

## بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop-GIS (مطالعه موردی: دشت دهلران، استان ایلام)

گلستان پرواز<sup>۱</sup>، محمود رستمی‌نیا<sup>۲\*</sup>، حمزه‌علی علیزاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشگاه ایلام

۲. استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۳. استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۹/۲۱)

### چکیده

بهینه‌سازی الگوی کشت یکی از مهمترین راهکارهای افزایش بهره‌وری آب و حفاظت از منابع آب محدود کشور می‌باشد. هدف از این مطالعه بهینه‌سازی الگوی کشت دشت دهلران در استان ایلام مبتنی بر تغییرات مکانی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، مقدار آب در دسترس، کیفیت آب و سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این راستا دشت دهلران به چهار ناحیه اراضی تحت پوشش شبکه‌های میمه، دوبرج، سامانه گرمسیری و اراضی تحت پوشش چاه‌ها تقسیم‌بندی شد. سپس با استفاده از اطلاعات میدانی، نرم‌افزار AquaCrop-GIS واسنجی و صحت‌سنجی شد. در نهایت توابع تولید محصولات مختلف استخراج و با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی و تابع هدف حداکثر درآمد خالص، الگوی کشت بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد AquaCrop-GIS ابزار قدرتمندی برای تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول بوده و الگوی کشت در یک دشت تحت تأثیر تغییرات مکانی این پارامترها می‌باشد. همچنین با بهینه‌سازی الگوی کشت متناسب با کمیت و کیفیت آب و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در مناطق مختلف دشت دهلران می‌توان با مصرف مقدار آب یکسان درآمد و بهره‌وری آب را بین ۳۰ تا ۱۲۰ درصد افزایش داد.

**واژه‌های کلیدی:** تابع تولید، تغییرات مکانی، سامانه گرمسیری، واسنجی.

### مقدمه

آب و خاک مهمترین عوامل فیزیکی تولید محصولات کشاورزی و تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان می‌باشند. انتخاب الگوی کشت متناسب با وضعیت منابع آب و خاک و شرایط اقلیمی اولین و مهمترین گام در دستیابی به کشاورزی پایدار و تأمین امنیت غذایی جامعه می‌باشد. برای بهینه‌سازی الگوی کشت در یک دشت یا منطقه مدل‌ها و روش‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی خطی (Kangrang and Compliew, 2010; Shreedhar et al. 2015)، برنامه‌ریزی غیرخطی (Chiu et al. 2010)، الگوریتم ژنتیک (Ghasemi et al. 2016)، منطق فازی (Mirkarimi et al. 2013) و الگوریتم سلسله مراتبی (Hassani et al. 2016) اشاره کرد. در روش‌های معمول بهینه‌سازی معمولاً بسیاری از پارامترهای متغیر مکانی مانند مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک، کیفیت آب، سطح آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته نمی‌شوند. بدیهی است که اگر تغییرات مکانی عوامل تولید دشت تحلیل و بر اساس آن الگوی کشت انتخاب شود، ضمن

جلوگیری از مشکلات ناشی از عدم تناسب اراضی، بیشترین بهره‌وری اقتصادی حاصل خواهد شد. در سال‌های اخیر بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زراعی مانند AquaCrop به جای استخراج توابع تولید سنتی گسترش چشمگیری یافته است (Tomohari et al, 2015).

مدل AquaCrop به دلیل سادگی، قابلیت استفاده برای اغلب محصولات کشاورزی و عدم نیاز به واسنجی نسبت به سایر مدل‌های مورد اشاره بیشتر توسعه یافته است (Vanuytrecht et al. 2014). اکواکراپ یک مدل فراگیر است به این معنی که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات و محصولات میوه‌ای، روغنی و غده‌ای به کار می‌رود. این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد محصولاتی مثل گندم (Abrha et al, 2013; Kumar et al. 2014; Lorite et al. 2013)، جو (Heng et al. 2009; Hsiao et al, 2009; Kim, 2012)، ذرت (Paredes et al. 2015) و سویا (Farahani et al. 2009; Voloudakis et al. 2015) پنبه مناطق مختلف با موفقیت بکار گرفته شده است. اما اغلب مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از AquaCrop در سطح مزرعه انجام شده است، در صورتی که در سطح یک دشت ممکن

\* نویسنده مسئول: m.rostaminia@ilam.ac.ir

داد که مدل آگروهیدرولوژیک AquaCrop-GIS ابزاری قوی برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به شرایط مختلف خاک، آب زیرزمینی، مدیریت کشاورزی و کیفیت آب و خاک می‌باشد. Langhorn (2015) با استفاده از مدل AquaCrop-GIS اثر حاصلخیزی و اقلیم‌های متفاوت نواحی جنوبی آلبرتا را بر عملکرد محصولات مختلف شبیه‌سازی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مدل قابلیت شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیم بر عملکرد محصولات را دارا می‌باشد.

با توجه به اینکه دشت دهلران قطب اصلی تولیدات کشاورزی به‌ویژه گندم و جو در استان ایلام می‌باشد، هدف از این تحقیق بهینه‌سازی الگوی کشت مناطق عمرانی مختلف دشت دهلران با لحاظ نمودن اثر پارامترهای متغیر مکانی مؤثر بر تناسب اراضی (الگوی کشت بهینه) با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop-GIS می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق با توجه به کیفیت متفاوت منابع آب طرح‌های مختلف و تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک مناطق مختلف دشت دهلران، ابتدا دشت به چهار ناحیه شامل اراضی پایاب رودخانه میمه، شبکه آبیاری پایاب سامانه گرمسیری، اراضی پایاب رودخانه دویرج و اراضی تحت پوشش چاه‌ها تقسیم شد. سپس با استفاده از اطلاعات میدانی، نرم‌افزار AquaCrop-GIS و اسنجی و صحت‌سنجی شده و توابع تولید محصولات عمده مناطق مختلف دشت استخراج شد. در نهایت با روش برنامه‌ریزی خطی الگوی کشت بهینه برای هر یک از این پهنه‌ها به تفکیک ارائه شد.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه دشت دهلران به وسعت ۵۴۷۵۵ هکتار واقع در شهرستان دهلران از توابع استان ایلام در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی می‌باشد. از رودخانه‌های مهم در دشت دهلران می‌توان به رودخانه میمه و دویرج اشاره نمود. متوسط بارندگی بلندمدت ۲۶۲ میلی‌متر، حداکثر بارندگی ماهانه ۵۰ میلی‌متر در دی‌ماه و حداقل بارش در فصل تابستان صفر میلی‌متر می‌باشد. متوسط حداکثر دمای ماهانه ۴۶/۶ درجه در مردادماه و متوسط حداقل ماهانه ۸/۳ در دی‌ماه می‌باشد. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن خشک و بر اساس روش آمبرژه حداقل بیابانی گرم میانه و شدید قرار دارد.

است خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کیفیت آب و حتی مدیریت مزرعه متفاوت باشد. اگر از فرم معمول AquaCrop برای بررسی تغییرات مکانی استفاده شود تعداد اجزای مدل بسیار زیاد خواهد شد. بسته‌های نرم‌افزاری جدید AquaCrop-Data و AquaCrop-GIS که اخیراً توسط FAO ارائه شده است با مرتبط نمودن پارامترهای ورودی مدل AquaCrop با ArcGIS قابلیت فراخوانی حجم زیاد اطلاعات ورودی و تحلیل‌های مکانی را فراهم آورده است (Lorite et al. 2013).

García-Vilaa and Fereres (2012) با استفاده از مدل AquaCrop توابع تولید چهار محصول زراعی را استخراج و سپس نسبت به بهینه‌سازی آب مصرفی در این محصولات اقدام نمودند. نتایج نشان داد که با تغییر الگوی کشت می‌توان ضمن دستیابی به سود اقتصادی بیشتر نسبت به صرفه‌جویی آب هم اقدام نمود. بهترین سناریو در این مطالعه استفاده از گیاهان با مصرف آب کمتر در بخشی از مزرعه جهت آزاد شدن آب برای تولید محصولات با ارزش اقتصادی بالا و مصرف آب بیشتر بود. اصول اساسی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط Steduto et al. (2009) و الگوریتم مورد استفاده در مدل و توصیف عملیات توسط Raes et al. (2009) ارائه شده است.

نتایج تحقیقات Raes et al. (2013) نشان داد که پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط تغییرات مکانی کمیت و کیفیت آب آبیاری، حاصلخیزی خاک، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک، سطح آب زیرزمینی، کیفیت آب زیرزمینی و اقلیم با استفاده از AquaCrop بدون ابزار AquaCrop-GIS و AquaCrop-Data حدود ۱۰۰۰ ساعت کار نیاز دارد، در حالی که استفاده از این دو ابزار زمان را بیش از ۹۹٪ کاهش می‌دهد. Lorite et al. (2013) با استفاده از نرم‌افزارهای AquaCrop-Data و AquaCrop-GIS اثرات تغییرات مکانی خصوصیات اقلیمی مناطق مختلف استرالیا را روی عملکرد گندم شبیه‌سازی نمودند. نتایج آنها نشان داد که AquaCrop-GIS بسته نرم‌افزاری قدرتمندی برای استفاده از مدل AquaCrop در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد.

Jiang et al (2015) اثر تغییرات مکانی مشخصات کمی و کیفی آب مصرفی بر عملکرد محصولات مختلف در چین را با استفاده از AquaCrop-GIS شبیه‌سازی نمودند. Jiang et al (2016) با استفاده از مدل AquaCrop-GIS عملکرد و بهره‌وری آب محصولات مختلف حوضه رودخانه هیه را با توجه به تغییرات مکانی نوع خاک، الگوی کشت، عمق آب زیرزمینی، وضعیت کیفی آب و خاک شبیه‌سازی نمودند. نتایج آنها نشان

یک ۷۸۲ هکتار می‌باشد که در حال حاضر تمامی این اراضی نیز قابل کشت نبوده و بخشی از اراضی بصورت نکاشت می‌باشد. در حال حاضر سد مخزنی دویرج در منطقه بر روی رودخانه دویرج در دست احداث می‌باشد. نتایج مطالعات برنامه‌ریزی منابع آب نشان می‌دهد که سد مخزنی دویرج قادر خواهد بود آب مورد نیاز ۱۰۶۸۰ هکتار از اراضی دشت دهلران را تأمین نماید.

#### سامانه گرمسیری

در شرایط موجود کل منابع آب مورد استفاده در دشت دهلران شامل ۲۰/۴۳ میلیون مترمکعب منابع آب سطحی و ۵۸/۶ میلیون مترمکعب منابع آب زیرزمینی می‌باشد. کمبود منابع آب سطحی و کیفیت نامناسب این منابع باعث شده است که بسیاری از کشاورزان از منابع آب رودخانه‌ها به دلیل کاهش عملکرد محصولات و غیراقتصادی بودن کشاورزی در این مناطق استفاده ننمایند. به منظور تسکین بخشی از مشکلات کم‌آبی دشت دهلران ۱۹۰۰ هکتار از اراضی شبکه میمه و ۲۷۰۰ هکتار از اراضی منطقه برتش دهلران تحت شبکه پایاب سامانه گرمسیری با کیفیت آب بسیار مناسب قرار خواهند گرفت (در دست ساخت). شبکه آبیاری پایاب سامانه گرمسیری در دشت دهلران قطعه چهارم طرح انتقال آب رودخانه سیروان به مناطق گرمسیری استان‌های کرمانشاه و ایلام می‌باشد. کل منابع آب تخصیصی از سامانه گرمسیری به دشت دهلران ۴۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. همچنین با احداث سد مخزنی دویرج و مهار سیلاب‌های این رودخانه ۱۰۸۰۰ هکتار از اراضی دهلران تا موسیان در دشت دهلران تحت پوشش شبکه مدرن آبیاری قرار خواهد گرفت. بنابراین وسعت کل اراضی آبی دشت دهلران در آینده به ۲۷۰۳۰ هکتار خواهد رسید که در قالب چهار ناحیه الگوی کشت بهینه مبتنی بر شرایط منطقه‌ای بهره‌برداری خواهد شد. در شکل (۱) موقعیت روستاهای موجود در چهار ناحیه در دشت دهلران ارائه شده است.

در حال حاضر مساحت اراضی آبی دشت ۱۵۷۱۰ هکتار می‌باشد. از اراضی آبی ۹۹۱۱ هکتار تحت پوشش منابع آب زیرزمینی، ۵۱۵۳ هکتار تحت پوشش رودخانه‌های میمه و دویرج و ۶۴۶ هکتار تحت پوشش تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی قرار دارد. کاهش آورد و کیفیت آب رودخانه‌ها به علت خشکسالی‌های اخیر باعث شده تا ۸۶۴۱ هکتار از اراضی دشت به صورت نکاشت (آیش) درآید. در جدول (۱) مشخصات نواحی چهارگانه آبیاری در دشت دهلران ارائه شده است.

#### شبکه آبیاری میمه

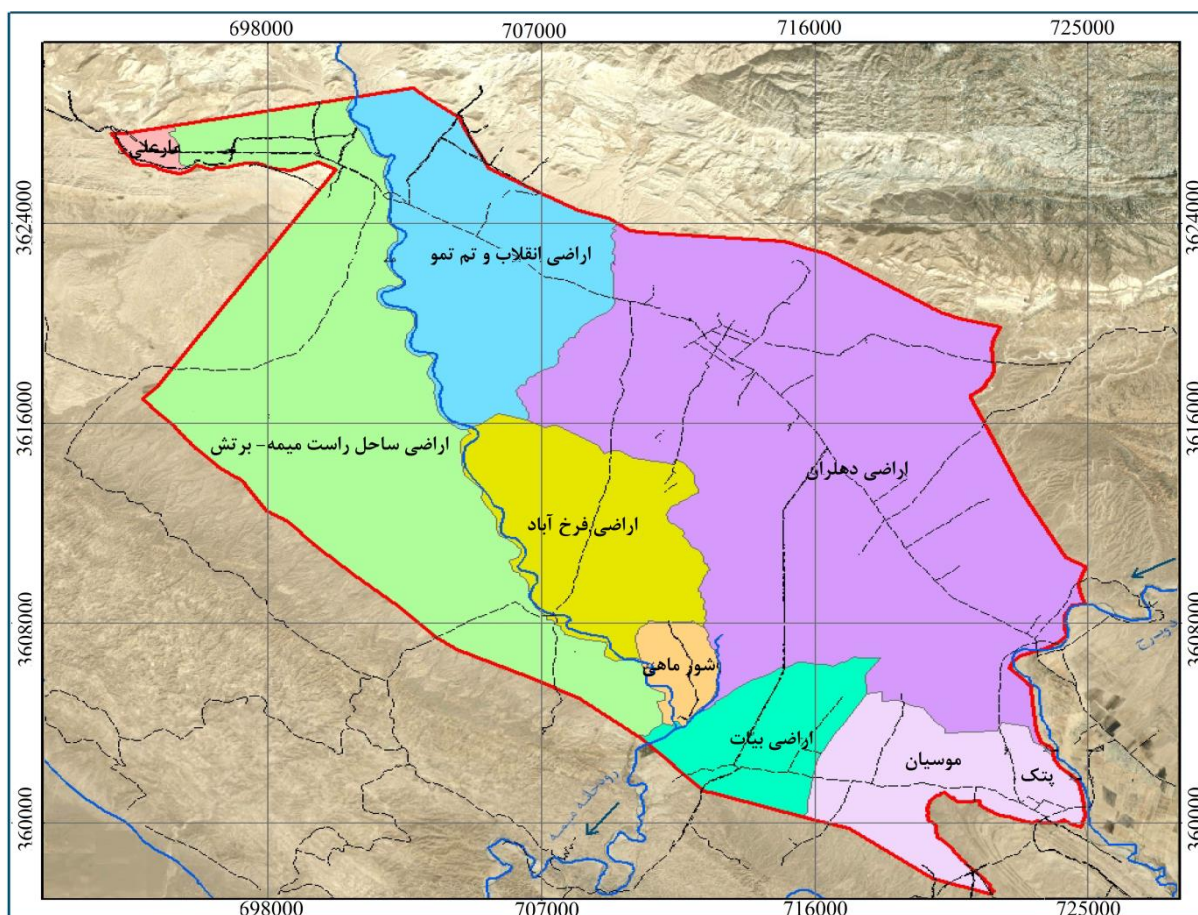
شبکه آبیاری میمه به وسعت ۳۵۸۸ هکتار تحت پوشش بند میمه قرار داشته که تنها از آب بهنگام رودخانه در فصل زمستان و بهار به منظور کشت گندم و جو استفاده می‌نماید. از بند انحرافی میمه دو کانال بتنی در ساحل چپ و راست رودخانه آگیری می‌نماید. کانال ساحل راست در حال حاضر به علت کمبود آب قابل بهره‌برداری نمی‌باشد. کانال سمت چپ نیز به منظور آبرسانی به شبکه میمه به وسعت ۳۵۸۸ هکتار احداث گردیده است که با توجه به محدودیت منابع آب، تنها بخش کوچکی از اراضی در شبکه آبیاری میمه تحت پوشش بند انحرافی میمه (حدود ۷۰۰ هکتار) خواهد بود و بخش‌هایی از اراضی بصورت نکاشت و یا تحت پوشش چاه قرار گرفته‌اند. با انتقال آب سامانه گرمسیری (در حال ساخت) ۱۹۰۰ هکتار از اراضی شبکه میمه تحت پوشش سامانه گرمسیری قرار گرفته و مابقی تحت شبکه آبیاری کم فشار میمه (در حال ساخت) قرار خواهد گرفت.

#### شبکه آبیاری دویرج

شبکه موجود دویرج تحت پوشش بند انحرافی شماره یک و دو دویرج به وسعت ۱۸۸۰ هکتار احداث گردیده است. لیکن در حال حاضر تنها بند انحرافی شماره یک در دست بهره‌برداری می‌باشد. وسعت شبکه آبیاری تحت پوشش بند انحرافی شماره

جدول ۱. مشخصات نواحی مختلف دشت دهلران

شماره ناحیه	اسم ناحیه	وسعت اراضی (هکتار)		شوری آب (dS/m)	روستاهای تحت پوشش
		شرایط پیشین	برنامه توسعه		
۱	شبکه میمه و پمپاژ میمه	۳۵۸۷	۲۵۳۰	۴/۵	فرخ‌آباد - شور ماهی
۲	سامانه گرمسیری	۰	۴۶۰۰	۰/۲۳	برتش (ساحل راست میمه) - فرخ‌آباد و تم‌مو
۳	شبکه دویرج	۱۸۸۸	۱۰۸۰۰	۳/۰	دهلران تا موسیان
۴	اراضی تحت آبیاری چاه	۹۹۰۰	۹۱۰۰	۴/۲	برتش - دهلران - بیات غرب - موسیان
	مجموع	۱۵۳۷۵	۲۷۰۳۰	-	-



شکل ۱. موقعیت روستاهای مختلف در دشت دهلران

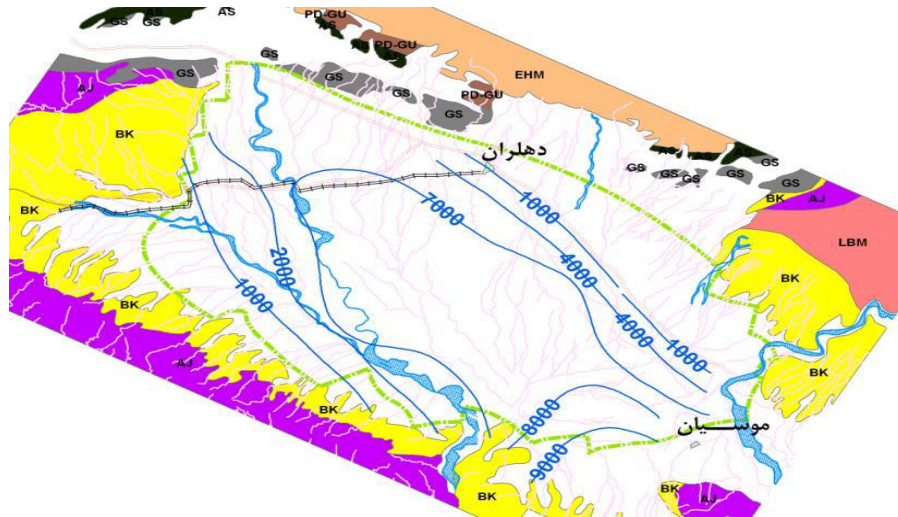
#### اطلاعات مورد نیاز

اطلاعات ورودی مدل شامل اطلاعات خاکشناسی نیمه تفصیلی دقیق منطقه، اطلاعات بلندمدت اقلیمی (ایستگاه سینوپتیک دهلران)، اطلاعات بلندمدت کمیّت و کیفیت آب رودخانه‌های میمه و دویرج (آمار ایستگاه‌های هیدرومتری و کیفیت سنجی سازمان آب منطقه‌ای ایلام)، وضعیت تخصیص طرح‌ها (آب منطقه‌ای ایلام)، تراز و کیفیت آب زیرزمینی (هیدروگراف و

کموگراف دشت دهلران)، هزینه تولید محصولات رایج منطقه و عملکرد محصولات مختلف گردآوری و اندازه‌گیری شد. در جدول (۲) شوری منابع آب طرح‌های مختلف دشت دهلران ارائه شده است. همچنین در شکل (۲) تغییرات شوری منابع آب زیرزمینی دشت ارائه شده است. حداقل، حداکثر و متوسط شوری منابع آب زیرزمینی دشت دهلران به ترتیب ۱/۶، ۶/۷ و ۳/۱ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد.

جدول ۲. وضعیت شوری منابع آب مورد استفاده در طرح‌های منطقه (dS/m)

منبع آب	ایستگاه	حداقل (زمستان)	متوسط (فروردین، اردیبهشت و فصل پاییز)	حداکثر (تابستان)
میمه	پل جاد - دهلران	۱/۸	۵/۰	۱۰/۰
دویرج	بیات	۳/۱	۴/۵	۵/۸
	پل دویرج	۱/۳	۲/۷	۵/۰
سامانه گرمسیری	ربوط	۳/۴	۳/۸	۴/۶
	سیروان - نوسود	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۳۲



شکل ۲. تغییرات شوری آب زیرزمینی دشت دهلران بر حسب میکرو موس بر سانتیمتر

مقدار آب مصرفی در شبکه آبیاری دویرج ارائه شده است. (ب) گردآوری اطلاعات پنج ساله (۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵) عملکرد محصولات مختلف چهار حلقه چاه با کیفیت‌های متفاوت واقع در مزرعه ارتش و مجهز به سنسورهای رطوبتی: در جدول (۴) میانگین عملکرد پنج ساله محصولات مختلف در مقابل کیفیت آب آبیاری و شوری خاک ارائه شده است. از اطلاعات مزرعه اتکا و اطلاعات بند ج برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای شبیه‌سازی اثر تنش شوری بر عملکرد محصول استفاده شد.

لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به عملکرد محصولات مختلف متناسب با کمیت و کیفیت آب از سه منبع زیر گردآوری شد.

**الف) مطالعات میدانی (Shekari, 2017):** در این مطالعه راندمان آبیاری، مقدار آب آبیاری و عملکرد محصولات شبکه دویرج اندازه‌گیری شده و سپس مقدار عملکرد محصول در تیمارهای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی اندازه‌گیری شد. روش آبیاری شبکه دویرج اغلب کرتی و نواری می‌باشد. در جدول (۳) عملکرد محصولات مختلف در مقابل

جدول ۳. مقدار آب آبیاری و عملکرد محصولات مختلف شبکه آبیاری دویرج

تیمار آبیاری	مقدار آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار)			عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)		
	گندم	جو	ذرت	کلزا	چغندر	گندم
11	۶۸۵۰	۳۹۳۰	۱۰۰۷۰	۴۷۳۲	۱۴۰۰۰	۴۵۰۰
12	۵۶۸۰	۳۳۳۰	۸۲۰۵	۳۹۸۳	۱۲۲۰۰	۴۳۰۰
13	۴۶۵۰	۲۳۰۰	۶۶۰۰	۳۳۱۱	۸۸۸۰	۳۶۸۰
14	۳۷۵۰	۱۸۶۰	۵۲۲۵	۲۷۱۰	۶۹۱۰	۳۲۰۰
15	۲۹۶۰	۱۴۶۰	۴۰۵۱	۲۱۷۳	۵۲۷۰	۲۷۲۰
16	۲۲۷۰	۱۳۵۵	۳۰۵۵	۱۶۹۵	۳۹۰۰	۲۵۸۰

جدول ۴. مقدار عملکرد محصولات مختلف در مقابل شوری آب آبیاری اراضی اتکا

شماره چاه	مقدار آب آبیاری (مترمکعب)			شوری آب (dS/m)	شوری خاک (dS/m)	عملکرد (کیلوگرم)		
	گندم	ذرت	کلزا			گندم	ذرت	کلزا
۱	۵۸۰۰	۹۵۰۰	۶۰۰۰	۱/۴۵	۲/۱	۴۵۰۰	۷۹۰۰	۱۴۰۰
۲	۵۶۰۰	۹۸۰۰	۵۸۰۰	۰/۷۸	۱/۳	۴۳۵۰	۸۳۰۰	۱۴۰۰
۳	۵۹۰۰	۱۰۰۰۰	۶۴۰۰	۰/۶۹	۱/۱	۵۰۰۰	۸۵۰۰	۱۵۰۰
۴	۶۰۰۰	۹۶۰۰	۶۰۰۰	۲/۲	۳/۹	۴۷۰۰	۶۹۰۰	۱۲۰۰

روستاهای دهلران و فرخ‌آباد در ساحل چپ میمه) اندازه‌گیری و عملکرد محصولات مختلف با استفاده از پرسش‌نامه گردآوری شد. اطلاعات این ۲۴ حلقه چاه در جدول (۵) ارائه شده است.

ج) جمع‌آوری اطلاعات ۲۴ حلقه چاه در مناطق مختلف دشت: در این بخش کیفیت آب آبیاری و شوری خاک اراضی تحت پوشش ۲۴ حلقه چاه در دشت دهلران (۱۰ حلقه چاه از منطقه برتش و ساحل راست رودخانه میمه و ۱۴ حلقه چاه از

جدول ۵. مقدار عملکرد محصولات مختلف در مقابل شوری آب آبیاری اراضی تحت پوشش چاه

شماره چاه	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)				شوری خاک (dS/m)	شوری آب (dS/m)	اراضی تحت پوشش (هکتار)
	چغندر	کلزا	ذرت	جو گندم			
۱	-	۱۲۰۰	-	۲۱۰۰	۸/۴	۴/۶	۵۵
۲	-	۱۱۰۰	-	۲۰۰۰	۷/۸	۴/۳	۵۰
۳	-	۱۴۰۰	-	۲۶۰۰	۵/۹	۴/۱	۵۰
۴	-	۱۳۰۰	-	۲۵۰۰	۶/۵	۴/۲	۴۸
۵	-	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۸/۱	۴/۵	۵۰
۶	-	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰	۸/۳	۳/۷	۵۵
۷	-	-	۲۰۰۰	۱۹۰۰	۷/۶	۴	۶۰
۸	-	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰	۷/۹	۴/۵	۵۰
۹	-	۹۰۰	۱۹۰۰	۱۹۵۰	۷/۴	۳/۵	۴۵
۱۰	-	۹۰۰	۰	۱۸۰۰	۹/۱	۴/۵	۵۰
۱۱	-	۱۱۰۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰	۷/۴	۳/۵	۵۰
۱۲	-	۹۰۰	۲۰۰۰	۲۳۰۰	۷/۵	۳/۷	۴۵
۱۳	-	۶۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۷/۵	۴/۰	۵۵
۱۴	-	-	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۷/۲	۳/۵	۵۰
۱۵	-	۱۲۰۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰	۷/۷	۴/۵	۶۰
۱۶	-	۲۰۰۰	۰	۲۰۰۰	۸/۶	۴/۰	۶۵
۱۷	-	۲۸۰۰	۵۳۰۰	۲۵۰۰	۴/۰	۲/۵	۳۰
۱۸	-	۲۷۰۰	۷۰۰۰	۲۶۰۰	۲/۲	۱/۰	۲۸
۱۹	-	۲۳۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰۰	۵/۴	۳/۰	۳۳
۲۰	-	-	-	۲۰۰۰	۱۲/۵	۸/۰	۳۵
۲۱	-	۲۳۰۰	۵۸۰۰	۲۵۰۰	۳/۶	۲/۰	۳۰
۲۲	۶۵۰۰۰	۲۵۰۰	۶۵۰۰	۲۳۰۰	۱/۷	۱/۲	۴۰
۲۳	-	۹۰۰	۰	۲۰۰۰	۸/۸	۶/۰	۳۲
۲۴	-	-	-	۱۵۰۰	۱۳	۸/۰	۲۵

(۲) محاسبه شد.

$$MaxZ = \sum Bf_i \times A_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه محدودیت آب در دسترس به صورت زیر اعمال شد.

$$\sum_{i=1}^n V_i \times A_i \leq NIV \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن  $V_i$ : آب مورد نیاز محصول  $i$  در هکتار،  $NIV$ :

مدل بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی الگوی کشت از برنامه‌ریزی خطی استفاده شد. تابع سود حاصل از آب آبیاری از طریق جمع‌آوری اطلاعات لازم در خصوص هزینه‌ها و درآمدهای هر محصول بطور جداگانه و به صورت رابطه (۱) محاسبه شد.

$$Bf_i = a_0 + a_i w_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

حداکثر سود خالص قابل حصول به صورت رابطه خطی

محصول ارائه شد. حداقل سطح قابل قبول برای گندم در منطقه ۳۵ درصد در نظر گرفته شد. با توجه به محدود بودن منبع آب در منطقه مخصوصاً در فصل تابستان و بهار محدودیت فصل زراعی برای سطح زیر کشت گیاهانی که در فصل تابستان در منطقه کشت می‌شود به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته شد.

$$\sum_{iw=1}^n A_{iw} \leq \sum_{iSum}^{niSum} A_{iSum} \quad (\text{رابطه ۵})$$

برای استخراج توابع تولید، هزینه‌های مراحل کاشت، داشت و برداشت مربوط به سال زراعی ۹۵-۹۶ محصولات الگوی کشت از اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان ایلام، مصاحبه با محققین مرکز تحقیقات، کارشناسان خبره معاونت تولیدات گیاهی و همچنین کشاورزان پیشرو در واحدهای عمرانی مختلف دشت دهلران استخراج و در جدول (۶) ارائه شده است.

عمق آب در دسترس برای کل ناحیه با توجه به شرایط منطقه به عنوان یک محدودیت (قید) به مدل معرفی می‌شود. محدودیت زمین هم از طریق رابطه (۴) اعمال شد.

$$\sum_{i=1}^n A_i \leq A \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن A کل اراضی قابل آبیاری برای هر ناحیه در سال می‌باشد که در این مطالعه برای نواحی یک تا چهار به ترتیب ۲۵۳۰، ۴۶۰۰، ۱۰۸۰۰ و ۹۵۰۰ هکتار می‌باشد. همچنین مساحت شبکه در دو دوره کشت زمستانه و تابستانه قابل تغییر خواهد بود. محدودیت حداکثر سطح مجاز (  $A_i = A_{max}$  ) با توجه به نوع محصول مورد نظر و ثابت بودن سطح زیر کشت در تمام محاسبات در نظر گرفته شد. محدودیت سیاست‌های کلان از طریق قید حداقل سطح تحت پوشش هر

جدول ۶. هزینه نهاده‌های تولید در هر هکتار محصولات الگوی کشت و حجم ناخالص آب مصرفی

محصول	عملکرد	قیمت (ریال)	هزینه‌های متغیر (هزار ریال)	هزینه کارگری هر آبیاری (ریال)	تعداد آبیاری	هزینه ثابت اجاره زمین (هزار ریال)
گندم	۱۳۸۴۸	۲۵۵۳۸	۵۰۰۰۰	۶	۱۰۰۰۰	
جو	۱۰۹۳۱	۱۵۸۷۴	۵۰۰۰۰	۵	۷۰۰۰	
ذرت دانه‌ای	۱۱۱۹۷	۴۳۰۸۴	۵۰۰۰۰	۱۲	۶۰۰۰	
کلزا	۲۷۸۳۰	۲۸۰۳۶	۵۰۰۰۰	۶	۱۰۰۰۰	
چغندر قند پاییزه	۲۹۷۵	۷۶۲۳۸	۵۰۰۰۰	۸	۷۰۰۰	
صیفی	۴۰۰۰	۱۱۵۵۶۵	۵۰۰۰۰	۷	۸۰۰۰	
سورگوم	۱۰۰۰	۵۹۸۷۴	۵۰۰۰۰	۱۲	۶۰۰۰	

مدل با استفاده از متغیرهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده<sup>۳</sup>، ضریب کارایی<sup>۴</sup>، شاخص سازگاری<sup>۵</sup>، حداکثر خطا<sup>۶</sup> و ضریب باقیمانده<sup>۷</sup> که به صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی گردید.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \times 100 / \bar{M} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

#### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

برای واسنجی پارامترهای مدل تحت تنش آبی از داده‌های (Shekari, 2017) استفاده شد. واسنجی مدل با استفاده از فرآیند تکرار مراحل فنولوژیکی، ضرایب رشد گیاه و پارامترهای ثابت<sup>۲</sup> تعیین شده به وسیله سایر محققان (Hsiao et al. 2009; Heng et al. 2009) انجام شد. سپس مقادیری از پارامترهای ورودی که به ازای آن کمینه ریشه دوم میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین و شاخص سازگاری مدل حاصل شد انتخاب گردید (Alizadeh et al. 2010). برای واسنجی مدل به تنش شوری، پارامترهای زیرمدل تنش شوری برای اطلاعات سال ۱۳۹۵ چهار حلقه چاه مزرعه ارتش واسنجی شد. در نهایت مدل AquaCrop بر پایه درجه روز رشد اجرا شد. صحت‌سنجی مدل با استفاده از اطلاعات ۲۴ حلقه چاه صورت گرفت. کارایی

3 - Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)  
 4 - Coefficient of efficiency (E)  
 5 - Index of agreement (d)  
 6 - Maximum Error (ME)  
 7 - Coefficient of Residual Mass (CRM)



به عنوان پیش فرض لحاظ شده و پارامترهای مدیریتی (متغیر) مورد واسنجی قرار گرفت. در شکل (۳) مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد اندازه‌گیری شده در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی و در جدول (۸) شاخص‌های ارزیابی مدل AquaCrop ارائه شده است.

ضریب کارایی (E) در هر دو حالت واسنجی و صحت‌سنجی نزدیک به یک (۰/۹۵ و ۰/۹۱) می‌باشد که بیانگر کارایی مدل می‌باشد. ضریب باقیمانده (CRM) نزدیک به صفر است که بیانگر عدم تمایل مدل به بیش یا کم برآورد است. حداکثر خطای مدل (ME) در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بیش از ۲۰ درصد می‌باشد. دلیل بالا بودن حداکثر خطا در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، عدم کنترل آفات و علف‌های هرز در برخی از مزارع تحت آزمایش می‌باشد، چرا که مدل AquaCrop در حال حاضر قادر به شبیه‌سازی اثر آفات و علف‌های هرز نیست (Lorite et al. 2013). در مجموع شاخص‌های آماری بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف می‌باشد. لازم به ذکر است همه نتایج ارائه شده با یک بار اجرای مدل AquaCrop-GIS حاصل شد در صورتی که اگر از مدل AquaCrop بدون ابزار AquaCrop-GIS استفاده می‌شد لازم بود مدل ۲۹۴ بار اجرا شود. در این تحقیق برای تحلیل تغییرات مکانی مد نظر با استفاده از نرم‌افزار Aquacrop بدون ابزار AquaGIS و AquaData به حدود ۱۴۷۰ ساعت کار نیاز بود، در حالی که استفاده از این دو ابزار زمان را به حدود ۲۰ ساعت کاهش داد. از این حیث نتایج این مطالعه با نتایج Lorite et al. (2013)، Jiang et al. (2015) و Jiang et al. (2016) مطابقت دارد.

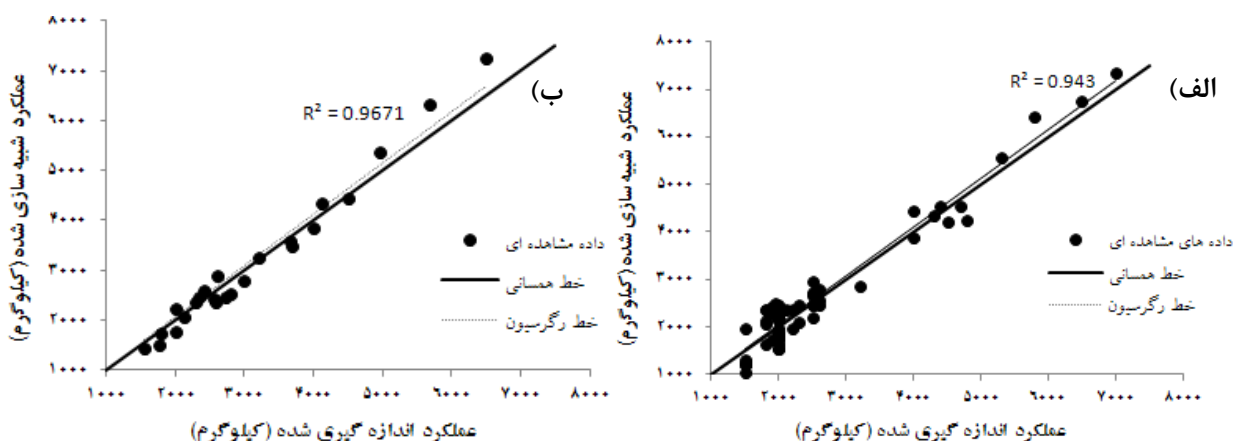
$$ME = \text{Max}|S_i - M_i| \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آنها  $S_i$  و  $M_i$  به ترتب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد مشاهدات و  $\bar{M}$  میانگین مقادیر  $M_i$  می‌باشد. RMSE نشان‌دهنده میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد. هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد. مقدار E بین  $-\infty$  تا  $+\infty$  تغییر می‌کند و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد مدل کارا تر است. d یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از  $-\infty$  تا  $+\infty$  تغییر می‌کند (Singh et al. 2008). CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است.

## نتایج و بحث

در جدول (۷) مهمترین پارامترهای ورودی مدل بعد از واسنجی ارائه شده است. پارامترهای ورودی مدل شامل دو دسته پارامترهای ثابت و پارامترهای متغیر و مدیریتی می‌باشد. مدل AquaCrop دارای ۲۰ پارامتر ثابت می‌باشد مقدار این پارامترها برای اکثر محصولات زراعی در راهنمای مدل ارائه شده و نیاز به واسنجی مجدد نمی‌باشد (Vanuytrecht et al. 2014). بنابراین برای واسنجی مدل، پارامترهای ثابت ارائه شده در راهنمای مدل



شکل ۳. مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد اندازه‌گیری شده در شرایط (الف) واسنجی و (ب) صحت‌سنجی



جدول ۷. مهمترین پارامترهای ورودی مدل بعد از واسنجی

گروه	پارامتر مورد واسنجی	واحد	مقدار واسنجی				گندم	چغندر	صیفی
			ذرت	سورگوم	کلزا	چغندر			
تراکم کشت	تراکم کشت	(بوته در هکتار)	۲۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰
	زمان سبز شدن	درجه روز رشد	۱۵۰	۱۸۰	۱۵۰	۱۸۰	۱۵۰	۱۸۰	۱۵۰
	زمان گلدهی (یا شروع تولید عملکرد)	درجه روز رشد	۱۰۵۰	۱۳۸۰	۱۰۵۰	۱۳۸۰	۱۰۵۰	۱۳۸۰	۱۰۵۰
	طول دوره گلدهی	درجه روز رشد	۱۸۰	۲۱۰	۱۸۰	۲۱۰	۱۸۰	۲۱۰	۱۸۰
	شروع پیری گیاه	درجه روز رشد	۱۲۰۰	۱۷۳۰	۱۲۰۰	۱۷۳۰	۱۲۰۰	۱۷۳۰	۱۲۰۰
بهره‌وری آب نرمال شده	بهره‌وری آب نرمال شده	g/m2	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
	شاخص برداشت	درصد	۴۰	۴۶	۴۰	۴۶	۴۰	۴۶	۴۰
آستانه پایین رشد برگ (p-lower)	آستانه پایین رشد برگ (p-lower)	-	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴
	آستانه بالای رشد برگ (p-upper)	-	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵
	فاکتور شکل رشد تاج پوشش گیاهی	-	۳/۰	۵/۰	۳/۰	۵/۰	۳/۰	۵/۰	۳/۰
	ضریب تنش روزنه‌ها (p-upper)	-	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۶۰
	فاکتور شکل کنترل استوماتی	-	۳/۰	۲/۵	۳/۰	۲/۵	۳/۰	۲/۵	۳/۰
ضریب گیاهی تعرق در حداکثر پوشش (Kcb)	ضریب گیاهی تعرق در حداکثر پوشش (Kcb)	-	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳
	اثر تاج پوشش بر کاهش تبخیر پایان رشد درصد	درصد	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
درصد کاهش KC با سن	درصد کاهش KC با سن	درصد	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
	ضریب کاهش تاج پوشش با سن (CDC)	درصد به درجه روز رشد	۰/۶	۰/۴	۰/۶	۰/۴	۰/۶	۰/۴	۰/۶
ضریب رشد تاج پوشش گیاهی (CGC)	ضریب رشد تاج پوشش گیاهی (CGC)	درصد به درجه روز رشد	۸/۰	۶/۲	۸/۰	۶/۲	۸/۰	۶/۲	۸/۰
	سطح سایه‌انداز حین جوانه‌زنی (CC0)	سانتیمترمربع در بوته	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
تنش دمایی	دمای پایه رشد (Tbase)	سانتیگراد	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	دمای فوقانی رشد (Tupper)	سانتیگراد	۱۵	۲۶	۱۵	۲۶	۱۵	۲۶	۱۵
	مینیمم درجه‌ای انجام گرده‌افشانی	سانتیگراد	۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰
	ماکزیمم درجه‌ای انجام گرده‌افشانی	سانتیگراد	۴۰	۳۵	۴۰	۳۵	۴۰	۳۵	۴۰
تنش شوری	شوری آستانه کاهش عملکرد	dS/m	۱/۷	۶/۸	۱/۷	۶/۸	۱/۷	۶/۸	۱/۷
	حداکثر شوری قابل تحمل	dS/m	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰

جدول ۸. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی

شرایط	ضریب کارایی	ضریب باقیمانده	ضریب تعیین	شاخص حداکثر خطا	ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (درصد)
واسنجی	۰/۹۵	-۰/۰۱	۰/۹۷	۲۴/۰۶	۹/۰
صحت‌سنجی	۰/۹۱	-۰/۰۳	۰/۹۴	۲۴/۶۳	۱۲/۳۶

### توابع تولید و سود

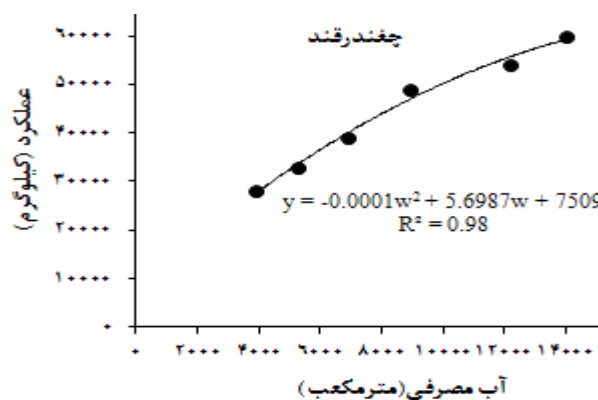
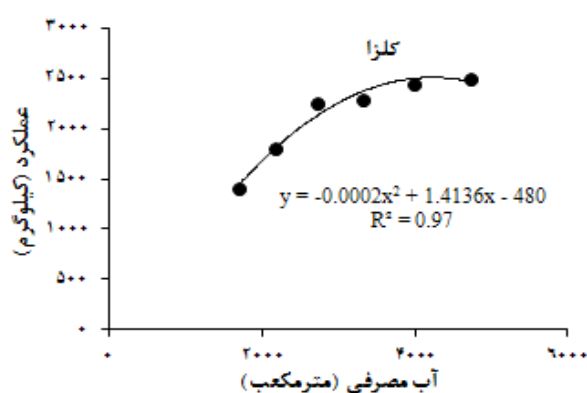
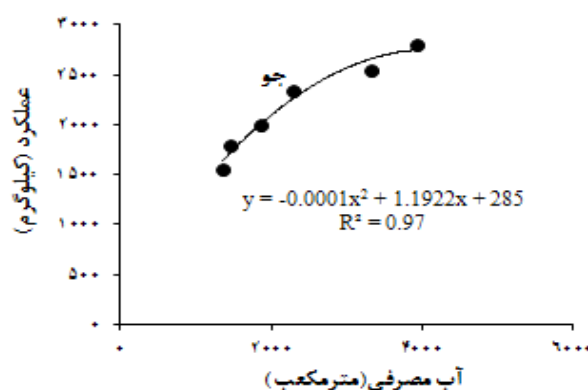
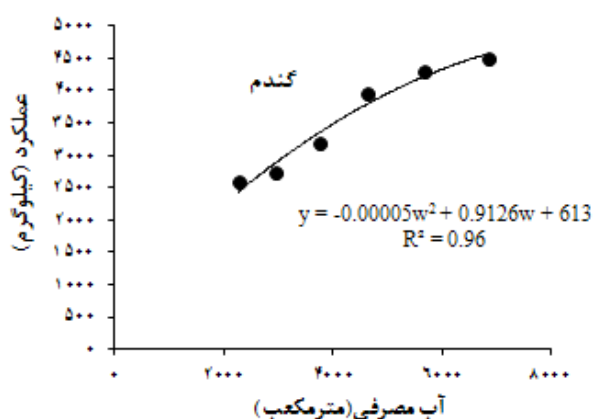
در جدول (۹) توابع خطی سود خالص محصولات مختلف به ازای مقدار آب مصرفی در نواحی مختلف دشت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع سود خالص تحت تأثیر تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول می‌باشد. کیفیت نامطلوب آب رودخانه میمه در فصل تابستان و همچنین اغلب چاه‌های دشت باعث شده که کشت ذرت دانه‌ای و صیفی‌جات در اغلب مناطق دشت غیراقتصادی باشد.

تابع تولید عملکرد بر حسب آب مصرفی برخی از محصولات شبکه آبیاری دوبرج در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تابع تولید عملکرد محصولات زراعی نسبت به آب مصرفی یک تابع درجه دوم می‌باشد. غیرخطی بودن توابع تولید به علت وجود نفوذ عمقی و رواناب سطحی می‌باشد ( Fereres and Soriano. 2007; García-Vilaa and Fereres. 2012).

جدول ۹. توابع سود خالص بر حسب آب مصرفی مناطق مختلف دشت دهلران

ناحیه	تابع سود خالص (هزار ریال در مترمکعب)
-------	--------------------------------------

صیفی	چغندر پاییزه	کلزا	ذرت تابستانه	جو	گندم	
ضرر ده	7.8w-41150	6.7w-3150	ضرر ده	3.7w-13229	5.4w-18591	شبه میمه
16.6w-83045	7.9w-40106	6.7w-2943	5.5w-37395	4.6w-11037	6.1w-16223	شبه دوبرج
21.3w-71468	9.5w-31480	7.3w-18.8	7.6w-30667	5.1w-9127	6.1w-16223	شبه گرمسیری
ضرر ده	6.2w-48820	2.6w-16240	ضرر ده	3.6w-13665	4.5w-19770	شمال برتش
ضرر ده	6.2w-48820	2.6w-16240	ضرر ده	3.6w-13665	4.5w-19770	فرخ آباد
16.6w-83045	7.9w-40106	6.7w-2943	6.4w-37737	4.8w-10598	6.1w-16223	جنوب برتش - اطراف دهلران
ضرر ده	6.2w-48820	2.6w-16240	ضرر ده	3.6w-13665	4.5w-19770	جنوب شرق دشت



شکل ۴. توابع تولید عملکرد بر حسب آب مصرفی برخی از محصولات شبکه دوبرج

درصد افزایش داد. الگوی کشت بهینه شبکه آبیاری میمه شامل ۵۹ درصد گندم، ۲۴ درصد جو و ۱۵ درصد سورگوم با تراکم کشت ۹۸ درصد می‌باشد.

در شبکه دوبرج وضعیت خاک و کیفیت آب نسبت به شبکه میمه بهتر می‌باشد. در این شبکه با توجه به محدودیت کمی و کیفی آب در فصل تابستان توسعه ۴۰ درصد کشت سورگوم امکان پذیر نمی‌باشد. با بهینه کردن الگوی کشت شبکه دوبرج می‌توان با مصرف ۸/۷ درصد آب کمتر درآمد خالص و بهره‌وری آب را به ترتیب ۷/۱۵ و ۱۹/۲ درصد افزایش داد. الگوی کشت بهینه شبکه آبیاری دوبرج شامل ۴۵ درصد گندم، ۲۵ درصد سورگوم، ۱۷ درصد کلزا و ۲۶ درصد چغندر قند پاییزه

در جدول (۱۰) الگوی کشت شرایط موجود و الگوی کشت پیشنهادی (بهینه) نواحی مختلف دشت دهلران ارائه شده است. همچنین در جدول (۱۱) سود خالص و مقدار آب مصرفی الگوی کشت پیشنهادی و الگوی کشت بهینه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوی کشت بهینه دشت بسته به کمیت و کیفیت آب، شوری خاک و مشخصات فیزیکی خاک در مناطق مختلف دشت متفاوت می‌باشد. در شبکه آبیاری میمه به علت شوری آب آبیاری (شوری حدود ۵ دسی زیمنس بر متر) کاشت سورگوم بر ذرت دانه‌ای، کلزا و صیفی جات ارجحیت دارد. با بهینه کردن الگوی کشت در شبکه میمه می‌توان با مقدار آب مصرفی یکسان درآمد خالص و بهره‌وری آب را بیش از ۵۰

صرفه نمی‌باشد. همچنین در این نواحی چغندر پاییزه به علت درآمد اقتصادی بالاتر، مصرف آب کمتر بر سورگوم ارجحیت دارد. با بهینه‌سازی الگوی کشت در نواحی یک، دو و سه می‌توان با مصرف آب یکسان سود خالص و بهره‌وری آب را بیش از ۱۰۰ درصد افزایش دهد. مهمترین دلیل این امر ضرردهی کشت ذرت در این نواحی و جایگزینی آن با محصول اقتصادی چغندر می‌باشد. الگوی کشت بهینه نواحی یک و دو تحت پوشش چاه‌ها شامل ۶۱ درصد گندم و ۲۳ درصد چغندر پاییزه با تراکم کشت ۸۴ درصد می‌باشد. در ناحیه سه به علت وضعیت کیفی آب زیرزمینی، اکثر محصولات زراعی دارای سوددهی می‌باشند. در این نواحی ذرت به علت مصرف آب کمتر و درآمد بیشتر بر سورگوم ارجحیت دارد. با بهینه‌سازی الگوی کشت در ناحیه سه می‌توان با مصرف آب یکسان درآمد خالص و بهره‌وری آب را به ترتیب ۲۹/۹ و ۳۰/۴ درصد افزایش داد. الگوی کشت بهینه ناحیه سه تحت پوشش چاه‌ها شامل ۴۱ درصد گندم، ۱۲ درصد ذرت، ۲۷ درصد کلزا، ۱۳ درصد چغندر و ۶ درصد صیفی با تراکم کشت ۹۹ درصد می‌باشد.

با تراکم کشت ۱۱۳ درصد می‌باشد. در شبکه آبیاری پایاب سامانه گرمسیری به علت کیفیت مناسب آب، کاشت ذرت دانه‌ای بر سورگوم ارجحیت دارد. به علت درآمد اقتصادی بالای چغندر قند و نزدیک بودن کارخانه قند به دشت می‌توان با توجه به مقدار آب در دسترس سطح چغندر قند را تا حدود ۱۴ درصد افزایش داد. با بهینه‌سازی الگوی کشت در شبکه آبیاری پایاب سامانه گرمسیری می‌توان با مصرف آب یکسان درآمد خالص و بهره‌وری آب را به ترتیب ۳۰/۶ و ۳۱/۳ درصد افزایش داد. الگوی کشت بهینه شبکه آبیاری پایاب سامانه گرمسیری شامل ۴۰ درصد گندم، ۱۸ درصد ذرت، ۳۳ درصد کلزا، ۱۴ درصد چغندر قند پاییزه و ۵ درصد صیفی با تراکم کشت ۱۱۰ درصد می‌باشد. در مورد اراضی تحت پوشش چاه‌ها اراضی را می‌توان به دو گروه اراضی با شوری آب زیرزمینی متوسط (شوری ۱ تا ۲ دسی زیمنس بر متر) و شوری زیاد (شوری ۳/۵ تا ۸ دسی زیمنس بر متر) تقسیم‌بندی کرد. نواحی یک، دو و چهار دارای شوری زیاد و اراضی ناحیه سه دارای شوری متوسط می‌باشد. در اراضی نواحی یک، دو و چهار کشت ذرت، کلزا و صیفی جات به

جدول ۱۰. الگوی کشت شرایط موجود و الگوی کشت بهینه مناطق مختلف دشت دهلران

ناحیه	الگوی کشت شرایط موجود چاه‌ها و مصوب شبکه‌ها (درصد)			سطوح بهینه پیشنهادی (درصد)			تراکم	صیفی (سایر)	چغندر پاییزه	ذرت (سورگوم)	گندم	جو	کلزا
	گندم	جو	ذرت (سورگوم)	کلزا	چغندر پاییزه	صیفی (سایر)							
شبکه میمه	۴۵	۴۴	۰	۰	۰	۵۹	۱۰۰	۰	۰	(۱۵)	۲۴	۰	۰
شبه دوبرج	۴۰	۱۰	(۴۰)	۶	۲۲	۴۵	۱۱۸	۰	۰	(۲۵)	۰	۰	۱۷
گرمسیری	۵۰	۰	۲۲	۲۲	۰	۴۰	۱۱۵	(۱۶)	۰	۱۸	۰	۰	۳۳
ناحیه ۱	۶۷	۱	۱۸	۵	۰	۶۱	۹۸	(۷)	۰	۰	۰	۰	۰
ناحیه ۲	۶۷	۱	۱۸	۵	۰	۶۱	۹۸	(۷)	۰	۰	۰	۰	۰
ناحیه ۳	۶۵	۱	۲۰	۵	۰/۵	۴۱	۱۰۳	۵	۰/۵	۱۲	۰	۰	۲۷
ناحیه ۴	۷۲	۱	۱۸	۵	۰	۶۲	۹۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۱. مقایسه سود خالص، آب مصرفی و بهره‌وری آب الگوی کشت وضع موجود و شرایط بهینه

ناحیه	سود خالص هر هکتار (هزار ریال)		آب مصرفی در هکتار (مترمکعب)		بهره‌وری آب (هزار ریال در مترمکعب)	
	شرایط موجود	الگوی بهینه	درصد	شرایط موجود	الگوی بهینه	درصد
شبکه میمه	۱۰،۸۶۸	۱۶،۳۷۳	۵۰/۶	۷۵۵۰	۷۴۸۰	-۰/۹
شبه دوبرج	۳۰،۰۶۳	۳۲،۲۱۰	۷/۱۵	۱۱۵۰۹	۱۰۶۱۵	-۸/۷
گرمسیری	۲۷۰،۳۳	۳۵،۲۹۸	۳۰/۶	۸۴۰۰	۸۴۵۰	۰/۶
ناحیه ۱	۵،۶۸۴	۱۱،۶۸۴	۱۰۵/۶	۷۳۲۹	۷۳۰۷	۰
ناحیه ۲	۵،۶۸۴	۱۱،۶۸۴	۱۰۵/۶	۷۳۲۹	۷۳۰۷	۰
ناحیه ۳	۱۷،۴۶۵	۲۲،۶۸۵	۲۹/۹	۷۵۳۰	۷۶۱۰	۱/۰
ناحیه ۴	۵۰،۴۲	۱۱،۳۱۰	۱۲۴/۳	۷۱۰۴	۷۰۹۴	۰

## نتیجه‌گیری

انتخاب الگوی کشت مناسب تحت تأثیر عوامل متغیر مکانی مختلفی از جمله کمیت و کیفیت آب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارد. دخالت دادن پارامترهای متغیر مکانی در انتخاب الگوی کشت امری بسیار پیچیده، زمان‌بر و در عین حال ابزار بسیار ارزشمندی در برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد. در این مطالعه با ترکیب مدل شبیه‌سازی قدرتمند AquaCrop-GIS با یک مدل ریاضی بهینه‌سازی، امکان دخالت پارامترهای متغیر مکانی در انتخاب الگوی کشت بهینه فراهم شده است. ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی با مدل‌های بهینه‌سازی می‌تواند ابزار بسیار مناسبی برای تصمیم‌گیری در مورد الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری فراهم آورد. در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی AquaCrop برای استخراج توابع تولید غیرخطی عملکرد در مقابل آب مصرفی به عنوان وردی مدل بهینه‌سازی استفاده شد. جهت سهولت در استخراج توابع تولید هفت محصول عمده و استراتژیک نواحی مختلف دشت از ابزار قدرتمند AquaCrop-GIS استفاده شد. AquaCrop-GIS ضمن حفظ تمامی قابلیت‌های AquaCrop امکان فراخوانی حجم

وسعی از اطلاعات را در قالب یک فایل ورودی به صورت Excel فراهم آورده و از این طریق تعداد اجراهای مدل و زمان شبیه‌سازی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان داد AquaCrop-GIS ابزار قدرتمندی برای تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول می‌باشد. به طوریکه در این مطالعه استفاده از ابزار AquaCrop-GIS برای بررسی اثر تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصولات دشت دهلران، باعث کاهش زمان اجرای مدل AquaCrop از ۱۴۷۰ ساعت به حدود ۲۰ ساعت شد. همچنین نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی الگوی کشت متناسب با کمیت و کیفیت آب و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در مناطق مختلف دشت دهلران می‌توان با مصرف آب یکسان درآمد و بهره‌وری آب را بین ۳۰ تا ۱۲۴ درصد افزایش داد. در مناطق با کیفیت آب نامناسب و خاک شور نقش مدیریت الگوی کشت در افزایش عملکرد و بهره‌وری آب بیشتر است. به طوری که در اراضی شور جنوب شرق دهلران که با آب چاه آبیاری می‌شوند می‌توان با همان مصرف آب، سود خالص و بهره‌وری آب را بیش از ۱۲۰ درصد افزایش داد.

## REFERENCES

- Abrha, B., Delbecque Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum Vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Expl. Agric.* 48 (2), 252–271.
- Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani Eetedali, H., and Janbaz, H.R. (2010). Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iran J. Irrig Drain* 2, 273–283. (In Persian with English abstract).
- Chiu, Y. C., Nishikawa, T., and Yeh, W. W. G. (2010). Optimal pump and recharge management model for nitrate removal in the Warren Groundwater basin, California. *J Water Res. Pl*, 136(3), 299–308.
- Farahani H.J., Izzì G., and Oweis T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of the Aquacrop model for full and deficit irrigated Cotton. *Agron. Agronomy journal*, 101(3), 469–476.
- Fereres, E., Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58, 147–159.
- García-Vilaa, M., and Fereres, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Europ. J. Agronomy* 36, 21–31.
- Ghasemi, M.M., Karamouz, M. and Shui, L.T. (2016). Farm-based cropping pattern optimization and conjunctive use planning using piece-wise genetic algorithm (PWGA): a case study. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 1–12.
- Hassani S, Ramroodi M, Naghashzadeh M. (2016). Designing cropping pattern by using analytical hierarchy process to allow for optimal exploitation of water. *Electronic Journal of Biology*. 12, 43–47.
- Heng, L. K., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *American Society of Agronomy*, 101, 488–498. 30.
- Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E. (2009). AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water, III: Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448–459.
- Jiang, L., Ting, Z., Xiaomin, Maoa., Adebayo, A. (2016). Modeling crop water consumption and water productivity in the middle reaches of Heihe River Basin. *Computers and Electronics in Agriculture*. 123, 242–255.
- Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q.Z., Huo, Z.L., Huang, G.H. (2015). Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River Basin using a distributed agro-hydrological model. *Agr. Water Manage.* 147, 67–81.
- Kangrang, A., & Compliew, S. (2010). An application of linear programming model for planning dry-

- seasonal irrigation system. *Trends in Applied Sciences Research*, 5(1), 64-70.
- Kim, D., Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agr. Water Manage.* 149, 143–155.
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K., and Parihar, S. S. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage*, 63, 474–487.
- Langhorn, C.(2015). Simulation of climate change impacts on selected crop yields in southern Alberta (Doctoral dissertation, Lethbridge, Alta: University of Lethbridge, Dept. of Geography).
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M., Fereres, E. (2013). AquaData and AquaGIS: two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Comput. Electron. Agr.* 96 (96), 227–237.
- Mirkarimi, S. H., Joolaie, R., Eshraghi, F., & Abadi, F. S. B. (2013). Application of fuzzy goal programming in cropping pattern management of selected crops in Mazandaran province: Case study of Amol township. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(15), 1062-1067.
- Paredes, P., Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Xin, Y., Zhang, B., Pereira, L.S. (2015). Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agr. Water Manage.* 152, 57–71.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E.(2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description. *Agron. J.* 101, 438-447
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. (2013). Reference Manual: AquaCrop Plug -in Program Version (4.0). FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Shekari, H. (2017). Optimization of cropping pattern in fields with arid and hot conditions for different crops in Dehloran area. PhD thesis.
- Shreedhar, R., Hiremath, CG., Shetty, GG. (2015). Optimization of Cropping pattern using Linear Programming Model for Markandeya Command Area. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 6(9),1311-1326.
- Singh, A.K., R. Tripathy, and U.K. Chopra. 2008. Evaluation of CERESWheat and CropSyst models for water—Nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural water management*. 95:776–786.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response water: I concepts and underlying principles. *Agron. J.*101 (3), 426–437.
- Tomohari, H., Okamoto, K., Yoshihiro, M., Nohara, D. 2015. An optimization scheme of cropping pattern under the variation of water and climate condition. *Proceeding of the 36th IAHR World Congress*. 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Model. Softw.* 62, 351–360.
- Voloudakis, D., Karamanos, A., Economou, G., Kalivas, D., Vahamidis, P., Kotoulas, V., Kapsomenakis, J., Zerefos, C. (2015). Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis. *Agr. Water Manage.* 147, 116–128.