در مرحله رشد رویشی برای محصولات یونجه، شبدر و اسپرس (سناریو اول) و اعمال سیاست کم‌آبیاری در سطح ۱۰ درصد در مرحله رشد رویشی برای محصولات گندم، جو و پیاز ، ۲۰ درصد در مرحله رسیدن محصول سیب‌زمینی و ۲۰ درصد کم‌آبیاری در مرحله رشد رویشی برای محصولات یونجه، شبدر و اسپرس (سناریو دوم) بر کل اراضی منطقه موردمطالعه نشان داد که این امر علی‌رغم کاهش کل سطح زیرکشت منطقه به ترتیب به میزان ۳/۵ و ۷/۴ درصد و همچنین کاهش آب قابل دسترس به میزان ۲۲/۱ و ۳۰/۵ درصد نسبت به سال پایه، باعث کاهش بازده برنامه‌ای به میزان ۴/۶ و ۹/۳ درصد در سناریوی اول و دوم شده است. نتایج بیانگر آن است که در اثر اعمال سناریوهای مختلف کم‌آبیاری در مراحل کم‌حساس رشد محصولات، الگوی کشت به نفع محصولاتی که درآمد بیشتری را به ازای مقدار ثابت آب ایجاد می‌کنند، پیش می‌رود. به عبارت‌دیگر، کشاورزان پس از اعمال کم‌آبیاری سعی می‌کنند، محصولاتی که به نسبت سایر محصولات به ازای هر مترمکعب آب آبیاری، صرفه اقتصادی بیشتری دارند را در الگو حفظ کنند و در عوض سطح زیر کشت محصولاتی را که از آب‌بری بالاتر و درعین‌حال از سود ناخالص پایین‌تر برخوردارند را به میزان بیشتری کاهش دهند. نکته قابل تامل نتایج فوق این است که با کاهش آب آبیاری، لزوما محصولات با نیاز آبی کمتر مانند گندم، جو، شبدر و یا اسپرس بیشتر وارد الگوی کشت نمی شوند؛ بلکه متغیرهای اقتصادی و میزان بازده برنامه بالای محصولات، فاکتور مهمتری در این زمینه به شمار می‌آید. کشاورزان حاضرند بخشی از زمین آبی خود را به صورت کشت نشده و آیش باقی بگذارند ولی حاضر به وارد کردن محصولات کم بازده با نیاز آبی کمتر نخواهند بود. باتوجه به نتایج فوق، در راستای بهبود منابع آب‌های زیرزمینی دشت دهگلان پیشنهاد می‌شود، برنامه‌ریزی الگوی کشت منطقه بر اساس اهداف بازدهی کشاورزان و کاهش آب مصرفی در مراحل کم‌حساس عملکرد محصول نسبت به تنش آبی تدوین گردد که در این راستا، حذف آبیاری‌های غیر مؤثر با توجه به مراحل حساس رشد محصولات می‌تواند به رونق این فرایند، کمک شایانی نماید. بنابراین انجام اینگونه مطالعات می‌تواند به کشاورز در شرایط‌های مختلف امکانات آبی و وضعیت اقتصادی در جهت مدیریت تقاضای آب کمک نماید. از طرفی‌دیگر،

گسترش و تداوم جدی نصب کنتورهای هوشمند بر روی تمام چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق ، همچنین جلوگیری از تمام بهره‌برداری‌های غیرقانونی و مسدودکردن چاه‌های غیرمجاز در محدوده موردمطالعه به صورت کامل همراه با درنظرگرفتن سهمیه‌های محدودکننده برداشت آب در راستای دستیابی به بهره‌برداری پایدار به صورت تدریجی و گام به گام می‌تواند به حفظ پایداری منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان کمک شایانی نماید.

منابع

۱. اسعدی، م. ح. (۱۳۹۶) تحلیل اقتصادی راهبرد کم‌آبیاری جهت مدیریت منابع آب کشاورزی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). رساله کارشناسی ارشد اقتصاد کشاورزی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲. اسماعیلی، م. و گلچین، ا. (۱۳۸۴) تحلیل اقتصادی کم‌آبیاری و تأثیر آن بر عملکرد دانه و میزان روغن دو رقم آفتابگردان، دانش کشاورزی، ۱۵(۱): ۱۲۱-۱۳۵.

۳. بخشی، ع. دانشور کاخکی، م. و مقدسی، ر. (۱۳۹۰) کاربرد مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی به‌منظور تحلیل اثرات سیاست‌های جایگزین قیمت‌گذاری آب در دشت مشهد. نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۳): ۲۹۴-۲۸۴.

۴. بنی اسدی، م. زارع مهرجردی، م. ز. مهرابی بشرآبادی، ح. میرزایی خلیل آباد، ح. ر. رضایی استخروئیه، ع. و حسنوند، م. (۱۳۹۶) بررسی تغییر الگوی کشت و میزان استخراج منابع آب زیرزمینی با اعمال سیاست‌های کاهش مصرف آب در دشت ارزوئیه استان کرمان، اقتصاد کشاورزی، جلد ۱۱، شماره ۳: ۱۲۹-۱۱۱.

۵. پرهیزکاری، ا. صبوحی، م. احمدپور، م. و بدیع برزین ح. (۱۳۹۵) ارزیابی اثرات کم آبیاری و کاهش تخصیص آب بر تولید بخش کشاورزی استان قزوین، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۶، (۲): ۱۷۳-۱۸۵.

۶. توکلی، ع. ل. (۱۳۸۲) اثرات کم آبیاری و نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم، مجله علمی کشاورزی، ۲۶(۲): ۷۵-۸۷.

۷. دفتر مطالعات پایه منابع آب. (۱۳۸۸) شرکت مدیریت منابع آب ایران

۸. سپاسخواه، ع. ر. شعبانی، م .ک. و هنر، ت. (۱۳۸۷) بهینه‌سازی مصرف آب و الگوی کشت با استفاده از تکنیک کم‌آبیاری در سطح مزرعه: مطالعه موردی شبکه آبیاری درودزن فارس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۶، (۳)، ص ۳۵-۵۲.

۹. سلطانی، ش. و موسوی. س. ح. ا. (۱۳۹۴) کم آبیاری و بهبود فناوری آبیاری؛ راهبردهای بهینه‌ی سازگاری با تغییرپذیری اقلیم، اقتصاد کشاورزی، جلد ۹، (۴): ۱۲۱-۱۴۹.

۱۰. شرقی، ط. کلانتری، خ. اسدی، ع. و جمعه‌پور، م. (۱۳۹۵) شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیمی و سیاست انتقال آب از بخش کشاورزی به صنعت بر منابع آبی و تاثیر آن بر تولیدات باغی (در استان یزد). مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران. دوره ۲-۴۷، (۴): ۸۵۱-۸۶۳.

۱۱. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کردستان. (۱۳۹۲) گزارش سالانه دفتر مطالعات امور آب استان.
۱۲. شرکت مهندسان مشاور ژرفاب پایش. (۱۳۹۰) گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت در دشت دهگلان.
۱۳. شیروانیان، ع. حقیقت‌نیا، ح. و مهرجو، س. (۱۳۹۳) تعیین آستانه‌ی اقتصادی کم‌آبیاری پنبه در شهرستان داراب، مجله‌ی اقتصاد و توسعه کشاورزی، ۲۸(۴): ۳۱۲-۳۲۱.
۱۴. قادرزاده، ح. کاظمی، س. و حاجی رحیمی، م. (۱۳۹۵) بررسی پایداری منابع در آب بخش کشاورزی شهرستان دهگلان محیط‌زیست و مهندسی آب، جلد ۲، (۱): ۱۰۲-۱۱۰.
۱۵. قرقانی، ف. بوستانی، ف. و سلطانی، غ.ر. (۱۳۸۸) بررسی تاثیر کاهش آب آبیاری و افزایش قیمت آب بر الگوی کشت با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت: مطالعه موردی شهرستان اقلید در استان فارس .مجله تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱(۱):۵۷-۷۴.
۱۶. کیانی، ع. ر. و صابری، ع. ر. (۱۳۹۳) بررسی عملکرد و مصرف آب در ذرت شیرین تحت تأثیر شیوه‌های مختلف کم‌آبیاری در دو الگوی کاشت، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۱، (۶): ۱۵۵-۱۷۱.
۱۷. یزدانی، س. محمودی، ا. یاوری، غ. ر. شوکت فدایی، م. نظری، م. ر. و میرزایی، م. (۱۳۹۵) تحلیل آثار اقتصادی سیاست غیر قیمتی کاهش عرضه آب در دشت قزوین. ویژه‌نامه رشد و توسعه اقتصاد روستایی و کشاورزی، ۲(۳): ۸۹-۹۸.

18. Arfini, F., & Paris, Q. (1995) A positive mathematical programming model for regional analysis of agricultural policies. Proceedings of the 40Th seminar of the European association of agricultural economist, Ancona, Italy: 17-35.
19. Arfini, F., Donati, M. and Paris, Q. (2003) A National PMP Model for Policy Evaluation in Agriculture using Micro Data and Administrative Information. Paper presented at the International Conference Agricultural Policy Reform and the WTO: Where Are We Heading? Capri, Italy, June 23-26, 2003.
20. Barkaoui, A., & Butault, J, P. (1999) Positive mathematical programming and sereals and oilseeds supply within EU under Agenda 2000. Ninth European Congress of Agricultural Economics, Warsaw, pp 73-86.
21. Bekele, S. Tilahun, K. (2007) Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. Agr. Water Manage., 89 (2007), pp. 148-152
22. Blanco, M., Iglesias, E., & Sumpsi, J, M. (2004) Environmental and socioeconomic effect of water pricing policies: Key issues in the implementation of the water framework directive. In proceeding of the 13th Annual EAERE Cinference, Budapest.

23. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. (1988) GAMS: A User's Guide. The Scientific Press, Redwood City, CA.
24. Buysse, J. (2006) Farm-level mathematical programming tools for agricultural policy support. Ph.D. Dissertation, Univ. of Ghent, Belgium.
25. Caplo, S. and Paris, Q. (2008) Assessing the effectiveness of voluntary solid waste reduction policies: Methodology and a Flemish case study, Waste Management, 28(8): 1449-1460.
26. Cochran William. G. (1977) Sampling Techniques, Third Edition.
27. Cortignani, R. and Severini, S. (2009) Modeling Farm-Level Adoption of Deficit Irrigation using Positive Mathematical Programming. Agricultural Water Management 96: 1785-1791.
28. Cortignani, R. Severini, S. (2008) Introducing deficit irrigation crop techniques derived by crop growth models into a Positive Mathematical Programming model. Paper prepared for presentation at the XIIth EAAE Congress 'People, Food and Environments: Global Trends and European Strategies'. Ghent: 98-120.
29. Cypris, C. (2000) Positive Mathematische Programmierung (PMP) im Agrarsektormodell RAUMIS. PhD dissertation, Department of Economic and Agricultural Policy, University of Bonn. Bonn, Germany.
30. Doorenbos, J., Kassam, A.H., (1979) Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Papers 33. FAO, Rome, Italy.
31. English, M. (1990) Deficit irrigation. I. Analytical framework, J. Irrig. Drain E. ASCE, 116 , pp. 399-412.
32. English, M., & Raja, S.N. (1996) Perspectives on deficit irrigation, Agr. Water Manage., 32, pp. 1-14.
33. English, M.J., Musick, J.T., and Murty, V.V.N. (1990) Deficit irrigation. In: Management of farm irrigation systems (Hoffman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H., Editors). ASAE Monograph no. 9. Amer. Soc. Agri. Engin. Pub. 1020p.
34. Göksoy, A.T., A.O. Demir, Z.M. Turan and N. Dagustu. (2004) Responses of sunflower (Helianthus annuus L.) to full and limited irrigation at different growth stages. Field Crops Res. 87: 167–178.
35. Graindorge, C., Henry de Frahan, B., & Howitt, R. (2001) Analysing the effects of agenda 2000 using a CES calibrated model of Belgain Agriculture, Agricultural Sector Modeling and Policy Information Systems, Vauk Verlag, Kiel, pp 177-186.
36. Helming. J. F. M., Peeters, l., & Veedendaal. J. J. (2001) Assessing the consequence of environmental policy scenarios in Flemish agricultural. EAAE Seminar on Agricultural Sector Modeling, Bonn, 29-31 March, pp 24.
37. Hellegers P. (2002) Treating Water in Irrigated Agricultureas an Economic Good. Presented on the conference ofIrrigation Water Policies, June, Agadir, Morocco.
38. Hexem, R.W,. & Heady, E.O. (1978) Water Production Functions for Irrigated Agriculture, Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.

39. Horner, G., Corman, J., Howitt, R. E., Carter, C. A. and MacGregor, R. (1992). The Canadian Regional Agriculture Model, Structure, Operation and Development. Technical Report 1/92, Ottawa, Ontario, Canada: Agriculture and Agri-Food Canada.
40. House, R, M. (1987) USMP regional agricultural ,odel. Washington DC: USDA. Nation Economics Devition Report 1/92, Ottawa, pp 22.
41. Howitt, R.E . (1995) A Calibration Method for Agricultural Economic Production Model; Journal of Agricultural Economic, 46: 147-159.
42. Howitt, R.E. (1995) Positive Mathematical Programming; American Journal of Agricultural Economics 77: 329-342.
43. Howitt, R. E. (2005) Agricultural and Environmental Policy Models: Calibration, Estimation, and Optimization. Department of Agricultural and Resource Economics, University of California, Davis, USA
44. Igbadun, H, E., Ramalan, A. A., Oiganji, E. (2012) Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru, Nigeria, Agricultural Water Management Volume 109:162-169.
45. Iglesias, E., & Blanco, M. (2008) New directions in water resources management: the role of water pricing policies. Water Resources Research, 44.
46. Jia, O., Sun, L., Ali, Sh., Liu, D., Zhang, Y., Ren, X., Zhang, P & Jia, Z. (2017) Deficit irrigation and planting patterns strategies to improve maize yield and water productivity at different plant densities in semi-arid regions, Scientific Reports 7, Article number: 13881.
47. Karam, F. Lahoud, R. Masaad, R. Kabalan, R. Breidi, J. Chalita, C. Rouphael, Y. (2007) Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. Agr. Water Manage., 90 (2007), pp. 213-223
48. Kasnakoglu, H. & Bauer, S. (1988) Concept and application of an agricultural sector model for policy analysis in Turkey. Agricultural Sector Modelling, Wissenschasverlag Vauck: 21.
49. Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici M. R. and Ozguven, A. I. (2004) Yield Response of Greenhouse Grown Tomato to Partial Root Drying and Conventional Deficit Irrigation. Agric. Water Manag., **69**: 191-201.
50. Kirda, C., Topcu,S., Kaman, H., Ulger, A.C., Yazici, A., Cetin, M., Derici, M.R. (2005) Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. Fields Crop Res. 93, 132–141.
51. Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C., Nielsen, D.R. (1999) Crop Yield Response to Deficit Irrigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
52. Krause S, Bronstert A . (2007) The impact of groundwater–surface water interactions on the water balance of a mesoscale lowland river catchment in northeastern Germany. Hydrol Process 21:169–184.
53. Lalehzari, R., Boroomand Nasab, S.,Moazed, H. and Haghighi, A. (2015) Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern, Journal of Irrigation and Drainage Engineering., 10.1061/ (ASCE) IR, 1943- 4774.0000933, 05015008.

54. Medellin-Azuara, J., Harou, J. and Howitt, R. (2010) Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation, Science of the Total Environment, 408: 5639–5648.
55. Meyer, S.J., K.G. Hubbard., and D.A. Wilhite. (1993) A cropspecific drought index for corn: I. Model development and validation. Agronomy Journal, Vol. 85, pp. 388-395.
56. Mushtaq, Sh., And Moghaddasi, M. (2011) Evaluating the potentials of deficit irrigation as an adaptive response to climate change and environmental demand, Environmental Science and Policy, Australia College of Agriculture, 14(2): 1139-1150.
57. Paris, Q. and Howitt, R.E. (1998) An analysis of ill-posed production problems using Maximum Entropy. American Journal of Agricultural Economics, 80(1): 124-138.
58. Paris, Q., Montresor., F., Arfini., & Mazzocchi. M. (2000) An integrated multi-phase Model for Evaluating Agricultural Policies Through Positive Information. EAAE Seminar on Agricultural Sector Modeling, Bonn, 29-31 Marzo, pp 17.
59. Sepaskhah, A. R., Azizian, A., & A.R. Tavakoli. (2006) Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi-arid region. Agr. Water Manage., 84, pp. 113-122.
60. Sepaskhah, A.R., & D. Akbari. (2005) Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall, Biosyst. Eng., 92, pp. 97-106.
61. Taylor, H. M., Jordan, W. R., & Sinclair, T.R. (1983) Limitations to Efficient Water Use in Crop Production, American Society of Agronomy, Crop Society of America, Soil Science Society of America, USA.
62. World Energy Council (WEC). (2001) Energy Efficiency Policies and Indicators, Report by the World Energy Council, London, United Kingdom.
63. Yang, Z., Zhou, Y., Wenninger, J., Uhlenbrook, S., Wang, X., & Wan, L. (2017) Groundwater and surface water interactions and impacts of human activities in the Hailiutu catchment, northwest China. Hydrogeology Journal, Volume 25, Issue 5, pp 1341–1355.
64. Zhang, H. and Oweis, T. (1999) Water-Yield Relations and Optimal Irrigation Scheduling of Wheat in the Mediterranean Region. Agricultural Water Management, 38, 195-211.