Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems

مجله علمی سامانه های سطوح آبگیر باران

شاپا الکترونیکی: ۱۵۳۱-۲۷۸۲ شاپا چاپی: ۵۹۷۰-۲۴۲۳



# تعیین بهترین برنامه آبیاری با هدف حداکثر بهره‌وری در شبکه‌های آبیاری و زهکشی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)

**فرهاد میرزایی[1*]، مریم عزیزآبادی[2]**

۱. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴

صفحات: ۷۶-۶۱

**نوع مقاله: علمی- ترویجی**

## چکیده

در این مطالعه مدلی تدوین شد تا برنامه آبیاری بهینه را به‌گونه‌ای برای دشت قزوین تعیین کند که بهره‌وری اقتصادی با حجم آب در دسترس و سطح زیر کشت معین، حداکثر شود. برای تعیین عملکرد محصولات در برنامه‌های مختلف آبیاری، از مدل رشد گیاهی AquaCrop استفاده شد. مدل رشد گیاهی به محیط برنامه‌نویسی متلب متصل شد. برای تعیین برنامه آبیاری بهینه از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان استفاده شد. محصولات، حجم آب‌های مختلف، عمق آب آبیاری و دور آبیاری به‌عنوان گزینه‌های تصمیم لحاظ شدند. نهایتاً پس از تعیین بهترین پارامترهای ACO، بهترین برنامه آبیاری با در نظر گرفتن پنج سناریوی مختلف از نظر عمق و دور آبیاری و اولویت کشت محصولات تعیین شد. برای این‌که برنامه آبیاری قابل‌تعمیم در شرایط کم‌آبی نیز باشد، کم‌آبیاری از ۵ درصد تا ۳۵ درصد در مراحل مختلف رشد در نظر گرفته شد. اگر برای کلیه محصولات دور و عمق آب یکسانی (سناریوی دور آبیاری ثابت و عمق آبیاری ثابت) با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصاد مد نظر باشد، بهترین برنامه آبیاری دور ۹ روز با عمق ۸۶ میلی‌متر است و اگر هدف حداکثر بهره‌وری آب باشد بهترین برنامه آبیاری دور ۸ روز با عمق ۷۸ میلی‌متر است. در مجموع بین همه سناریوها بهترین برنامه آبیاری با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی، مربوط به سناریوی دوم با دور آبیاری متغیر ۷ و ۸ روزه بود و عمق آب بهینه برای محصولات پاییزه ۴۰ و ۵۲ میلی‌متر و برای محصولات بهاره ۸۴ میلی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین، اولویت کشت به‌ترتیب گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، ذرت علوفه، لوبیا، گندم، جو، کلزا، ذرت دانه‌ای و چغندرقند تعیین شد. در صورت کاهش حجم آب در دسترس، بهترین برنامه کم‌آبیاری برای محصولات به‌گونه‌ای که حداکثر بهره‌وری اقتصادی ایجاد شود، تعیین شد.

کلمات کلیدی: برنامه آبیاری، بهره‌وری، کم‌آبیاری، شبکه آبیاری قزوین.

## مقدمه

برنامه‌ریزی آبیاری یک عملیات مدیریتی برای تعیین زمان آبیاری و میزان آب استفاده شده است. بدین‌معنی که هدف برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین مقدار دقیق آب مورد استفاده در مزرعه و زمان‌بندی منظم کاربرد آن است. برنامه‌ریزی به روش‌های مختلفی قابل انجام است که در هر روش نیز از ابزارهای خاصی استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی آبیاری شامل روش‌های زیر است:

۱. آبیاری بر اساس زمان آبیاری مزارع مجاور. اگر در مزارع مجاور و مشابه، برنامه‌ریزی آبیاری به‌صورت موفق انجام شود می‌توان هم‌زمان با آن مزارع آبیاری را آغاز و سپس به پایان رسانید.

[1]Email: Fmirzaei@ut.ac.ir نویسنده مسئول: فرهاد میرزایی



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

۲. اندازه‌گیری شاخص‌های نشان‌دهنده تنش گیاه. به این صورت که وقتی شاخص ابتدای حد تنش گیاه را نشان داد آبیاری آغاز و پس از مدت آبیاری آن را قطع کرد.

۳. اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش‌های مختلف، با پایش رطوبت خاک می‌توان به‌محض رسیدن رطوبت خاک به یک حد بحرانی، آبیاری را شروع کرد یا به اتمام رساند.

۴. بر اساس داده‌های تبخیرسنجی

در این روش بر اساس میزان تبخیر و تعرق گیاه، آبیاری انجام می‌شود. تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و نیز یکی از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود کارایی آب مصرفی در اراضی فاریاب است (Li et al., 2003). در این پژوهش نیز برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس برآورد نیاز آبی است.

۵. ترکیبی از روش‌های فوق

به‌طورکلی برنامه‌ریزی آبیاری به معنی آبیاری به‌اندازه و به‌موقع است. یعنی به‌گونه‌ای عمل شود که اولاً زودتر از تاریخی که گیاه نیاز به آب دارد، آبیاری شروع نشود و ثانیاً مقدار آب آبیاری به اندازه‌ای باشد که بتواند در خاک ذخیره‌شده و به‌صورت رواناب یا نفوذ عمقی از دسترس ریشه خارج نشود. برنامه‌ریزی آبیاری بهترین زمان و مقدار آب آبیاری را نشان می‌دهد که بیش‌ترین و بهترین محصول با کم‌ترین هزینه تولید شود (شاهرخ‌نیا و همکاران، ۱۳۹۴).

با توجه به محدودیت منابع آب کشور، تخصیص آب بایستی به محصولاتی صورت گیرد که دارای سود اقتصادی بیش‌تری باشند. البته این مسئله به معنی چشم‌پوشی از سایر اهداف اساسی و بلندمدتی هم‌چون تأمین امنیت غذایی و اشتغال نیست اما ضروری است موضوع کارایی مالی و اقتصادی آب نیز برای افزایش بهره‌وری آب مورد توجه قرار گیرد (احسانی و خالدی، ۱۳۸۲). لازم به ذکر است که توزیع یکنواخت آب در سراسر مزرعه برای دستیابی به حداکثر منافع از برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری بسیار مهم است. کاربرد صحیح آب، از بیش‌آبیاری و کم‌آبیاری جلوگیری می‌کند. بیش‌آبیاری سبب اتلاف آب، انرژی و نیروی انسانی، شستشوی مواد غذایی از ناحیه ریشه گیاه و دور شدن آن از دسترس گیاه، کمبود تهویه و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود. کم‌آبیاری نیز با وارد نمودن تنش به گیاه سبب کاهش عملکرد می‌شود. مزایای برنامه‌ریزی آبیاری عبارت‌اند از:

- عملکرد محصول و کیفیت آن و در نتیجه درامد خالص افزایش می‌یابد.
- کشاورز را قادر می‌سازد ضمن برنامه‌ریزی تناوب آبیاری در میان مزارع مختلف، تنش آبی گیاه را به حداقل رسانده و عملکرد را حداکثر کند.
- کاهش مقدار آب آبیاری از هزینه‌های آب و نیروی انسانی کاسته شده و در نتیجه آن، حداکثر استفاده از ذخیره رطوبت خاک به عمل می‌آید.
- موجب کاهش اثرات سوء محیط زیستی می‌شود.
- رواناب سطحی و نشت عمقی کاسته شده و در نتیجه هزینه کود کاهش می‌یابد.

روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی وجود دارد، برخی از این روش‌ها بر مدل‌سازی ریاضی و تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی، غیرخطی و پویا متکی است. روش‌های کلاسیک متعددی از قبیل روش ساده، روش‌های ریاضی مانند ضریب لاگرانژ و روش‌های قطعی هستند، که به‌محض رسیدن به اولین نقطه بهینه موضعی متوقف می‌شوند و توانایی خروج از این نقطه و حرکت به‌سوی نقطه بهینه بهتری را ندارند. بدین‌منظور برای رفع این مشکل محققان به روش‌های هوش مصنوعی روی آورده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم‌های تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک[1](GA)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یا باز پخت[2] (SA)، الگوریتم جستجوی ممنوعه[3]

[1] Genetic Algorithm
[2] Simulated Annealing
[3] Tabu Search



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

(TS)، الگوریتم جامعه مورچگان[1] (ACO)، الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات[2] (PSO)، الگوریتم کلونی زنبورعسل[3] (ABC)، الگوریتم جهش قورباغه[4] (SFLA) اشاره کرد. اگرچه الگوریتم‌های متعارف برای بهینه‌سازی مزیت‌هایی از قبیل ساده و کارا بودن را دارند ولی در برخورد با مسائلی با ابعاد زیاد و غیرخطی تا حدی با مشکل روبرو هستند (Singh, 2014). در دهه گذشته الگوریتم‌های فرا ابتکاری، مانند الگوریتم‌های تکاملی برای غلبه بر کاستی‌ها و حل مسائل برنامه‌ریزی آبیاری پیچیده مورد استفاده قرار گرفتند. برای مثال توسعه و ارزیابی الگوریتم ژنتیک برای مسئله برنامه‌ریزی آبیاری توسط محققان متعددی انجام گرفته است (Wardlaw and Bhaktikul, 2004).

مطالعات زیادی در خصوص برنامه‌ریزی آبیاری صورت گرفته و مدل‌های کاربردی خوبی ارائه شده است.برای نمونه، مدل ILMP با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی حل می‌شود. این مدل تضادها را بین سود خالص اقتصادی، عملکرد محصول و صرفه‌جویی در آب در سیستم‌های آبیاری متعادل می‌کند که شامل عدم قطعیت‌ها در عملکردهای هدف و محدودیت‌هایی است که مبتنی بر استفاده مشترک از آب‌های سطحی و زیرزمینی است (MoLi et al., 2018).

مدل رشد گیاهی AquaCrop یکی از مدل‌های رشد گیاهی توسعه‌یافته توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) است که به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کار پسند بودن و دقت بالا موردتوجه بسیاری از محققان و کاربران قرارگرفته و از آن به‌منظور شبیه‌سازی بسیاری از محصولات کشاورزی استفاده‌شده است (Heng et al., 2009; Todorovic et al., 2009; Raes et al., 2009).

مدل‌های AquaCrop و CERES -Maize برای برآورد عملکرد ذرت و بیلان آب‌وخاک مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت هر دو مدل در برآورد عملکرد محصول مناسب تشخیص داده شد و مؤلفان توصیه کردند که مدل در سطح مزارع بزرگ و با کارایی واقعی مورد بررسی قرار گیرد (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۳). پیش‌بینی ماده خشک و عملکرد کلزا تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود با استفاده از مدل AquaCrop مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و زی‌توده کلزا دارای دقت مناسب بوده و در تعیین راهبردهای بهینه‌سازی برای بهبود بهره‌وری آب و مصرف کود نیتروژن در کشت کلزا در استان قزوین قابل استفاده است (امیری و همکاران، ۱۳۹۷). هم‌چنین، تخصیص و توزیع بهینه آب در بخش‌های مختلف شبکه آبیاری با سه سناریوی مختلف مقدار آب، شامل شرایط نرمال، ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب در فرایند مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد علی‌رغم کاهش سود کل در سناریوهای ۲۵ و۵۰ درصد کمبود آب نسبت به شرایط نرمال، بهره‌وری آب افزایش‌یافته است (کانونی و منعم، ۱۳۹۵). بر اساس جمع‌بندی و مرور منابع در پژوهش حاضر مدلی به‌منظور تعیین برنامه آبیاری بهینه برای دشت قزوین ارائه شد تا بهره‌وری اقتصادی با حجم آب در دسترس و سطح زیر کشت معین را به حداکثر برساند. در خصوص ضرورت انجام پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. برنامه‌ریزی آبیاری اولیه تدوین شده شبکه پس از مدتی به جهت تغییر الگوی کشت، نوسان کمیت منابع آب آبیاری و سلیقه مدیران و مجریان و همین‌طور تقاضای بازار برخی محصولات و سیاست کلان کشاورزی کشور در طول زمان به‌هم‌خورده است و در اصل شبکه‌های آبیاری به‌صورت ناقص مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

۲. برنامه‌های فعلی و در حال حاضر شبکه‌ها بهینه و بهترین نیستند لذا ضرورت دارد که برنامه بهینه آبیاری با رویکرد اقتصادی تدوین شود.

۳. لزوم وجود یک برنامه آبیاری بهینه و جامع به‌گونه‌ای که بتواند دور آبیاری و عمق آب آبیاری بهینه را در شرایطی که چند گیاه در مزرعه وجود دارد، با هدف حداکثر سازی بهره‌وری اقتصادی تعیین کند، به‌خوبی احساس می‌شود. بهینه‌سازی یکی از راهکارهای بهتر کردن و کیفیت بخشیدن به پروژه‌های آبیاری است.

[1] Ant Colony Optimization
[2] Particle Swarm Optimization
[3] Artifical Bee Clony
[4] Shuffled Frog Leaping Algorithm



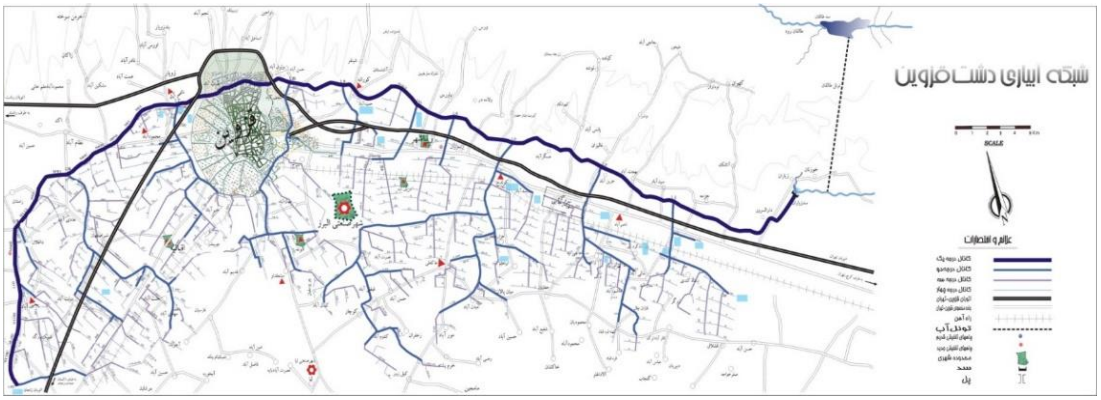
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

در حال حاضر در یک شبکه بزرگ آبیاری، انواع محصولات و با عمق آب آبیاری متنوع و دور آبیاری مختلف برای هر محصول وجود دارد. اولاً گزینه‌های مختلفی از عمق آب آبیاری و دور آب آبیاری وجود خواهد داشت. ثانیاً اجرای عمل آبیاری در صورت انتخاب همه گزینه‌ها بسیار مشکل و تقریباً غیرممکن است. ثالثاً بسیاری از آن گزینه‌ها اقتصادی نیستند و از بین آن‌ها تعداد محدودی بهتر هستند و فقط یک برنامه می‌توان برنامه بهینه آبیاری باشد که وجود ندارد و در شبکه‌های آبیاری اجرا نمی‌شود و ضرورت دارد چنین برنامه‌ای تدوین و در اختیار مدیران شبکه‌ها قرار گیرد. بنابراین این پژوهش به دنبال دستیابی به این هدف است.

## مواد و روش‌ها

### محدوده موردمطالعه

محدوده شبکه دشت قزوین در استان قزوین در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران بین ۲۰ ′ ۳۶ عرض شمالی و ۴۰ ۴۹۰ طول شرقی و ۰۰ ۳۶۰ عرض شمالی و ۳۵ ۵۰۰ طول شرقی واقع شده است. متوسط بارش بلندمدت سالانه در این منطقه ۳۷۶/۲ میلی‌متر و میزان تبخیر از آن ۱۲۸۰ میلی‌متر است. از لحاظ اقلیمی منطقه طرح دارای اقلیمی نیمه‌خشک، تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد است. الگوی رایج این شبکه شامل کشت محصولاتی هم‌چون کلزا، لوبیا، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی، چغندر، جو، گندم و گوجه‌فرنگی هستند. در حال حاضر شبکه آبیاری دشت قزوین دارای ۴۱۰۰۰ هکتار سطح زیر کشت است که از طریق کانال‌های متعددی از سد طالقان تغذیه می‌شود. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.




**شکل (۱): محدوده مورد مطالعه**

### الگوی زراعی شبکه قزوین

گزارش‌های مشاور اولیه طرح، الگوی پیشنهادی سازمان عمران قزوین با توجه به منابع آب‌وخاک و اقلیم منطقه به شرح زیر بوده است.

- گندم و جو
- گیاهان علوفه‌ای (ذرت خوشه‌ای و ذرت علوفه‌ای) و یونجه
- دانه‌های روغنی (آفتابگردان)
- محصولات صنعتی (چغندرقند، پنبه)
- سبزیجات (سیب‌زمینی، پیاز، گوجه‌فرنگی)
- حبوبات (نخود، عدس، لوبیا)
- صیفی‌جات (هندوانه، خربزه، خیار)



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

- باغات میوه ( سیب، گلابی، هلو، زردآلو، بادام، پسته)

**جدول (۱): الگوی زراعی پیشنهادی سازمان عمران قزوین برای محدوده شبکه**

| نوع محصول | درصد زیر کشت (از کل اراضی) |
|---|---|
| گندم و جو و ذرت دانه‌ای | ۴۶/۵ |
| صیفی‌جات و سبزی جات | ۱۲ |
| علوفه(یونجه و ذرت علوفه‌ای) | ۹ |
| باغات میوه | ۵ |
| محصولات متفرقه | ۲.۵ |
| آیش | ۲۵ |
| جمع | ۱۰۰ |

**مدل AquaCrop**

مدل‌های گیاهی از یک سری پارامترهای گیاهی و محیطی برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کنند و باید قبل از استفاده واسنجی و صحت‌سنجی شوند. یکی از جدیدترین مدل‌های رشد گیاه مدل AquaCrop است. این مدل دارای برنامه‌ای ساده و دقیق است که اصول اساسی آن بر مبنای شبیه‌سازی رشد گیاه استوار شده است ( Raes et al., 2009). مدل رشد گیاهی AquaCrop مورد توجه بسیاری از محققان و کاربران قرار گرفته و از آن به‌منظور شبیه‌سازی بسیاری از محصولات کشاورزی استفاده شده است (Heng et al., 2009). عملکرد سه گیاه کتان، سیب‌زمینی و گوجه تحت تنش آبی با استفاده از AquaCrop پیش‌بینی شد و نهایتاً با استفاده از مدل TOMLAB برنامه‌ریزی بهینه آبیاری ارائه شد (Linker et al., 2016). پیش از استفاده از نرم‌افزار AquaCrop، ضروری است که واسنجی و اعتبارسنجی آن برای گیاهان مختلف و با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مناسب در سطح منطقه مطالعاتی یا مناطق نزدیک به آن صورت پذیرند. به این منظور از نتایج مطالعه رمضانی و همکاران (۱۳۹۷) که از مطالعات گلکار (۱۳۷۷) برای واسنجی و اعتبارسنجی فراسنج‌های گیاهی گندم، فرهادی بانسوله (۱۳۷۷) برای جو، و میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) برای ذرت، استفاده شد. از مطالعات رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۳) برای گیاه ذرت علوفه‌ای و امیری و همکاران (۱۳۹۵) برای گیاه کلزا استفاده شد.

مشخصات بارزی که این مدل را از سایر مدل‌های گیاهی متمایز می‌سازد عبارت‌اند از:

- تمرکز آن بر آب
- استفاده از پوشش سبز کانوپی به‌جای شاخص سطح برگ
- استفاده از مقادیر نرمال شده بهره‌وری آب (WP) برای توان تبخیرکنندگی اتمسفر و غلظت $CO_2$ که توانایی تعمیم گسترده‌ای برای مکان‌ها، فصل‌ها و اقلیم مختلف شامل سناریوهای اقلیمی آینده به مدل می‌بخشد.
- تعداد پارامترهای نسبتاً کم
- داده‌های ورودی مدل که فقط نیازمند متغیرها و پارامترهای صریح و کاملاً بصری است.
- تعادل کافی میان دقت، سادگی و قدرت
- قابلیت کاربرد مدل در سامانه‌های کشاورزی گوناگون موجود در سراسر جهان
- اگر چه مدل نسبتاً ساده است، اما فرایندهای اساسی مرتبط با بهره‌وری گیاه و واکنش به نقصان آب هم از لحاظ فیزیولوژیکی و هم از جنبه آگرونومیکی در آن مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

مدل AquaCrop همانند برنامه CROPWAT بر روابط عملکرد نسبی و تبخیر و تعرق نسبی اما با برخی ویژگی‌های خاص استوار است (Doorenbos & Kassam, 1979).



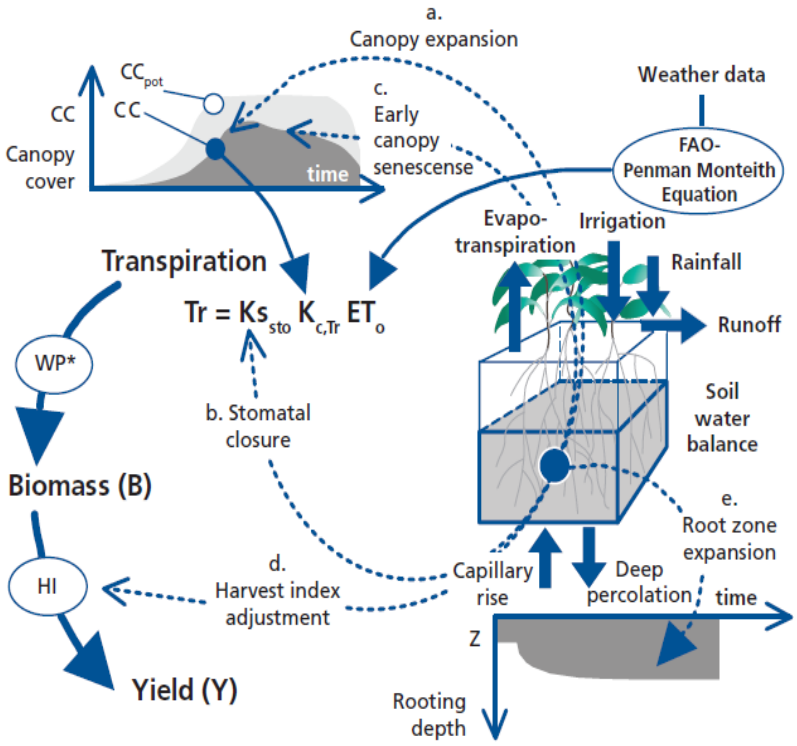
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

تابع عملکرد محصولات زراعی در دوره‌های مختلف رشد رابطه مستقیم با میزان نیاز آبی محصول داشته و در کل دوره این رابطه به‌صورت غیرخطی بوده و به شکل زیر تعریف شده است (Meyer et al., 1993; Rao et al., 1988):

$$Y_a = Y_p\left[1 - Y_i\left(1 - \frac{W_a}{W_p}\right)_i\right] \quad (۱)$$

$Y_p$: حداکثر محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی، $Y_a$: مقدار محصول تولیدی در شرایط واقعی(شرایط تنش آبی)، i: مرحله مشخص از رشد، n: تعداد مراحل رشد، $Ky_i$: ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در مرحله رشد، $W_{pi}$: حداکثر آب مورد نیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد، $W_{ai}$: مقدار آب مورد نیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید (Ghahraman & Sepaskhah, 1997).

$$W_{ai}=(1-h)W_{pi} \quad (۲)$$




**شکل(۲): نمای شماتیک تأثیر تنش‌های آبی در محاسبه عملکرد محصول**

**داده‌های ورودی به مدل AquaCrop**

مدل نیار به یک سری داده‌های اولیه خاک ، گیاه و هواشناسی و اقلیم پروژه و منطقه تحت عنوان ورودی‌های مدل به شرح زیر دارد:

الف. داده‌های هواشناسی. شامل حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، بارندگی روزانه، رطوبت نسبی هستند که از اطلاعات ایستگاه هواشناسی قزوین به‌صورت میانگین ۱۰ ساله استفاده شد.



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

ب. داده‌های خاک. مشخصات فیزیکی هریک از لایه‌های خاک وارد می‌شود که عبارت‌اند از: ضخامت لایه، درصد رطوبت اشباع، درصد رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، درصد نفوذپذیری و درصد شن خاک است.

ج. داده‌های عمق و جدول آبیاری. داده‌های مربوط به عمق آب آبیاری و تعریف نوع سیستم آبیاری جزو داده‌های ورودی به مدل رشد گیاهی است که در این مطالعه یک فایل اکسل برای ورودی دادهای عمق و نحوه آبیاری در نظر گرفته شد.

Sheet1: در این صفحه ردیف‌ها بیان‌گر تعداد برنامه‌های آبیاری است که در هر ردیف (بیان‌گر یک برنامه آبیاری) باید مشخصات برنامه آبیاری وارد شود.

نوع برنامه آبیاری: برای آبیاری بارانی عدد (۱)، کرتی (۲)، نواری (۳) و فارو (۴) گذاشته می‌شود.

درصد سطح خاک مرطوب شده توسط آبیاری، اگر برنامه آبیاری دارای جدول زمان‌بندی هست عدد (۱) و یا اگر باید تولید شود عدد (۲) گذاشته می‌شود. اگر آبیاری به‌صورت جنریت هست معیارهای زمانی برای آبیاری به صورت زیر است:

فاصله ثابت آبیاری عدد (۱)، تخلیه عمق مشخص آب آبیاری عدد (۲) و تخلیه RAW عدد (۳). مقدار آب آبیاری به‌قدری باشد که رطوبت خاک به حالت FC شود، عدد (۱) و یا عمق خاصی آبیاری شود، عدد (۲) گذاشته می‌شود.

اگر فاصله‌های آبیاری ثابت‌اند، عدد آن در این قسمت وارد می‌شود. اگر عمق ثابت برای آبیاری در نظر گرفته شده است، در این قسمت وارد می‌شود. لازم به ذکر است در صورتی‌که موارد بالا وجود ندارند می‌بایست عدد صفر وارد شود.

Sheet2: این صفحه درصورتی‌که برنامه آبیاری دارای جدول زمان بعدی (Scheuel) باشد پر می‌شود.

در این صفحه‌ستون‌های سه‌تایی بیانگر یک برنامه آبیاری است که ستون اول روز آبیاری از شروع کشت و ستون دوم عمق آب آبیاری به میلی‌متر و ستون سوم مقدار EC آب آبیاری ( ds/m) وارد می‌شود.

د. داده‌های گیاهی

داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک و نیاز اتمسفری به دو گروه پارامترهای گیاهی ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. پارامترهای گیاهی ثابت برای بیشتر گیاهان زراعی (مانند گندم، جو، ذرت، پنبه و سویا) به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارند. در مدل طراحی شد برای اطلاعات مربوط به داده‌های گیاهی نیز فایل اکسلی در نظر گرفته شد. این اکسل دارای ۷۶ ستون است که در ردیف اول توضیحات مربوط به هر ستون آورده شده است. مابقی ردیف‌ها، هر ردیف مربوط به یک محصول است.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

جدول (۲): مقادیر پارامترهای رشد و ثابت ورودی گیاهان غالب دشت قزوین به مدل AquaCrop

| | گیاه | گندم | جو | ذرت دانه‌ای | ذرت علوفه‌ای | کلزا |
|---|---|---|---|---|---|---|
| روز پس از کاشت | جوانه‌زنی | ۱۷ | ۱۷ | ۶ | ۱۳ | ۱۰ |
| | گل‌دهی | ۱۷۵ | ۱۷۵ | ۶۶ | _ | ۱۷۹ |
| | حداکثر پوشش گیاهی | ۱۹۱ | ۱۹۱ | ۵۴ | ۶۰ | ۱۹۱ |
| | شروع پیری پوشش گیاهی | ۲۰۱ | ۲۰۱ | ۱۰۷ | ۱۰۳ | ۲۱۷ |
| | رسیدگی فیزیولوژیکی | ۲۳۵ | ۲۳۵ | ۱۳۲ | ۱۲۶ | ۲۵۰ |
| | حداکثر عمق توسعه ریشه | ۹۷ | ۹۷ | ۱۰۸ | ۱۰۲ | ۸۰ |
| | طول دوره گل‌دهی (روز) | ۱۳ | ۱۳ | ۱۳ | _ | ۱۶ |
| | حداکثر عمق ریشه (سانتی‌متر) | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۳۰ | ۲۰۰ | ۷۹ |
| | پوشش گیاهی اولیه (درصد) | ۳/۳۷ | ۳/۱۳ | ۰/۴۹ | ۰/۳۶ | ۴ |
| | حداکثر پوشش گیاهی (درصد) | ۸۰ | ۸۰ | ۹۰ | ۹۰ | ۸۷ |
| | دمای پایه (درجه سانتی‌گراد) | ۰ | ۰ | ۸ | ۸ | ۵ |
| | دمای بالا (درجه سانتی‌گراد) | ۲۶ | ۱۵ | ۳۰ | ۳۰ | ۴۰ |
| | ضریب رشد گیاه | ۲/۵ | ۳/۳ | ۱۶/۳ | ۱۶/۶ | ۳/۱ |
| | ضریب کاهش رشد گیاه | ۸ | ۷/۷ | ۱۱/۷ | ۳ | ۸/۴ |
| | بهره‌وری آب نرمال شده برای تبخیر و تعرق و دی‌اکسید کربن | ۱۵ | ۱۵ | ۳۳/۷ | ۳۳/۷ | ۱۵/۳ |
| | آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا | ۰/۲ | ۰/۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۴ | ۰/۲ |
| | آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۷۲ | ۰/۷۲ | ۰/۵۵ |
| | عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه | ۵ | ۵ | ۲/۹ | ۲/۹ | ۳/۵ |
| | آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزنه گیاه - سطح آستانه بالا | ۰/۶۵ | ۰/۶۵ | ۰/۶۹ | ۰/۶۹ | ۰/۶۵ |
| | عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه | ۲/۵ | ۲/۵ | ۶ | ۶ | ۵ |
| | آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا | ۰/۷ | ۰/۷ | ۰/۶۹ | ۰/۶۹ | ۰/۶۵ |
| | عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۷ | ۲/۷ | ۳ |

**الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان**

ACO یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که از رفتار مورچه‌ها برای شناسایی کوتاه‌ترین مسیر از لانه خود به یک منبع غذایی با استفاده از مسیرهای فرومون الهام گرفته است (Dorigo et al., 1996). در ACO، فضای تصمیم مسئله بهینه‌سازی توسط یک نمودار نشان داده می‌شود، گره‌ها و لبه‌های نمودار به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم‌گیری و گزینه‌های متغیر تصمیم هستند. یک‌راه حل توسط عبور یک مورچه از گراف و انتخاب لبه در هر گره ساخته شده است. همان‌طور که مورچه‌ها در طول مسیر حرکت می‌کنند، فرومون را در بر می‌گیرند. مسیرهایی که در حال عبور هستند اغلب دارای غلظت‌های بیش‌تری از فرومون هستند و بیش‌تر در آینده ممکن است توسط مورچه‌های دیگر انتخاب شوند (Maier et al., 2003).

در طول هر تکرار از فرآیند ACO، تمام اعضای یک کلنی از گراف عبور و هر کدام یک راه‌حل را ایجاد می‌کنند. پس از هر تکرار، مسیرهایی که منجر به راه‌حل‌های کلی‌تر شده‌اند، با فرومون بیش‌تری به‌دست می‌آیند و آن‌ها را در تکرارهای بعدی انتخاب می‌کنند. به‌این‌ترتیب، راه‌حل‌های بهتر، با افزایش تعداد تکرارها، تکامل می‌یابد. در هر نقطه تصمیم، احتمال این‌که یک مورچه یک مسیر خاص را انتخاب کند (به‌عنوان مثال، مسیر A، B) توسط معادله زیر بیان می‌شود (Dorigo et al., 1996):

$$P_{AB} = \frac{[\tau_{AB}(t)]^{\alpha}[\eta_{AB}]^{\beta}}{\sum_{B=1}^{N_A}[\tau_{AB}(t)]^{\alpha}[\eta_{AB}]^{\beta}} \quad (۳)$$

که در آن $P_{AB}$: احتمال انتخاب، t: شاخص تکرار، $\tau_{AB}(t)$: مقدار فرومون بر روی مسیر (A,B) در تکرار t



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

$\eta_{AB}$: میدان دید مسیر (A,B) که یک بایاس تعریف‌شده توسط کاربر را به سمت راه‌حل‌های بهینه محلی در نقطه تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده فراهم می‌کند. $N_A$: مجموعه‌ای از همه نقاط تصمیم در نقطه تصمیم A، $\alpha$: عامل اهمیت فرومون و $\beta$: عامل اهمیت دید هستند. به‌روزرسانی فرومون در هر مسیر (به‌عنوان‌مثال مسیر A، B) پس از هر تکرار توسط معادله زیر داده می‌شود:

$$\tau AB(t+1) = \rho\tau\, AB(t) + \Delta\tau\, AB(t) \qquad (۴)$$

$\rho$: عامل استحکام فرومون که برای تبخیر فرومون از یک تکرار به بعد حساب می‌شود.

$\Delta\tau$AB(t): اضافه فرومون برای مسیر (A، B) در طول تکرار t است که می‌تواند با استفاده از طیف وسیعی از روش‌ها مانند سیستم کلون مورچه، سیستم مورچه نخبه، سیستم مورچه رتبه‌بندی شده و سیستم مینیمم حداکثر به دست آید (Zecchin et al,. 2007).

**مراحل اجرای پژوهش**

به‌طور کلی مراحل زیر برای اجرای برنامه طی شد:

الف- تعیین الگوی کشت فعلی اجرایی (که با مرحله برنامه‌ریزی اولیه فرق کرده است).

ب- تعیین تقاضای نیاز آبی فعلی شبکه (نیاز آبیاری فعلی شبکه که با مرحله برنامه‌ریزی اولیه فرق کرده است).

پ-برآورد مقدار عرضه فعلی آب آبیاری(منابع آب از سد، آب چاه‌ها و...)

ج- تدوین برنامه آبیاری برای شرایط موجود:

دور آبیاری در حال اجرا در شبکه آبیاری و کاهش عمق آب آبیاری در مراحل مختلف رشد محصولات و اعمال کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد با درصدهایی مختلف کم‌آبیاری).

دور آبیاری برای محصولات پاییزه و بهاره به تفکیک، ثابت یا متغیر و عمق آب آبیاری برای محصولات پاییزه و بهاره به تفکیک ثابت یا متغیر.

د- تعیین تابع عملکرد محصولات و ضریب کاهش عملکرد در دوره‌های مختلف رشد

کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد محصولات در بهترین برنامه آبیاری تعیین‌شده از مرحله قبل

و- داده‌های اقتصادی شامل قیمت محصول- هزینه تولید- هزینه آب

ه- تعیین محدودیت‌ها و قیدها شامل تخصیص آب سالانه - محدودیت ظرفیت سیستم- کارایی آبیاری

ی- تعریف تابع هدف از نظر بهره‌وری اقتصادی و بهره‌وری آب

پس از تعیین نیاز آبی گیاهان لازم است متغیرهای تصمیم، قیدها و نهایتاً تابع هدف در نظر گرفته شوند

سپس با انجام مراحل مذکور بهترین برنامه آبیاری در شرایط مختلف حجم آب در دسترس با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی و نیز به‌صورت جداگانه با هدف حداکثر بهره‌وری آب تعیین می‌شود، و گام‌های محاسباتی مدل تدوین‌شده به‌صورت زیر است.

در این مدل داده‌های ورودی وارد چند فایل اکسل می‌شوند:

۱. فایل داده‌های هواشناسی ۲. فایل اطلاعات گیاهی ۳. فایل اطلاعات خاک ۴. فایل سناریوهای مختلف آبیاری

۵. فایل اطلاعات قیمت گیاه، هزینه تولید هرگیاه، اطلاعات حداقل، حداکثر مساحت هر گیاه، حداکثر حجم آب در دسترس و حداکثر مساحت قابل‌کشت.

**تعریف سناریوها**

در تعیین بهترین برنامه آبیاری (عمق و دور آبیاری) با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی، ۵ دور مختلف آبیاری از قبیل دور آبیاری ۵ روزه، ۶ روزه، ۷روزه، ۸ روزه و ۹ روزه در نظر گرفته شد و عمق آب آبیاری از عمق ۲۰ میلی‌متر تا۱۳۰ میلی‌متر برای هر دور آبیاری لحاظ شد. سپس پنج سناریوی مختلف به‌صورت زیر تعریف شد:

- دور آبیاری ثابت عمق آبیاری ثابت



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

- دور و عمق آب محصولات بهاره و پاییزه متفاوت
- دور آبیاری ثابت و عمق آبیاری برای هر محصول متغیر
- عمق آب ثابت و دور آبیاری برای محصولات بهاره و پاییزه متفاوت
- دور ثابت و عمق آب متفاوت برای محصولات بهاره و پاییزه

## نتایج و بحث

پارامترهای برنامه‌ریزی و بهره‌وری که در پژوهش موردبررسی قرار گرفت به همراه علائم و واحدهای آن‌ها مطابق جدول (۳) است.

**جدول (۳): معرفی پارامترهای استفاده شده**

| | |
|---|---|
| دور آبیاری (روز) | F |
| عمق خالص آب آبیاری (میلی‌متر) | d |
| عمق خالص آب آبیاری در فصل رشد (میلی‌متر) | DI |
| عملکرد (تن در هکتار) | Y |
| بهره‌وری اقتصادی (ریال/ مترمکعب) | NBPD |
| تبخیر و تعرق در کل دوره رشد (میلی‌متر) | ET |
| سود خالص (ریال) | Z |
| بهره‌وری آب (کیلوگرم/مترمکعب) | WP |

### نتایج سناریوهای مختلف اعمال‌شده

۱. سناریو دور آبیاری ثابت عمق آبیاری ثابت

در این سناریو دور آبیاری برای کلیه محصولات در طول فصل رشد ثابت در نظر گرفته شد. نتایج پارامترهای مختلف برنامه‌ریزی و بهره‌وری در این حالت مطابق جدول (۴) است.

**جدول (۴): عمق و دور ثابت برای کلیه محصولات**

| | بر اساس حداکثر بهره‌وری | | | | بر اساس حداکثر بهره‌وری اقتصادی | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F | ۹ | *۸ | ۷ | ۶ | ۵ | *۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ |
| dn | ۴۳ | *۳۹ | ۳۵ | ۲۹ | ۲۳ | *۴۳ | ۳۹ | ۳۵ | ۳۰ | ۲۵ |
| dg | ۸۶ | ۷۸ | ۷۰ | ۵۸ | ۴۶ | ۸۶ | ۷۸ | ۷۰ | ۶۰ | ۵۰ |
| DI | ۵۱۶۰ | ۵۱۸۷ | ۵۳۹۰ | ۵۲۲۰ | ۴۹۹۱ | ۵۱۶۰ | ۵۱۸۷ | ۵۳۹۰ | ۵۴۰۰ | ۵۴۲۵ |
| NBPD | ۵/۱۳ | ۵/۱۳ | ۲/۱ | ۱/۱ | ۹/۱ | ۵/۱ | ۵/۱ | ۲/۱ | ۱/۱ | ۰/۱ |

نتایج جدول بیان‌گر این است که اولاً برنامه قادر است برای یک شبکه بزرگ آبیاری و زهکشی با انواع محصولات و نیازهای آبیاری مختلف به‌صورت یک دستورالعمل قابل‌اجرا در دست مدیر اجرایی و به دنبال آن آبیارها باشد. به‌طوری‌که به آبیار مثلاً گفته شود شما هر هفته یک‌بار و به مقدار ۷۰ میلی‌متر به این کانال درجه‌دو آب تحویل دهید. و یا به فاصله زمانی دیگر بین دو آبیاری با مقدار آب دیگر که این خودکاری بدیع و نو است. ثانیاً اگر بخواهیم برای کلیه محصولات دور و عمق آب یکسانی را با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصاد داشته باشیم، بهترین برنامه آبیاری دور ۹ روز با عمق۸۶ میلی‌متر است. اگر هدف حداکثر بهره‌وری آب باشد بهترین برنامه آبیاری دور ۸ روز با عمق ۷۸ میلی‌متر



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

است. لذا الگوی کشت منتخب برای هر سناریو بر اساس بهره‌وری اقتصادی تعیین شده است. هم‌چنین اولویت کشت محصولات با این برنامه آبیاری به‌صورت زیر است.

گوجه>سیب‌زمینی>لوبیا > ذرت علوفه > گندم> ذرت دانه‌ای >چغندرقند>جو>کلزا

ذرت علوفه>چغندرقند>ذرت دانه‌ای> جو> سیب‌زمینی>گندم> گوجه>لوبیا> کلزا

۲. سناریو دور و عمق آب محصولات بهاره و پاییزه متفاوت

در این سناریو دور و عمق آب آبیاری برای محصولات پاییزه ثابت است و برای محصولات بهاره دور تغییر کرده و به دنبال آن عمق آب آبیاری هم مطابق آن دور تغییر خواهد کرد خلاصه محاسبات این سناریو در جدول (۵) آمده است.

**جدول (۵): عمق و دور ثابت برای محصولات پاییزی**

| | بر اساس حداکثر بهره‌وری | | | | | بر اساس حداکثر بهره‌وری اقتصادی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F | ۹/۸ | ۸ | ۷/۸* | ۶/۸ | ۵/۸ | ۹/۸ | ۸ | ۷/۸* | ۶/۸ | ۵/۸ |
| dn | ۲۸ | ۲۶ | ۲۰/۲۶ | ۱۸/۲۲ | ۱۷/۲۰ | ۲۸ | ۲۶ | ۲۰/۲۶ | ۱۸/۲۲ | ۱۷/۲۰ |
| dg | ۵۶ | ۵۲ | ۴۰/۵۲ | ۳۶/۴۴ | ۳۴/۴۰ | ۵۶ | ۵۲ | ۴۰/۵۲ | ۳۶/۴۴ | ۳۴/۴۰ |
| DI | ۸۹۶ | ۹۱۰ | ۹۵۱ | ۸۶۸ | ۸۲۷ | ۸۹۶ | ۹۱۰ | ۹۵۱ | ۸۶۸ | ۸۲۷ |
| Y | ۱۲۰۶۴ | ۱۲۱۷۰ | ۱۲۳۰۲ | ۱۱۸۳۴ | ۱۱۵۳۰ | ۱۲۰۶۴ | ۱۲۱۷۰ | ۱۲۳۰۲ | ۱۱۸۳۴ | ۱۱۵۳۰ |
| NBPD | ۴/۲۷ | ۴/۲۳ | ۴/۷۲ | ۴/۲۹ | ۴/۳۸ | ۴/۲۷ | ۴/۲۳ | ۴/۷۲ | ۴/۲۹ | ۴/۳۸ |
| ET | ۱۶۱۲/۴ | ۱۶۱۷/۶ | ۱۶۵۰/۵ | ۱۶۰۰/۷ | ۱۵۷۴/۲ | ۱۶۱۲/۴ | ۱۶۱۷/۶ | ۱۶۵۰/۵ | ۱۶۰۰/۷ | ۱۵۷۴/۲ |
| Z | ۱۲۷/۲ | ۱۲۸/۳ | ۱۲۹/۴ | ۱۲۴/۸ | ۱۲۱/۴ | ۱۲۷/۲ | ۱۲۸/۳ | ۱۲۹/۴ | ۱۲۴/۸ | ۱۲۱/۴ |
| WP | ۴/۰۸ | ۴/۰۵ | ۳/۸۸ | ۴/۰۵ | ۴/۱۴ | ۴/۰۸ | ۴/۰۵ | ۳/۸۸ | ۴/۰۵ | ۴/۱۴ |

همان‌طور که در جدول(۶) نشان داده شده است محصولات پاییزه ابتدا با دور آبیاری ۷ روزه آبیاری می‌شوند و به محض شروع کشت محصولات بهاره، کلیه محصولات با دور ۸ روز آبیاری خواهند شد.

این برنامه‌ها به این صورت هستند که تا شروع اولین کشت بهاره دور آبیاری و عمق آبیاری مشخصی تعریف می‌شود و برای مابقی دوره رشد دور آبیاری و عمق آب تغییر خواهد کرد تا دور آبیاری با محصولات بهاره نیز همسو باشد. برای محصولات پاییزی تا شروع اولین کشت بهاره که لوبیا هست و نیمه دوم فروردین است. دور آبیاری ثابت و بعد از آن دور آبیاری ۸ روز در نظر گرفته شد. در این صورت بهترین برنامه آبیاری که حداکثر بهره‌وری اقتصادی را ایجاد می‌کند، برای محصولات پاییزه دور ۷ روز با عمق ۴۰ میلی‌متر و سپس دور ۸ روز با عمق ۵۲ میلی‌متر به دست آمد. که در این حال بهره‌وری اقتصادی محصولات پاییزه ۷۲/۴ و عملکرد ۱۲۳۰۲ کیلوگرم در هکتار است. در این حالت نیز اولویت کشت همچنان به‌صورت زیر است.

**جدول (۶): عمق و دور ثابت برای محصولات بهاره**

| | بر اساس حداکثر بهره‌وری | | | | | بر اساس حداکثر بهره‌وری اقتصادی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F | ۹ | ۸* | ۷ | ۶ | ۵ | ۹ | ۸* | ۷ | ۶ | ۵ |
| dn | ۴۶ | ۴۳* | ۳۹ | ۳۳ | ۲۸ | ۴۵ | ۴۲* | ۳۹ | ۳۴ | ۲۸ |
| dg | ۹۲ | ۸۶ | ۷۸ | ۶۶ | ۵۶ | ۹۰ | ۸۴ | ۷۸ | ۶۴ | ۵۶ |
| DI | ۴۰۴۸ | ۴۲۱۴ | ۴۴۰۷ | ۴۳۸۹ | ۴۵۰۸ | ۳۹۶۰ | ۴۱۱۶ | ۴۴۰۷ | ۴۵۲۲ | ۴۵۰۸ |
| Y | ۶۳۹۸۶ | ۶۶۵۳۵ | ۶۸۴۴۳ | ۶۷۲۱۸ | ۶۹۰۸۶ | ۶۲۵۵۹ | ۶۴۹۲۲ | ۶۸۴۴۳ | ۶۹۱۳۵ | ۶۹۰۸۶ |
| NBPD | ۱۰/۷۱ | ۱۰/۷۶ | ۱۰/۶۰ | ۱۰/۴۸ | ۱۰/۳۲ | ۱۰/۷۱ | ۱۰/۷۷ | ۱۰/۶۰ | ۱۰/۴۹ | ۱۰/۳۲ |
| ET | ۳۹۱۸/۵ | ۴۰۸۷/۷ | ۴۲۵۶/۵ | ۴۲۹۳/۵ | ۴۴۲۵ | ۳۸۶۹/۶ | ۴۰۳۶ | ۴۲۵۶/۵ | ۴۳۶۲/۹ | ۴۴۲۵ |
| Z | ۷۱۵/۹ | ۷۴۵/۳ | ۷۷۲/۱ | ۷۵۶/۶ | ۷۶۷/۷ | ۷۰۰/۵ | ۷۲۸/۰ | ۷۷۲/۱ | ۷۸۰/۳ | ۷۶۷/۷ |
| WP | ۹/۳۶ | ۹/۴۵ | ۹/۲۱ | ۹/۰۹ | ۹/۱۴ | ۹/۳۶ | ۹/۴۴ | ۹/۲۱ | ۹/۰۸ | ۹/۱۴ |



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۷) بهترین برنامه آبیاری برای محصولات بهاره دور ۸ روز با عمق ۸۴ میلی‌متر است. و اولویت کشت محصولات در زیر آورده شده است.

گوجه>سیب‌زمینی>لوبیا>ذرت علوفه>ذرت دانه‌ای>چغندرقند گندم>جو>کلزا

۳. سناریوهای ۳ تا ۵ برای این سناریوها هم که به شرح زیر است:

پارامترهای برنامه‌ریزی و بهره‌وری آب محاسبه شد که به جهت جلوگیری از افزایش حجم مطالب وازطرفی امکان بررسی و ارزیابی از جدول سناریوهای ۱ و ۲ از آوردن جدول‌ها و محاسبات خودداری شده و خلاصه سناریوها در جدول (۸) آورده شده است.

۳. دور آبیاری ثابت و عمق آبیاری برای هر محصول متغیر

۴. عمق آب ثابت و دور آبیاری برای محصولات بهاره و پاییزه متفاوت

۵. دور ثابت و عمق آب متفاوت برای محصولات بهاره و پاییزه

**جدول (۷): مقایسه نهایی نتایج بهترین برنامه آبیاری از سناریوهای مختلف تعریف شده (به ازای حداکثر بهره‌وری آب)**

| senario | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| DI | ۵۱۸۷ | ۵۱۶۵ | ۴۹۴۵ | ۵۰۵۷ | ۵۱۹۴ |
| Y | ۷۲۳۰۷ | ۷۸۸۳۷ | ۷۸۷۷۹ | ۷۹۰۵۲ | ۷۹۰۰۳ |
| NBPD | ۱۳.۵۰ | ۱۵.۴۸ | ۱۵.۳۷ | ۱۴.۹۴ | ۱۴.۷۸ |
| ET | ۵۵۴۲.۳ | ۵۷۳۸.۲ | ۵۶۷۱.۵ | ۵۷۲۷.۵ | ۵۷۳۵.۵ |
| Z | ۷۹۶.۹۲ | ۸۷۴.۷۱ | ۸۵۹.۰۳ | ۸۶۱.۲۸ | ۸۷۶.۴۵ |
| WP | ۱۲.۱۵ | ۱۳.۳۳ | ۱۳.۷۰ | ۱۳.۳۰ | ۱۳.۳۰ |

بهترین برنامه آبیاری از سناریو دوم> بهترین برنامه آبیاری از سناریو سوم> بهترین برنامه آبیاری از سناریو چهارم> بهترین برنامه آبیاری از سناریو پنجم> بهترین برنامه آبیاری از سناریو اول

**نوآوری پژوهش**

در هر شبکه آبیاری میزان آب تحویلی به سطح زیر کشت هر کانال درجه ۲ به بعد با توجه به برنامه‌ریزی آبیاری اولیه طبق الگوی کشت تعیین می‌شود. درصورتی‌که آب در دسترس به‌علت خشک‌سالی کم‌تر از نیاز باشد از کشاورزان خواسته می‌شود با تغییر و یا تعدیل الگوی کشت بین عرضه و تقاضا تعادل برقرار کنند. در این‌جا دو مسئله مطرح است اول این‌که طی گذشت زمان الگوی کشت طراحی اولیه رعایت نمی‌شود دوم این‌که منابع آب چه از نظر مقدار و چه از نظر محل و زمان تأمین به‌هم‌خورده است. لذا الگوی کشت جدید متناسب با مقدار منابع آب قابل‌دسترس نیست و منجر به بهره‌برداری اقتصادی شبکه آبیاری نمی‌شود. مطالعاتی صورت گرفته عمداً در سطح کرت‌های آزمایشی به ابعاد ۴*۵ مترمربع و یک محصول و یا در سطح مزرعه و باز برای یک محصول و با یک دور آبیاری و عمق آبیاری (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۳) انجام شده است. تاکنون مطالعه‌ای جامع برای یک شبکه بزرگ آبیاری و زهکشی و با چندین محصول زراعی و منابع متغیر آب قابل‌دسترس صورت نگرفته است. لذا نوآوری پژوهش حاضر ارائه بهترین برنامه‌ریزی آبیاری یعنی تعیین بهترین عمق آب آبیاری و بهترین دور آبیاری برای چندین محصول زراعی پاییزه و بهاره برای یک شبکه بزرگ آبیاری و زهکشی (قزوین) با هدف بهره‌وری اقتصادی و بهره‌وری آب می‌دهد که تاکنون چنین مطالعه‌ای در ایران صورت نگرفته است.



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

## پیشنهادها

از ورودی‌های مهم مدل و برنامه قیمت محصولات و آب و هزینه‌ها است که لازم است از یک مرجع رسمی و موثق و قابل‌اعتماد تهیه شود توصیه می‌شود که در مطالعات برای سایر شبکه‌ها آبیاری کشور و برای سال‌های آینده به این مهم توجه ویژه مبذول شود.

پیشنهاد می‌شود برای تهیه الگوی کشت آخرین الگوی کشت فعلی شبکه به اضافه نظر اجماع زارعین و مدیریت آب‌وخاک جهاد کشاورزی شبکه مورد نظر دریافت شود. اطلاع دقیق از منابع آب قابل‌دسترس و به هنگام شبکه نقش در تهیه برنامه بهینه آبیاری دارد. توصیه می‌شود که آمار دقیقی از منابع آب قابل‌دسترس از سازمان‌ها و مؤسسات مربوطه تهیه شود. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود بر اجرای برنامه تهیه شده نظارت مستمر در طول مدت بهره‌برداری صورت پذیرد. در نهایت، مواردی برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود:

۱. محاسبه میزان عملکرد محصولات دیم و تعیین بهترین زمان آبیاری تکمیلی برای محصولات دیم با هدف حداکثر عملکرد محصول.

۲. تعیین بهترین برنامه آبیاری با تنش آبی در مراحلی از رشد محصولاتی که کمتر به تنش آبی حساس هستند و استفاده از مقدار آب صرفه¬جوئی شده برای آبیاری تکمیلی محصولات دیم.

۳. بررسی و تبیین جایگاه بارندگی مؤثر(آب سبز) در تنظیم برنامه آبیاری و پیشنهاد الگوی کشت برای منطقه.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدلی تدوین شد تا برنامه آبیاری بهینه را به‌گونه‌ای برای دشت قزوین تعیین کند که بهره‌وری اقتصادی با حجم آب در دسترس و سطح زیر کشت معین، حداکثر شود. در ابتدا برای تعیین $ET_0$ مدلی بر اساس معادله پنمن مانتیس در فضای متلب نوشته شد که داده‌های مورد نیاز را از فایل اکسل دریافت و $ET_0$ را به‌صورت روزانه محاسبه می‌کند. برای تعیین عملکرد محصولات در برنامه‌های مختلف آبیاری، از مدل رشد گیاهی AquaCrop استفاده شد. مدل رشد گیاهی به محیط برنامه‌نویسی متلب متصل شد.

کلیه داده‌های مورد نیاز چند فایل اکسل قرار داده شدند و مدل داده‌های مورد نیاز را با توجه به نوع محصول و برنامه آبیاری دریافت و پس از ساخت فایل‌های ورودی مدل رشد گیاهی، مدل را اجرا و خروجی‌های مورد نیاز را ذخیره می‌کند و سپس بهره‌وری اقتصادی هر محصول تحت برنامه‌های مختلف آبیاری محاسبه می‌شود.برنامه‌های مختلف آبیاری بر اساس عمق‌های مختلف و دوره‌های مختلف آبیاری تعریف شد. چند سناریو مختلف در نظر گرفته شد تا بتوان بهترین دور و عمق آب آبیاری را با توجه به تفکیک و یا ادغام محصولات پاییزه و بهاره و یا تفکیک تک‌تک محصولات از نظر عمق آب آبیاری را به‌دست آورد. پس از تعیین بهترین برنامه آبیاری با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی، اولویت کشت محصولات نیز تعیین شد. محاسبات مجدداً برای زمانی که حجم آب در دسترس ۱۰ درصد و یا ۲۰ درصد کاهش یابد صورت گرفت و برای حفظ الگوی کشت موجود در صورت کاهش حجم آب، نیاز به کم‌آبیاری ضروری به نظر می‌رسد.

کلیه سناریوهای مختلف آبیاری از نظر تنش آبی در کل دوره رشد و یا تنها در یک دوره رشد و در دو دوره رشد با تنش‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درصد محاسبه شد و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان بهترین تنش آبی برای هر محصول با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی تعیین و درصورتی‌که حجم آب در دسترس بیش از ۱۵ درصد کاهش داشته باشد به برنامه اجازه کاهش سطح زیر کشت محصولات از حداقل تعیین شده نیز داده شد.

اگر بخواهیم برای کلیه محصولات دور و عمق آب یکسانی(سناریو دور آبیاری ثابت و عمق آبیاری ثابت) را با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصاد داشته باشیم، بهترین برنامه آبیاری دور ۹ روز با عمق ۸۶ میلی‌متر است و اگر هدف حداکثر بهره‌وری آب باشد بهترین برنامه آبیاری دور ۸ روز با عمق ۷۸ میلی‌متر است.



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

برای این‌که برنامه آبیاری قابل‌تعمیم در شرایط کم‌آبی نیز باشد، کم‌آبیاری از ۵ تا ۳۵ درصد در مراحل مختلف رشد در نظر گرفته شد. بهترین برنامه آبیاری با هدف حداکثر بهره‌وری اقتصادی، مربوط به سناریو دوم با دور آبیاری متغیر ۷ و ۸ روزه بود و عمق آب بهینه برای محصولات پاییزه ۴۰ و ۵۲ میلی‌متر و برای محصولات بهاره ۸۴ میلی‌متر به دست آمد.

## منابع


۱. احسانی، م. و ه. خالدی (۱۳۸۲) بهره‌وری آب کشاورزی، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران (وزارت نیرو).

۲. امیری، ا.، ا. خورسند، ج. دانشیان و م. یوسفی (۱۳۹۷) پیش‌بینی ماده خشک و عملکرد کلزا تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود با استفاده از مدل AquaCrop. علوم و مهندسی آبیاری،۱(۴۱):۷۲-۵۷.

۳. رحیمی خوب، ح.، ع. ستوده‌نیا و ع. مساح‌بوانی (۱۳۹۳) واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران، ۸(۱):۱۱۵-۱۰۸.

۴. رمضانی اعتدالی، ه.، ب. آبابایی و ع. کاویانی (۱۳۹۷) تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن نیوار بر عملکرد، تعرق و بهره‌وری مصرف آب غلات اصلی در دشت قزوین. مهندسی منابع آب، (۱۵):۴۸-۳۹.

۵. شاهرخ نیا، م. ع.، ا. زارع و ح. دهقانی سانیج (۱۳۹۴) مقایسه ابزارهای مختلف برنامه‌ریزی آبیاری قطره‌ای مرکبات در خاک با بافت متوسط و سنگین. آبیاری و زهکشی ایران، ۳ (۹):۴۴۷-۴۵۷.

۶. ضیایی غ.، ح. بابازاد، ف. عباسی و ک. فریدون (۱۳۹۳) بررسی عملکرد مدل‌های CERES و AquaCrop - در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت، تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۴۴ (۴): ۵۹۳-۴۳۵.

۷. فرهادی بانسوله، ب. (۱۳۷۷) بررسی اثرات کم آبیاری بر روی عملکرد محصول جو در منطقه کرج و تعیین تابع تولید. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران ۱۲۰ ص.

۸. کانونی، ا. و م. منعم (۱۳۹۵) بهینه‌سازی تخصیص و برنامه‌ریزی تحویل *آب* در شبکه‌های *آبیاری*، ۱۰(۱): ۱۲-۲۳.

۹. گلکار، ح.ر. (۱۳۷۷) تعیین تابع تولید محصول گندم و مطالعه اثر تنش آبی بر عملکرد در منطقه کرج .پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران. ۱۲۲ ص.

۱۰. میرلطیفی، س. م. و ع. ستوده‌نیا (۱۳۸۱) شبیه‌سازی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد محصول ذرت .گزارش نهایی طرح تحقیقات کاربردی معاونت پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران وزارت نیرو. ۲۲۱ ص.

11. Doorenbos J. and Kassam A.H. (1979) *Yieldresponse to water*. Irrigation and Drainage Paper no.33. FAO, Rome.

12. Dorigo M., Maniezzo V. and Colorni A. (1996) *Ant system: optimization by a colony of cooperating agents*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 26 (1), 29-41,

13. Ghahraman B. and Sepaskhah A. R. (1997) *Optimum deficit irrigation of cotton and potato fields in a semi-arid region, Iran*. Iranian Journal of Science. 21(4), 395-405.

14. Heng L.K., Evett S.R., Howell T.A and Hsiao T.C. (2009) *Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations.* Journal of Agron. *101:488–498.*

15. Heng L.k., Hsiao T.C., Evett S., Howell T. and Steduto P. (2009). *Validating the FAOAquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize,* Agronomy Journal. *101(3), 488-498.*

16. Li S., Tarboton D. and McKee M. (2003) *ArcET a GIS Package for Statewide Irrigation Water Use Estimation. Utah Water Research Laboratory,* Utah State University and Utah Department of Natural Resources, Division of Water Resources.

17. Linker R., Loslovich L., Sylaios G., Plauborg F. and Battilani A. (2016) *Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato*.Journal of Agricultural Water Management, *(163), 236-243.*


[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

18. Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y. and Tan C.L. (2003) *Ant colony optimisation for design of water distribution systems, ASCE J.* Water Resources Planning and Management. *129(3), 200-209*, doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(200).
19. Meyer S. J., Hubbard K. G. and Wilhite D. A. (1993) *A crop specific drought index for corn: I, Model development and validation*. Journal of Agron. *(85), 388-395.*
20. MoLi Q., Vijay P. and Singh D. (2018) *An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty*. Agricultural Water Management, Volume 196, 31 January 2018, Pages 24-36.
21. Raes D., Steduto P., Hsiao T.C. and Fereres E. (2009) *AquaCrop–the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description*. Journal of Agron, *(101), 438-447*.
22. Rao N., Sarma P. and Chander S. (1988) *Irrigation scheduling under a limited water supply*. Agricultural Water Management, *15(2), 165-175*.
23. Singh, A. (2014) *Irrigation Planning and Management Through Optimization Modelling*, Water Resources Management, *28(1), 1-14*.
24. Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Therese Abi Saab M., Stockle C. and Steduto P. (2009) *Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST Models in the simulations of Sinflower growth under different water regimes.* Agronomy Journal. *(101),509-521*.
25. Wardlaw R. and Bhaktikul K. (2004) *Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling*, Irrigation and Drainage, *53 (4), 397-414*,
26. Zecchin A.C., Maier H.R., Simpson A.R., Leonard M. and Nixon J.B. (2007) *Ant coloni optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithm.* Journal of Water Resources Planning and Management, *133(1), 87-92.*

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]

# Determining the best irrigation water scheduling with the aim of maximum productivity in irrigation and drainage networks (Case study: Qazvin irrigation network)

**Farhad Mirzaei*[1] Maryam Azizabadi [2]**

[1]*. Associate Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

[2]. Former Ph.D. Student, Irrigation and Reclamation Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 2021/06
Accepted: 2022/07

**Abstract**

In this study, a model was developed to determine the optimal irrigation schedule for the Qazvin Plain in such a way that economic productivity is maximized with the amount of water available and the area under cultivation. The AquaCrop plant growth model was used to determine crop performance in different irrigation programs. The plant growth model was connected to the MATLAB programming environment. Ants' optimization algorithm was used to determine the optimal irrigation schedule. Products, the volume of different water, depth of irrigation water, and irrigation cycle were included as decision options. Finally, after determining the best parameters of ACO, the best irrigation program was determined by considering five different scenarios in terms of irrigation depth and frequency and crop cultivation priority. In order for the irrigation program to be generalizable in water deficit conditions, an irrigation deficit from 5% to 35% was considered in different stages of growth. If we want to have the same frequency and depth of water for all crops (scenario of constant irrigation frequency and constant irrigation depth) with the goal of maximum economic efficiency, the best irrigation schedule is frequency of 9 days with a depth of 86 mm. And if the goal is maximum water productivity, the best irrigation schedule is 8 days with a depth of 78 mm. In total, among all scenarios, the best irrigation program with the aim of maximum economic productivity was related to the second scenario with variable irrigation frequency of 7 and 8 days. The optimal water depth for autumn crops was 40 and 52 mm and for spring crops was 84 mm. In addition, the priority of planting was determined in the order of tomato, potato, fodder corn, beans, wheat, barley, rapeseed, seed corn, and sugar beet. In case of a decrease in the amount of available water, the best low-irrigation program for crops was determined in such a way as to create maximum economic productivity.

**Keywords:** Irrigation program, Productivity, Deficit irrigation, Qazvin irrigation network.

[1*] Corresponding author's Email: Fmirzaei@ut.ac.ir



[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-06-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.2.5.6 ]