



**Optimization of Water Allocation in Irrigation Networks Considering Water Quantity and Quality Constrains,**  
**Case Study: Zayandehroud Irrigation Networks**

M. Delavar<sup>1\*</sup>, S. Morid<sup>2</sup> and M. Moghadasi<sup>3</sup>

**Abstract**

Salinity and water deficiency are the major constraints of crop production in arid and semi arid areas. Plants in these areas may simultaneously be affected by salt stress and drought based on the water quality and quantity. Considering the limitations of water resources in such areas, optimization of product depth of irrigation is very important. The main goal of this study is to provide a water resource allocation optimization method according to the qualitative and quantitative restrictions in order to manage water allocation in droughts. Also to enhance the modelling efficiency, water allocations in irrigation networks, crop productions and their growing stages and irrigation periods are considered in the optimization procedure. Finally, the developed model is able to estimate crop yields as well as the optimal amounts of water allocation from reservoir to plant growth stages due to salinity and water resources constraints. Evaluation of proposed model in Zayandehroud irrigation network showed that the modeling system used in this study is able to cover required calculations for allocation and distribution of water between sub-networks, crops, and agricultural irrigation planning according to the qualitative and quantitative restrictions in water resources.

**Keywords:** Optimization, Water quality, Yield, Irrigation network, Zayandehroud.

Received: August 1, 2014

Accepted: May 5, 2015

**تخصیص بهینه آب در شبکه‌های آبیاری در شرایط لحاظ تغییرات شوری،**

**مطالعه موردی: شبکه‌های آبیاری زاینده رود**

مجید دلاور<sup>۱\*</sup>، سعید مرید<sup>۲</sup> و مهنوش مقدسی<sup>۳</sup>

**چکیده**

شوری و کمبود آب از محدودیت‌های عمده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک هستند. در این مناطق گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب، ممکن است تحت تأثیر همزمان تنش‌های شوری و خشکی قرار گیرند. لذا با توجه به محدودیت‌های منابع آب در این مناطق، بهینه‌سازی عمق آبیاری محصولات حائز اهمیت زیادی می‌باشد. هدف اصلی تحقیق حاضر ارائه روش بهینه‌سازی تخصیص منابع آب با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی آب به منظور مدیریت خشکسالی می‌باشد. همچنین به منظور ارتقاء کارآمدی مدل‌سازی، در روش‌شناسی مد نظر در بهینه‌سازی تخصیص آب، شبکه‌ها محصولات و مراحل رشد آنها و همچنین دور آبیاری در محاسبات لحاظ می‌گردد. بدین منظور از یک مدل بهینه‌سازی سه لایه به منظور بهینه‌سازی از سطح گیاه تا شبکه‌های آبیاری استفاده می‌گردد. در این رویکرد با لحاظ شبیه‌سازی عملکرد محصولات با استفاده از روش جدید فائو موسوم به FAO-2009، میزان تخصیص آب در سطوح مختلف تقاضا به گونه ای تعیین می‌گردد که درآمد خالص حاصل از سیستم حداکثر گردد. بدین ترتیب مدل توسعه یافته قادر است در شرایط مختلف شوری و کمبود آب میزان عملکرد محصولات زراعی و همچنین مقادیر بهینه تخصیص آب از سطح مخزن تا دوره رشد گیاه را برآورد کند. بررسی نتایج مدل در شبکه‌های آبیاری حوضه آبریز زاینده رود حاکی از آن است که سیستم مدل‌سازی سه لایه مورد استفاده در این تحقیق، به بخوبی توانست محاسبات لازم را برای تخصیص و توزیع آب بین شبکه‌ها، محصولات کشاورزی و برنامه‌ریزی آبیاری با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب پوشش دهد. در این شرایط با افزایش مقدار شوری نرخ تغییرات درآمد بیشتر شده به گونه ای که با افزایش شوری در بازه ۷-۱۰ ds/m<sup>۳</sup> کاهش درآمد کل سیستم نسبت به حالت پایه (بدون لحاظ اثرات شوری) از ۴۳ میلیارد ریال تا ۱۰۳ میلیارد ریال می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، کیفیت آب، عملکرد، شبکه آبیاری، زاینده

رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۲/۱۵

1- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: m\_delavar@modares.ac.ir

2- Professor, Water Resources Engineering Department, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Water engineering Department, College of agriculture, Arak University, Arak, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک، اراک، ایران

\*- نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

پیش‌فصل برای تعیین الگوی کشت و استراتژی‌های آبیاری بکار گرفته شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی رشد محصولات و همچنین صرفه‌جویی در مصرف آب است.

گروه دیگر مطالعات نیز روی بهینه‌سازی عمق آبیاری طی دوره رشد تحت محدودیت کمی آب کار کرده‌اند و هدف آنها عمدتاً حداکثر کردن درآمد بوده است، در این خصوص می‌توان به کار English et al. (1996) اشاره کرد، آنها به منظور بهینه‌سازی عمق آبیاری مطالعاتی را بر روی گندم زمستانه انجام دادند و بر اساس توابع ریاضی تولید و هزینه، عمق بهینه آب مصرفی را در دو حالت محدودیت آب و زمین محاسبه کردند. در راستای بهینه‌سازی الگو و تراکم کشت نیز تحقیقی توسط Paul et al. (2000) در یکی از مزارع ایالت پنجاپ هند صورت گرفت. آنها در دو مرحله فصلی و درون فصلی با هدف حداکثرسازی سود خالص، بهینه‌سازی را با توجه به میزان آب در دسترس انجام دادند. در تحقیقی دیگر مدلی برای تخصیص بهینه آب از سد مخزنی و تک منظوره ارداک (واقع در نزدیکی مشهد) به شبکه‌ای با الگوی کشت از پیش تعیین شده توسط Ghahraman and Sepaskhah (2004) توسعه یافت. این مدل شامل دو زیر برنامه بود. بخش اول، به تخصیص بین فصلی (برنامه ریزی غیرخطی) آب بین محصولات مختلف پرداخت و ترکیب محدودی از متغیرهای حالت (شامل ورودی، بارندگی، حجم مخزن در شروع و پایان فصل) را با هدف حداکثر نمودن درآمد، بکار برد. بخش دوم نیز تخصیص درون فصلی (برنامه‌ریزی پویای استوکاستیکی) بود که در آن هدف حداکثر نمودن درآمد در یک سال بود. در این کار پتانسیل آب موجود طبقه بندی شده و برای هر طبقه مدل فوق بهینه‌سازی شد. (Shangguan et al. (2002) برای مدیریت بهتر در شرایط کم آبی در بخش کشاورزی منطقه یانگلینگ چین از روش کم آبیاری استفاده کردند و بدین منظور مدلی ریاضی ارائه دادند. این مدل، دارای سه لایه اصلی بود. نخستین لایه مربوط به توزیع بهینه آب در مراحل مختلف رشد گیاه، دومین لایه برای توزیع بهینه آب بین محصولات مختلف زراعی و سومین لایه برای توزیع بهینه آب بین نواحی مختلف منطقه در نظر گرفته شد. در بهینه‌سازی این سیستم نیز برنامه ریزی پویا (DP) مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور افزایش بهره‌وری آب محصولات گندم، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند، در شرایط محدودیت کمی آب (Vazifedoust et al. (2008) تحقیقی را به کمک مدل SWAP در منطقه برخوار اصفهان انجام دادند آنها پس از واسنجی مدل، با تغییر عمق و دور آبیاری توابع بهره‌وری آب را برای محصولات فوق

در اکثر مناطق خشک و نیمه خشک، کاهش منابع آب با افت کیفیت و بخصوص شوری همراه می‌باشد. واقعیتی که بخصوص در خشکسالی‌ها بیشتر خود نمایی می‌کند. این تغییرات، بهره‌بردار را بهینه از این منابع را با هدف حداکثر کردن تولید محصولات زراعی را بیش از پیش با اهمیت می‌سازد. تحقیقات انجام یافته در این خصوص را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود. گروه اول آنهایی هستند که روی تولید توابع عملکرد محصولات در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب کار کرده‌اند، مانند Letey et al. (1985) که برای تعیین تابع تولید محصول با آب شور مدلی را توسعه دادند که عملکرد نسبی را به صورت تابعی درجه دو از شوری و نسبت عمق آب آبیاری به مقدار تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در دوره رشد محصول برآورد می‌کرد. (Russo et al. (1987) نیز برای تعیین عملکرد ذرت و پنبه، با مقادیر مختلف کمی و کیفی آب آبیاری، عملکرد محصول را به صورت تابع درجه دو از رطوبت حجمی و شوری خاک بدست آوردند.

(Droogers and Torabi (2002) در ارزیابی اثر تغییرات کمی و کیفی آب بر شوری خاک و عملکرد محصولات در منطقه اصفهان از مدل SWAP استفاده کردند. هدف آنها استخراج توابع تولید محصولات عمده شبکه‌های آبیاری آشار و رودشت اصفهان و تعیین عمق بهینه آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP برای هر یک از محصولات بود.

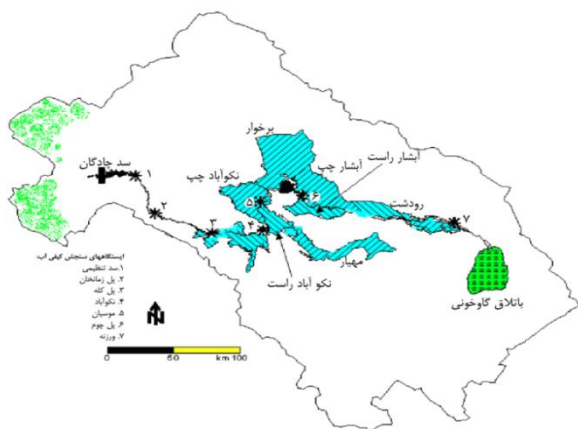
در نشریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی سازمان خوار و بار و کشاورزی ملل متحد (FAO) برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات روابطی ارائه شده است که بر اساس نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل و ضریب حساسیت گیاهی به تنش آبی استوار است. این روابط تاکنون مبنای مطالعات بسیار زیادی بوده‌اند (Mogaddassi et al. (2008); (Paul et al. (2000). اما با توجه به نقاط ضعف روابط 1979-FAO در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تحت تنش‌های آبی، در سال ۲۰۰۳ مطالعات جدیدی توسط فائو به منظور بازنگری رابطه عملکرد گیاه شروع شد و در سال ۲۰۰۷ روابط جدیدی توسط Steduto و همکاران ارائه گردید. این روابط تاکنون در مطالعات اندکی به منظور برآورد توابع عملکرد محصولات مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقی گارسیا و همکاران (۲۰۱۲) از این روابط به منظور به منظور تعیین توابع عملکرد و بهینه‌سازی مدیریت آبیاری در سطح مزرعه استفاده کردند. مدل توسعه یافته در این مطالعه در منطقه‌ای در جنوب‌غربی اسپانیا برای کمک به کشاورزان برای تصمیم‌گیری

ارزیابی روش شناسی ارائه شده نیز شبکه زاینده رود و اطلاعات اقلیمی آن در سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ که خشکسالی شدیدی بر منطقه حاکم بود جهت ارائه روش شناسی تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

رودخانه زاینده رود با مساحت حوضه آبریز ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع و طول ۳۵۰ کیلومتر از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و به باطلاق گاوخونی ختم می‌گردد. بر روی این رودخانه سد مخزنی چادگان با حجم کل ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب احداث گردیده است (شکل ۱).



شکل ۱- شکل شماتیک منطقه مطالعاتی

در پایین دست سد و در طول این رودخانه، شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاها از آب آن بهره برداری می‌کنند. مهم‌ترین شبکه‌های کشاورزی به ترتیب از بالا به پایین شامل مهبیار، نکوآباد راست و چپ، برخوار، آبشار راست و چپ، رودشت و تعدادی شبکه‌های کوچک می‌باشند.

عوامل شورکننده آب زاینده‌رود تا قبل از شهر اصفهان محدود به روان آب‌های سطحی و زه‌آب‌های حاصل از اراضی حاصل خیز زراعی است که به علت حجم کم آنها و همچنین شیب و دبی رودخانه دارای اهمیت چندانی نیستند. اما در پایین دست منابع عمده آلوده کننده و شوری، زهکش‌های زراعی و نفوذ آب‌های زیرزمینی شور هستند که به علت دبی کم رودخانه باعث شوری بیش از حد آب شده‌اند. بررسی آمار و اطلاعات کیفی آب نشان می‌دهد که محدوده شوری در رودخانه به طور متوسط از EC برابر با ۱/۴ در محل سد زاینده‌رود تا ۱۳ ds/m در ایستگاه ورزنه تغییر می‌یابد.

استخراج و براساس آنها و تغییر برنامه آبیاری، بهره‌وری را افزایش دادند. Moghaddasi et al. (2008) نیز از چهار زیر مدل به منظور بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد گیاهان، بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات شبکه‌ها، بهینه‌سازی توزیع آب بین شبکه‌های مختلف و بهینه‌سازی سالانه سهم آب کشاورزی از سد زاینده‌رود استفاده کردند. در این تحقیق آب به صورت بهینه بین دوره‌های ۱۰ روزه رشد هر گیاه به گونه‌ای توزیع می‌شود که عملکرد گیاه حداکثر گردد. همچنین به منظور تخصیص بهینه آب در سطح شبکه‌ها و مخازن بترتیب از توابع هدف حداکثر سازی درآمد هر شبکه و کل سیستم استفاده گردید.

در تحقیقی دیگر Prasad et al. (2011) یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای تعیین الگوی کشت بهینه و تخصیص بهینه آب مخزن با هدف ماکزیمم کردن سود خالص سالیانه در یک سیستم آبیاری مبتنی بر ذخیره مخزن در هند را توسعه دادند. در این مدل الگوی کشت بهینه جایگزین و میزان رهاسازی از مخزن برای رشد گیاهان به‌ازای سطوح مختلف جریان ورودی به مخزن به دست می‌آید. نتایج مدل، اهمیت ذخیره اولیه مخزن برای دستیابی به حل امکان‌پذیر را نشان می‌دهند. Das et al. (2015) نیز یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای تخصیص بهینه آب و زمین در استفاده تلفیقی از منابع آب در بخش‌های مختلف کانال هیراکند<sup>۱</sup> در هند با هدف ماکزیمم کردن سود اقتصادی خالص بخش کشاورزی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد که سیاست تخصیص پایدار منابع آب در منطقه مطالعاتی شامل استفاده تلفیقی از ۱۳٪ آب زیرزمینی و ۸۷٪ آب سطحی می‌باشد و ۲۰٪ تغییر در الگوی کشت موجود، بهترین گزینه در تخصیص بهینه آب و زمین در منطقه مطالعاتی است.

بررسی سوابق کتابخانه‌ای این تحقیق نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات به بهینه‌سازی عمق آبیاری بدون توجه به کیفیت آب پرداخته شده و تاکنون کار کمتری در خصوص بهینه‌سازی عمق آبیاری با لحاظ شرایط کمی و کیفی آب صورت گرفته است که این مهم، هدف تحقیق حاضر را رقم می‌زند. در روش شناسی مد نظر در بهینه‌سازی تخصیص آب نیز شبکه‌ها، محصولات و مراحل رشد آنها و همچنین دور آبیاری در محاسبات لحاظ می‌گردد که بر کارآمدی مدل‌سازی‌های مربوطه می‌افزاید. بدین منظور از یک مدل بهینه سازی سه لایه به منظور بهینه‌سازی از سطح گیاه تا شبکه‌های آبیاری استفاده می‌گردد. در این رویکرد با لحاظ شبیه‌سازی عملکرد محصولات با استفاده از روش جدید فائو موسوم به FAO-2009، میزان تخصیص آب در سطوح مختلف تقاضا به گونه‌ای تعیین می‌گردد که درآمد خالص حاصل از سیستم حداکثر گردد. برای

میزان عملکرد محصول، میزان ماده خشک تولیدی را نیز در هر مرحله از رشد برآورد کند (Steduto et al., (2007)).

برای قسمت بعدی و واکنش گیاه به شرایط شوری از رابطه زیر استفاده می‌شود که تابعی از شوری متوسط خاک می‌باشد:

$$\frac{Y_s}{Y_{ns}} = f(\bar{S}) = \begin{cases} 1 - a(\bar{S} - EC_e) & \bar{S} > EC_e \\ 1 & \bar{S} \leq EC_e \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $EC_e$  آستانه تحمل شوری گیاهان،  $a$  ضریب کاهش عملکرد گیاه در واحد افزایش شوری و  $\bar{S}$  شوری متوسط خاک می‌باشد (Mass and Hoffman (1977)). مقادیر مربوط به  $a$  و  $EC_e$  در جدول ۲ آمده است.

شوری متوسط خاک ( $\bar{S}$ ) به صورت متوسط وزنی شوری خاک در ابتدا ( $S_i$ ) و انتهای ( $S_f$ ) دوره رشد و مطابق با رابطه زیر قابل برآورد می‌باشد (Feinerman and Yaron (1983)):

$$\bar{S} = w_i \times S_i + w_f \times S_f \quad (4)$$

$w_i$  و  $w_f$  نیز ضرایب وزنی شوری در ابتدا و انتهای دوره و به صورت توابعی از عمق آبیاری ( $IR$ )، بارندگی موثر ( $Pe$ )، عمق ریشه ( $Root$ ) و مقدار رطوبت اولیه خاک ( $SM$ ) می‌باشند و مطابق با روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$w_i = (Root \times SM) / (IR + Pe + Root \times SM) \quad (5)$$

$$w_f = (IR + Pe) / (IR + Pe + Root \times SM) \quad (6)$$

شوری متوسط خاک همچنین تابعی از شوری آب آبیاری ( $SI$ ) می‌باشد که با توجه به میزان نشت عمقی آب ( $DP$ ) و با استفاده از معادله بیلان املاح خاک به صورت رابطه زیر قابل برآورد می‌باشد:

$$\bar{S}_t = \frac{IR_t \times SI - Root_t(SM_f \times S_f - SM_i \times S_i)}{DP_t} \quad (7)$$

بدین ترتیب میزان شوری متوسط خاک در منطقه ریشه به منظور استفاده در معادله (۳)، با توجه به عمق و شوری آب آبیاری و از حل همزمان معادلات ۴ و ۷ تعیین می‌گردد.

### ۳-۲- مدل سازی تخصیص بهینه آب

با توجه به اهداف تحقیق، مدل سازی تخصیص بهینه آب در سطح شبکه‌ها، محصولات و دوره‌های رشد گیاه، با توسعه سه زیر مدل صورت می‌گیرد که هر کدام تابع هدف و قیود خاص خود را دارند و در ادامه به آنها پرداخته می‌شود:

همانطور که بیان شد در این تحقیق بهینه‌سازی تخصیص آب برای چهار محصول عمده منطقه شامل گندم، جو، چغندر قند و سیب زمینی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه تقویم زراعی و عملکرد حداکثر محصولات بر اساس مراجع علیزاده (۱۳۸۰) و فرشی و همکاران (۱۳۷۶) و اطلاعات محلی آورده شده است (جدول ۱).

آمار و اطلاعات هواشناسی مورد نیاز نیز شامل دمای حداقل، حداکثر و میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه سینوپتیک اصفهان تهیه شد.

### ۲-۲- شبیه‌سازی عملکرد محصولات در شرایط شوری

در این تحقیق عملکرد گیاه به صورت تابعی از واکنش گیاه به تنش آبی و شوری و مطابق رابطه زیر شبیه سازی گردید:

$$Y = f(Y_{ns}, Y_s) \quad (1)$$

که در آن  $Y$  عملکرد کلی گیاه،  $Y_{ns}$  واکنش عملکرد گیاه در شرایط تنش آبی و بدون تنش شوری، و  $Y_s$  واکنش عملکرد گیاه نسبت به شوری می‌باشد (McNeal and Coleman (1966); Munns and Termaat (1986)).

برای برآورد  $Y$  در رابطه (۱) از روش جدید ارائه شده توسط سازمان خوار و کشاورزی ملل متحد (FAO) استفاده گردید که عملکرد گیاه در شرایط تنش آبی و بدون تنش شوری برآورد می‌کند (Steduto et al., (2007)):

$$Y = B.HI = WP \cdot \sum_{n=1}^N Tr.HI \quad (2)$$

که  $Y$  عملکرد واقعی محصول ( $kg/ha$ )،  $B$  مقدار ماده خشک تولیدی ( $kg/ha$ )،  $HI$  شاخص برداشت برحسب درصد،  $WP$  شاخص تولیدی آب ( $kg/(ha \cdot mm_{water} \cdot t)$ )،  $Tr$  تعرق ( $mm$ ) و  $N$  حداکثر تعداد دوره‌های مدنظر در طول فصل رشد می‌باشد.

در این رابطه عملکرد محصول بر اساس میزان تعرق گیاه و شاخص‌های اصلاح شده تولیدی آب و برداشت محصول بر مبنای میزان تنش آبی و مدیریت مزرعه در مراحل مختلف رشد محاسبه می‌گردد که در مقایسه با روش قبلی ارائه شده توسط این سازمان (FAO-1979) که عملکرد تنها بر اساس میزان تبخیر تعرق گیاه و ضریب حساسیت آن در دوره‌های چهارگانه رشد محاسبه می‌شود، به نحو مطلوب‌تری قادر به شبیه‌سازی عملکرد محصول بویژه در دوره‌های تنش آبی می‌باشد. همچنین قادر است علاوه بر برآورد

جدول ۱- تقویم زراعی و عملکرد حداکثر (kg/ha) محصولات زراعی در حوضه زاینده رود

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	عملکرد حداکثر
گندم	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۹۰۰۰
جو	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۷۰۰۰
چغندرقد	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۷۰۰۰۰
سیب زمینی	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۵۰۰۰۰

که در آن  $Root$  طول ریشه (mm/10days)  $r$  عمق کاشت (گندم و جو ۷، چغندرقد ۵ و سیب زمینی ۱۵ سانتیمتر) و  $t$  مبین دوره زمانی ۱۰ روزه (برابر با دور آبیاری) و  $T$  طول دوره زمانی رشد می‌باشد.

جدول ۲- آستانه تحمل شوری گیاهان و ضریب کاهش عملکرد آنها در واحد افزایش شوری (Mass and Hoffman (1977))

گیاه	آستانه تحمل گیاه ( $EC_e$ ) ds/m	ضریب کاهش عملکرد گیاه در واحد افزایش شوری (a)
گندم	۶	۷/۱
جو	۸	۵
چغندرقد	۷	۵/۹
سیب زمینی	۱/۷	۱۲
یونجه	۲	۷/۳

- تبخیر و تعرق واقعی همواره کوچکتر یا مساوی تبخیر و تعرق پتانسیل گیاهی می‌باشد.

$$ETa_{c,t} \leq ET \max_{c,t} \quad (10)$$

- با در نظر گرفتن معادله بیلان آب در خاک، تبخیر و تعرق واقعی کوچکتر از نسبتی از مقدار پتانسیل آن می‌باشد:

$$ETa_{c,t} \leq \frac{ET \max_{c,t}}{(1 - P_c)(FC_c - PWP_c)} \quad (11)$$

$$\left[ SM_{c,t} - PWP + \left( \frac{IR_{c,t} - DP_{c,t}}{Root_{c,t}} \right) \right]$$

که در آن  $IR$  عمق آب آبیاری (mm/10days)،  $DP$  نشت عمقی (mm/10days)،  $P$  کمبود مجاز رطوبتی،  $SM$  رطوبت موجود در خاک ( $cm^3/cm^3$ )،  $PWP$  نقطه پژمردگی دائم ( $cm^3/cm^3$ ) و  $FC$  ظرفیت مزرعه ( $cm^3/cm^3$ ) می‌باشد.

- معادله بیلان آب در خاک و منطقه ریشه مطابق زیر تعریف شده است:

$$SM_{c,t+1}Root_{c,t+1} = SM_{c,t}Root_{c,t} + IR_{c,t} - ETa_{c,t} - DP_{c,t} + SM'(Root_{c,t+1} - Root_{c,t}) \quad (12)$$

این متغیرها شامل رطوبت اولیه و ثانویه، آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی، نشت عمقی و تغییرات رطوبت در طول زمان رشد ریشه ( $SM'$ ) می‌باشد.  $SM$  نیز در طول فصل رشد بین نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی در تغییر می‌باشد:

$$PWP_c \leq SM_{c,t} \leq FC_c \quad (13)$$

- نشت عمقی حداقل برابر تلفات آبیاری است و در صورت اعمال آب مازاد (مانند وجود بارندگی بیش از نیاز آبی)، از این حد هم بیشتر می‌شود:

$$DP_{c,t} \geq IR_{c,t}(1 - Eff_c) \quad (14)$$

در رابطه بالا  $Eff_c$  نیز راندمان آبیاری است.

۲-۳-۱- بهینه سازی توزیع آب در طول فصل رشد گیاهان بر اساس روش FAO-2009

این زیر مدل، کل آب مصرفی هر محصول را طی فصل رشد بصورت بهینه در دوره‌های ۱۰ روزه (دور آبیاری مرسوم در منطقه اصفهان) به صورت بهینه توزیع می‌نماید. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن نسبت عملکرد واقعی محصول و با مدنظر قراردادن واکنش گیاه به شوری و متغیر تصمیم در آن عمق آبیاری در هر دور آبیاری می‌باشد:

$$MAX : Y = \begin{cases} WP \cdot \sum_{n=1}^N Tr.HI \times (1 - a(\bar{S} - EC_e)) & \forall \bar{S} > EC_e \\ WP \cdot \sum_{n=1}^N Tr.HI & \forall \bar{S} \leq EC_e \end{cases} \quad (8)$$

قیودات و نکاتی که در مدل سازی این بخش مد نظر بوده، شامل موارد زیر است:

- در طی فصل رشد، طول ریشه در هر دوره زمانی از رابطه ذیل بدست می‌آید (Borg and Grimes (1986)):

$$Root_{c,t} = 10 \cdot (r + Root_{Max} (0.5 + 0.5 \sin(3.03t/T - 1.47))) \quad (9)$$



که در آن  $HI_{ini}$  شاخص برداشت اولیه ( معادل  $0.1$  )،  $HIGC$  ضریب رشد شاخص برداشت ( $day^{-1}$ ) و  $t$  زمان بعد از شکل گیری عملکرد ( $day$ ) هستند.

اثر تنش های آبی قبل از مرحله تولید عملکرد توسط شاخص  $f_{ante}$  و مطابق با رابطه زیر در اصلاح شاخص برداشت مدنظر قرار می گیرد:

$$f_{ante} = \begin{cases} 1 + \frac{1 + \sin((1.5 - Ratio_{low})\pi) \Delta HI_{ante}}{2 \cdot 100}, & B_{rlow} < B_{rel} \leq B_{rtop} \\ 1 + \frac{1 + \sin((0.5 - Ratio_{up})\pi) \Delta HI_{ante}}{2 \cdot 100}, & B_{rtop} < B_{rel} \leq B_{rup} \end{cases} \quad (22)$$

در این رابطه  $\Delta HI_{ante}$  درصد مجاز افزایش شاخص برداشت در شرایط تنش آبی قبل از مرحله گلدهی،  $Ratio_{low}$  و  $Ratio_{up}$  به ترتیب تغییرات نسبی حداقل و حداکثر ماده خشک تولیدی،  $B_{rel}$  ماده خشک نسبی تولیدی در شروع مرحله گلدهی،  $B_{rlow}$  و  $B_{rup}$  به ترتیب حد نسبی پایین و بالای تولید ماده خشک و  $B_{rtop}$  حد نسبی ماده خشک در شرایطی که حداکثر تاثیر گذاری در تولید عملکرد را دارد، می باشد.

اثر تنش آبی در اصلاح شاخص برداشت و در مرحله شکل گیری عملکرد نیز توسط شاخص  $f_{post}$  اعمال می گردد:

$$f_{post} = \left( \frac{w_1 f_{post\uparrow} + (w_2 - w_1) f_{post\downarrow}}{w_2} \right) f_{post\downarrow} \quad (23)$$

که در آن  $w_1$  طول دوره رشد سبزینه ای در مرحله شکل گیری عملکرد ( $day$ )،  $w_2$  طول دوره شکل گیری عملکرد ( $day$ ) و  $f_{post\uparrow}$  و  $f_{post\downarrow}$  به ترتیب ضرایب اصلاح شاخص برداشت در طول دوره رشد سبزینه ای در مرحله شکل گیری عملکرد و کل دوره شکل گیری عملکرد می باشند و مطابق با روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$f_{post\uparrow} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n(\exp)} \left( \frac{1 - Ks_{exp,i}}{a} \right)}{n(\exp)} \quad (24)$$

$$f_{post\downarrow} = \frac{\sum_{i=1}^{n(yield)} \left( 10 \sqrt{Ks_{sto,i}} \left( 1 - \frac{(1 - Ks_{sto,i})}{b} \right) \right)}{n(yield)} \quad (25)$$

در این روابط  $Ks_{exp,i}$  ضریب تنش آبی در روز  $i$  دوره رشد سبزینه ای در مرحله شکل گیری عملکرد،  $a$  ضریب حساسیت گیاه در مرحله ای که هنوز رشد سبزینه ای وجود دارد (  $0.5$  الی  $0.4$  ) و  $b$  ضریب حساسیت گیاه در دوره عملکرد (  $1$  الی  $0.2$  ) و  $n(\exp)$  طول دوره رشد سبزینه ای در مرحله شکل گیری عملکرد و  $n(yield)$  طول دوره شکل گیری عملکرد می باشد.

نهایتاً شاخص برداشت محصول بر اساس ضرایب  $f_{ante}$  و  $f_{post}$  به صورت زیر تصحیح می گردد:

- مجموع آب آبیاری در دوره های درون فصلی (دوره های آبیاری) باید با آب در نظر گرفته شده برای کل فصل رشد ( $TAW$ ) مساوی و یا از آن کمتر باشد:

$$\sum_t IR_{c,t} \leq TAW_c \quad (15)$$

- معادله بیان املاح خاک در منطقه ریشه با توجه به میزان شوری آب آبیاری ( $SI$ ) مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

$$IR_t \times SI_t - DP_t \times \bar{S}_t = Root_t(SM_t \times S_f - SM_{t-1} \times S_i) \quad (16)$$

- مقدار حداکثر تبخیر و تعرق گیاه ( $ET_{max}$ ) در گیاهان مختلف از رابطه زیر برآورد شد:

$$ET_{max\ c,t} = Kc_{c,t} \cdot ET_0 \quad (17)$$

که در آن  $ET_0$  تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع،  $Kc_{c,t}$  ضریب گیاهی و  $t$  دوره زمانی که در اینجا ده روزه در نظر گرفته شده است. تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن - مانتیث ( Allen et al., 1998 ) با استفاده از داده های ایستگاه سینوپتیک اصفهان و ضریب گیاهی با توجه به دوره های زمانی در هر مرحله از رشد گیاه، بر اساس استاندارد FAO-24 (Doorenbos and Pruitt (1984)) و تحقیق فرشی و همکاران (۱۳۷۶)، محاسبه گردید.

علاوه بر مد نظر قراردادن قیودات مرتبط با بیان آب و املاح در خاک، تبخیر و تعرق، طول ریشه و نشت عمقی (معادلات ۹ تا ۱۷) محدودیت های زیر نیز به منظور بررسی تاثیر تنش آبی بر عملکرد محصول در نظر گرفته می شود:

- میزان تعرق حداکثر گیاه همواره کوچکتر از میزان تبخیر تعرق پتانسیل است:

$$Trx_t = Kcb_t ET_0 \leq ET_0 \quad (18)$$

که در آن  $Trx_t$  حداکثر تعرق در هر دوره رشد گیاه و  $Kcb_t$  ضریب حداکثر تعرق گیاه می باشد.

- تعرق واقعی گیاه ( $Tr$ ) در هر دوره از رشد برابر با ضریبی از تعرق حداکثر است:

$$Tr_t = Ks_{sto,t} Trx_t \quad (19)$$

در این رابطه  $Ks_{sto,t}$  ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی می باشد و بر اساس نسبت تغییرات رطوبتی خاک محاسبه می گردد:

$$Ks_{sto,t} = 1 - \frac{SM_t}{FC_t - PWP_t} \quad (20)$$

- شاخص برداشت محصول در طول دوره شکل گیری عملکرد، کوچکتر یا مساوی شاخص برداشت مرجع ( $HI_0$ ) می باشد:

$$HI_t = \frac{HI_{ini} HI_0}{HI_{ini} + (HI_0 - HI_{ini}) \exp(-HIGC)t} \leq HI_0 \quad (21)$$

در نظر گرفته شده برای کل شبکه ( $V_{total}$ ) مساوی و یا از آن کمتر باشد:

$$\sum_{k=1}^K V_k \leq V_{total} \quad (29)$$

- سطح زیر کشت هر محصول می‌بایست ما بین حداکثر ( $A_{max k}$ ) و حداقل ( $A_{min k}$ ) سطح زیر کشت آن محصول در شبکه مورد نظر باشد:

$$A_{min k} \leq A_k \leq A_{max k} \quad (30)$$

- نهایتاً برای گیاه یونجه، مساحت هر چین نبایستی از چین قبل بیشتر باشد.

$$A_{A6} \leq A_{A5} \leq A_{A4} \leq A_{A3} \leq A_{A2} \leq A_{A1} \quad (31)$$

### ۲-۳-۳- زیر مدل سوم: بهینه سازی توزیع آب بین شبکه‌های مختلف

در این قسمت کل آب رها شده از مخزن سد به صورت بهینه بین شبکه‌ها توزیع می‌شود. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از کل شبکه‌ها و متغیر تصمیم حجم آب تخصیص یافته به هر شبکه است:

$$MAX \left\{ \sum_{n=1}^N F_n(V_n) \right\} \quad (32)$$

که در آن  $N$  تعداد شبکه‌ها و  $F_n(V_n)$  تابع سود هر شبکه به ازای آب تخصیص یافته می‌باشد. برای محاسبه  $F_n(V_n)$  مدل دوم را برای هر شبکه و به ازای حجم‌های مختلف اجرا گردید تا تابع مربوط (حجم آب اختصاص یافته به هر شبکه در مقابل سود) بدست آید. قیودات این مدل عبارتند از:

- مجموع آب اختصاص یافته به هر شبکه ( $V_n$ ) باید با کل آب رها شده از مخزن سد ( $V_{total}$ ) مساوی و یا از آن کمتر باشد (بر حسب  $m^3$ ):

$$\sum_{n=1}^N V_n \leq V_{total} \quad (33)$$

برای محاسبه کل حجم آب رها شده از مخزن سد از معادله پیوستگی ساده مخزن استفاده گردید:

$$S_{t+1} = I_t + S_t - R_t \quad (34)$$

در این رابطه  $I_t$  کل آب ورودی به مخزن سد، حجم مخزن در ابتدا و انتهای هر دوره ( $S_{t+1}, S_t$ ) و  $t$  دوره زمانی که در اینجا یک سال در نظر گرفته شده است (تلفات نشت، تبخیر از سد و بارندگی روی سطح آن ناچیز فرض شده است).

حجم آب داخل مخزن می‌بایست کوچکتر و یا مساوی ظرفیت

$$HI_{adj,t} = f_{post fante} HI_t \quad (26)$$

شرح بیشتر این قیودات و روابط در مرجع (Raes et al., 2010a) قابل دسترس می‌باشد. در این تحقیق ضرایب شاخص تولیدی آب ( $WP$ )، حداکثر تعرق گیاه هر مرحله از رشد ( $Kcb_t$ )، شاخص برداشت مرجع ( $HI_0$ )، ضریب رشد شاخص برداشت ( $HIGC$ )، درصد مجاز افزایش شاخص برداشت ( $HI_{ante}$ )، حد نسبی پایین و بالای تولید ماده خشک ( $B_{flow}$  و  $B_{rup}$ )، حد نسبی حداکثر تاثیر گذاری ماده خشک در شاخص برداشت ( $B_{rtop}$ ) و همچنین ضریب تنش آبی در دوره رشد سبزینه‌ای ( $KS_{exp}$ ) بر اساس مقادیر توصیه شده در مرجع Raes et al. (2010b) برای گیاهان اصلی منطقه مطالعاتی استخراج گردید.

علاوه بر این موارد، یکسری اطلاعات از قبیل مراحل رشد، مدت هر مرحله، حداکثر طول ریشه برای هر گیاه مورد نیاز بوده، که با استفاده از اطلاعات محلی تأمین گردید.

### ۲-۳-۲- زیر مدل دوم: بهینه سازی توزیع آب بین محصولات مختلف در یک شبکه

این زیر مدل تخصیص بهینه کل آب را در یک شبکه بین محصولات مختلف عهده‌دار می‌باشد. بدین منظور متغیر تصمیم حجم آب و سطح زیر کشت تخصیص یافته به هر محصول و تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از همه محصولات در یک شبکه بوده که بصورت ذیل می‌باشد:

$$MAX \left\{ \sum_{k=1}^K F_k(V_k) A_k Y_{max k} P_k \right\} \quad (27)$$

که در آن  $K$  تعداد محصولات،  $F_k(V_k)$  تابع عملکرد (رابطه بین حداکثر عملکرد نسبی به آب تخصیص داده شده)،  $A_k$  سطح کشت ( $ha$ )،  $Y_{max k}$  حداکثر محصول و  $P$  درآمد محصول  $k$  تعریف می‌گردند.

$F_k(V_k)$  از زیر مدل قبل برآورد می‌گردد. بدین منظور مدل اول برای هر محصول و به ازای حجم‌های مختلف (محدوده حداقل و حداکثر نیاز آبی طی کل دوره رشد گیاه) اجرا گردید تا عملکرد آنها به ازای احجام مختلف تعیین و تابع مدنظر بدست آید. قیدهای این مدل شامل موارد زیر هستند:

- کل سطح کشت محصولات مختلف ( $A_k$ ) نبایستی از سطح کل شبکه ( $A_{total}$ ) بیشتر باشد:

$$\sum_{k=1}^K A_k \leq A_{total} \quad (28)$$

- مجموع آب اختصاص یافته به هر محصول ( $V_k$ ) باید با آب

شبکه (در زیر مدل سوم) و حجم آب تخصیص یافته به هر محصول (در زیر مدل دوم) و حجم آب مورد نیاز برای هر محصول (زیر مدل سوم) در اختیار زیر مدل دیگر قرار می‌گیرد. برای که در شکل ۲ نیز فلوچارت این الگوریتم نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

همانگونه که قبلاً اشاره شد به منظور بررسی روش‌شناسی و ارزیابی آن، عملکرد مدل توسعه یافته بر اساس اطلاعات سال ۷۹-۱۳۷۸ در منطقه مطالعاتی که از شدیدترین خشکسالیهای ثبت شده در این منطقه بوده، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اجرای مدل اولین و مهم‌ترین ورودی، آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی بوده است. بر اساس آمار موجود طی این سال حجم سد چادگان در ابتدای سال، جریان ورودی طی سال آبی به مخزن و حجم در انتهای آن به ترتیب ۸۲۰، ۱۱۷۴ و ۳۰۰ میلیون متر مکعب (MCM) بوده است. حجم مورد نیاز مصرف شرب و صنعت نیز ۳۰۰ MCM بوده که بر این اساس، سهم بخش کشاورزی ۱۳۹۴ MCM برآورد می‌گردد. از این مقدار، آب کامل مورد نیاز برنج (بر مبنای ۱۷۰۰ میلیمتر در هکتار) ۱۱۶/۲ MCM برآورد شد که نهایتاً حجم ۱۲۷۷/۷ MCM را برای استفاده در مدل و توزیع بین شبکه‌ها و محصولات مختلف را نتیجه می‌دهد.

با اجرای مدل بهینه‌سازی در گام اول انجام محاسبات توابع عملکرد محصولات بر اساس راندمان آبیاری ۵۰ درصد به ازای مقادیر مختلف شوری آب (EC برحسب ds/m) و با استفاده از نتایج زیر مدل اول، مطابق با اشکال ۳ تعیین می‌گردد.

ملاحظه می‌شود که توابع عملکرد با توجه به افزایش مقادیر شوری آب تغییرات قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند این تغییرات بویژه برای محصولات یونجه و سیب زمینی محسوس‌تر می‌باشد.

بر اساس تابع عملکرد محصولات مختلف درون یک شبکه (خروجی مدل اول)، مدل دوم ساخته و این مدل به ازای دبی‌ها و مقادیر مختلف شوری آب اجرا و توابع عملکرد شبکه‌ها مطابق با شکل ۴ تعیین می‌گردد.

مشاهده می‌گردد که به ازای مقادیر EC پائین‌تر از 4ds/m توابع عملکرد شبکه‌ها تغییر محسوسی از خود نشان نمی‌دهند، ولی با افزایش شوری عملکرد شبکه‌ها کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کنند. در جدول ۳ میزان بهینه‌سازی آب تحویلی به هر شبکه به ازای مقادیر مختلف

مخزن سد ( $K$ ) و همچنین بزرگتر یا مساوی حداقل حجم آب موردنیاز برای تامین نیازهای شرب و صنعت ( $S_{min}$ ) باشد.

$$S_{min} \leq S_{t+1} \leq K \quad (35)$$

شایان ذکر می‌باشد که حجم آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی در این دوره، پس از آنکه آب لازم برای بخش‌های شرب، صنعت و آب کامل مورد نیاز برنج تامین شده، به مدل وارد گردید.

### ۲-۳-۴- مدل توسعه یافته برای بهینه‌سازی

بهینه‌سازی سیستم به صورت یکپارچه از طریق کد نویسی در محیط Visual Basic 6.0 و با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی نرم افزار Lingo انجام می‌شود و در آن مدل توسعه یافته، آب تحویلی را بر اساس راندمان مورد نظر به طور بهینه و بر اساس دور آبیاری طی دوره رشد، الگوی کشت و شبکه‌های آبیاری به نحوی توزیع می‌کند که حداکثر عملکرد برای هر گیاه، و حداکثر درآمد برای هر شبکه و نهایتاً کل سیستم حاصل گردد. بدین منظور برای اجرای مدل بهینه‌سازی دو گام ذیل در نظر گرفته می‌شود:

#### گام اول: تعیین توابع عملکرد بهینه محصولات و شبکه‌ها به ازای مقادیر مختلف شوری آب آبیاری

در این گام ابتدا زیر مدل اول برای هر محصول به ازای احجام مختلف آب و مقادیر مختلف شوری آب اجرا و سپس با استفاده از آنها عملکرد متناظر محصول محاسبه و نهایتاً تابع عملکرد تعیین می‌گردد. در مرحله بعد، بر اساس تابع عملکرد محصولات مختلف درون یک شبکه (خروجی مدل اول)، مدل دوم ساخته و این مدل به ازای دبی‌ها و مقادیر مختلف شوری آب اجرا گردید تا تابع عملکرد شبکه‌ها محاسبه شود.

#### گام دوم: اجرای مدل بهینه‌سازی سیستم

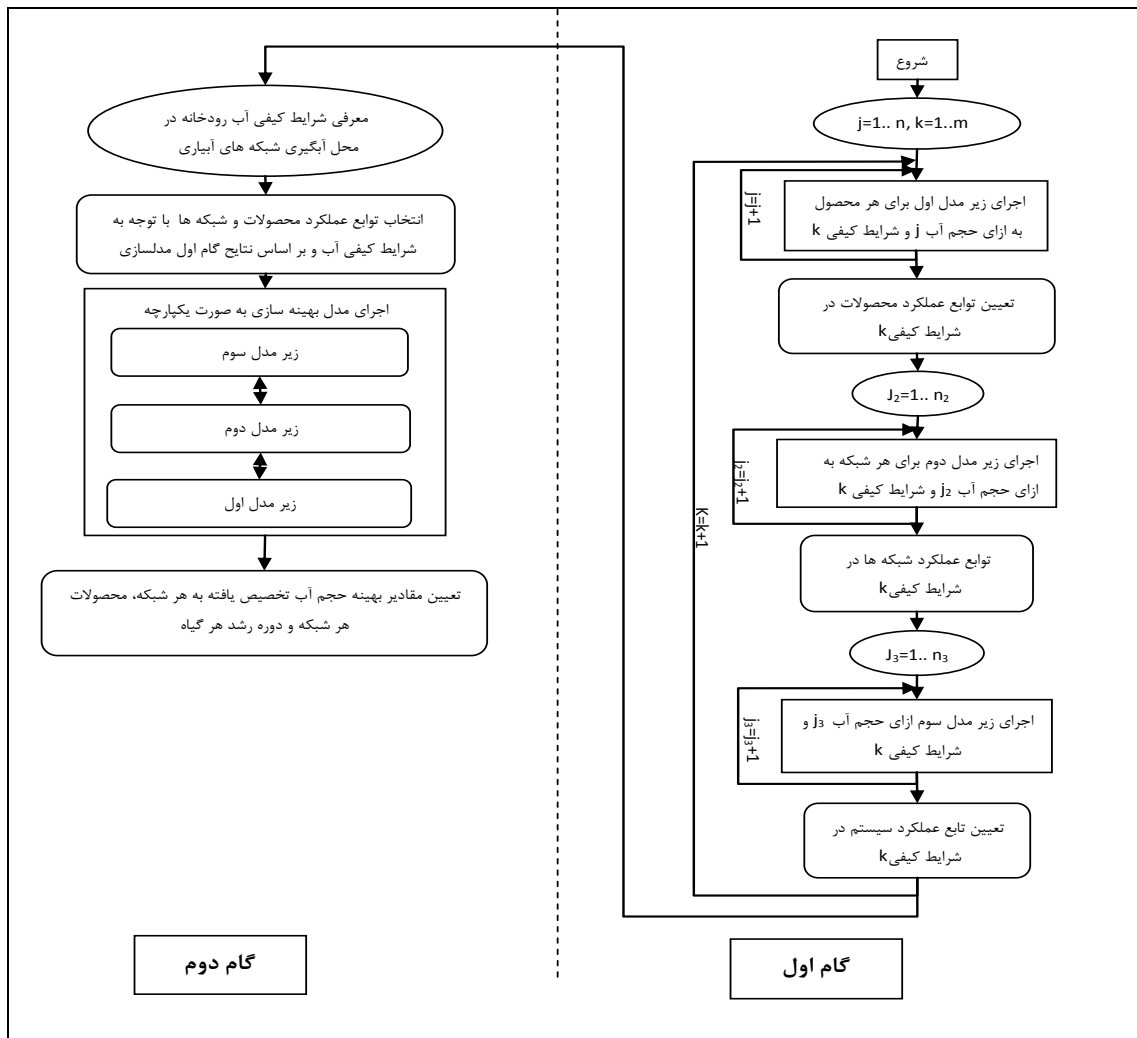
در این مرحله الگوریتم بهینه‌سازی تخصیص با توجه به میزان آب تحویلی به بخش کشاورزی و میزان تغییرات شوری در طول رودخانه اجرا می‌گردد. بدین منظور ابتدا توابع عملکرد هر گیاه در هر شبکه و همچنین تابع عملکرد شبکه‌ها با توجه به میزان شوری آب در محل آبیاری از رودخانه انتخاب و بر اساس آنها تابع هدف مدل بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات مختلف در یک شبکه (زیر مدل دوم) و بهینه‌سازی توزیع آب بین شبکه‌ها (زیر مدل سوم) تعیین می‌گردد. در نهایت مدل بهینه‌سازی در یک محیط یکپارچه و با لحاظ ارتباط زیر مدل‌ها اجرا می‌شود. بدین منظور با فراخوانی هر زیر مدل در محیط نرم افزاری توسعه یافته شده، خروجی‌های هر زیر مدل (حجم بهینه‌سازی و حجم بهینه تخصیص یافته به هر



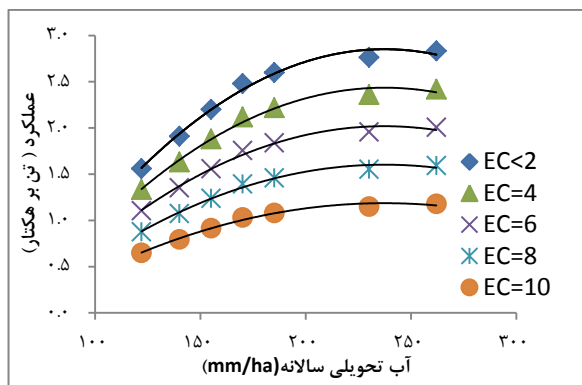
در شکل ۵ میزان عملکرد شبکه‌ها و سیستم به ازای مقادیر مختلف شوری آب مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش شوری افت قابل توجهی در میزان درآمد شبکه‌ها و کل سیستم حاصل می‌شود. در این مورد با افزایش مقدار شوری نرخ تغییرات درآمد بیشتر شده به گونه‌ای که با افزایش شوری در بازه  $7-10 \text{ ds/m}$  کاهش درآمد کل سیستم نسبت به حالت پایه (بدون در نظر گرفتن اثرات شوری) از ۴۳ میلیارد ریال تا ۱۰۳ میلیارد ریال می‌باشد.

به منظور بررسی عملکرد مدل با توجه به نحوه تغییرات شوری آب در طول رودخانه، دو سناریوی برای تغییرات کیفی آب رودخانه زاینده‌رود در نظر گرفته و نتایج مقایسه گردید:  
 - سناریوی اول: افزایش تدریجی شوری آب در طول رودخانه (ایستگاه ۳-۷ در شکل ۱) در بازه  $6-8 \text{ ds/m}$   
 - سناریوی دوم: افزایش تدریجی شوری آب در طول رودخانه (ایستگاه ۳-۷ در شکل ۱) در بازه  $8-10 \text{ ds/m}$

EC آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان آب تخصیص یافته به هر شبکه لزوماً با تغییرات شوری آب متناسب نمی‌باشد و مدل بهینه سازی بر اساس معادله بیلان آب و املاح در خاک میزان تخصیص آب بهینه‌را در طول دوره رشد گیاه و متناسب با آن در سطح محصولات هر شبکه و شبکه‌ها تعیین می‌کند. همچنین نتایج بیانگر آن است که میزان تخصیص آب در بازه شوری  $(0-4) \text{ ds/m}$  ثابت و بتدریج با افزایش شوری آب تغییرات اندکی در حجم آب تخصیص یافته شده ایجاد می‌گردد. بیشترین تغییرات حجم از حدود ۱ درصد در شبکه رودشت تا حدود ۸ درصد در سیستم‌های آبیاری کوچک در منطقه متغیر هست. هر چند تغییر چشم گیری در الگو و میزان تخصیص آب به شبکه‌های آبیاری به واسطه تغییر در شوری آب ایجاد نمی‌گردد اما کاهش کیفیت آب می‌تواند منجر به اثرات قابل توجهی در توزیع آب در طول دوره رشد محصولات، کاهش عملکرد محصول و همچنین درآمد سیستم داشته باشد.



شکل ۲- الگوریتم بهینه‌سازی مدل تخصیص منابع آب



(ه)

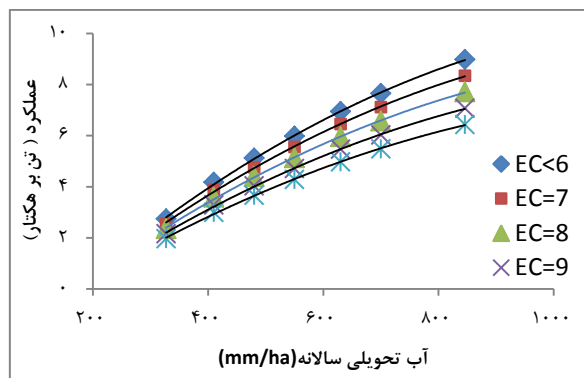
شکل ۳- توابع عملکرد الف) گندم، ب) جو، ج) چغندر قند، د) سیب زمینی و ه) یونجه (چین اول) بر اساس مقادیر مختلف شوری آب

در شکل ۶ میزان آب تخصیص یافته و درآمد متناظر شبکه‌ها بر اساس دو سناریوی مذکور با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد که میزان حجم آب تخصیصی در هر دو سناریو تغییرات اندکی داشته و بجز شبکه‌های آبشارچپ، برخوار و مهیار، میزان حجم آب پیشنهادی برای سایر شبکه‌ها در سناریوی اول بیشتر و یا برابر با سناریوی دوم می‌باشد. اما میزان درآمد شبکه‌ها در سناریوی دوم به طور محسوسی نسبت به سناریوی اول کاهش می‌یابد. در این حالت بیشترین میزان کاهش درآمد برای شبکه‌های آبشار راست و رودشت به ترتیب با ۳۵ و ۳۳ میلیارد ریال کاهش و کمترین میزان کاهش درآمد در شبکه‌های نکوآباد راست و سیستم‌های آبیاری کوچک با ۱/۴ و ۱/۲ میلیارد ریال کاهش برآورد می‌گردد. این تغییرات ناشی از کاهش کیفیت آب در طول مسیر رودخانه و محل آگیری هر شبکه می‌باشد که می‌تواند در نحوه توزیع آب در سطح شبکه‌ها، محصولات هر شبکه و همچنین دوره رشد آنها موثر واقع گردد.

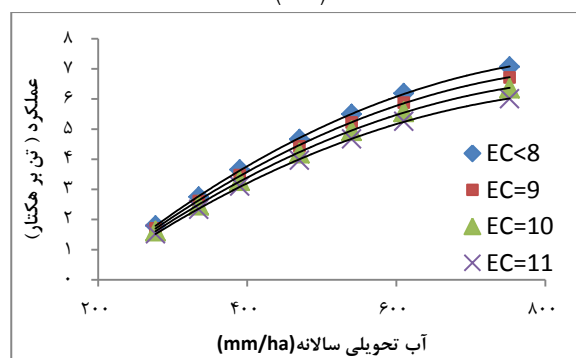
#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاشی بود جهت ارائه روش بهینه‌سازی تخصیص منابع آب با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی آب به منظور مدیریت خشکسالی شبکه‌های آبیاری زاینده‌رود در سال آبی ۱۳۷۸-۷۹ که نتایج زیر از آن قابل ارائه می‌باشد:

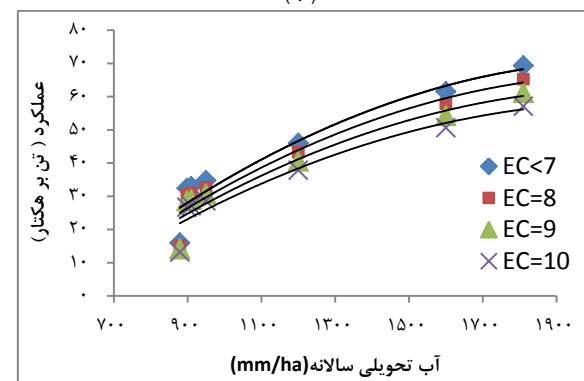
۱- سیستم مدل‌سازی سه لایه مورد استفاده در این تحقیق، به خوبی توانست محاسبات لازم را برای تخصیص و توزیع آب بین شبکه‌ها، محصولات کشاورزی و برنامه ریزی آبیاری با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب پوشش دهد.



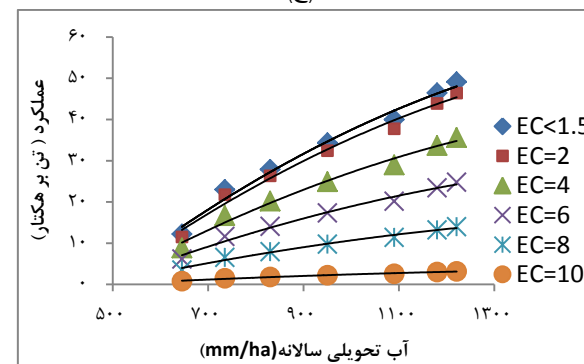
(الف)



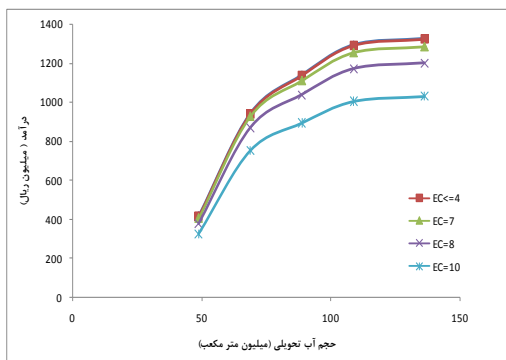
(ب)



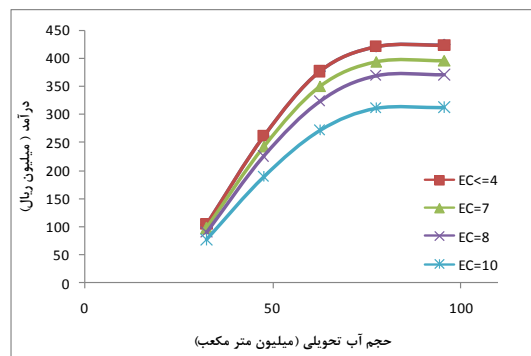
(ج)



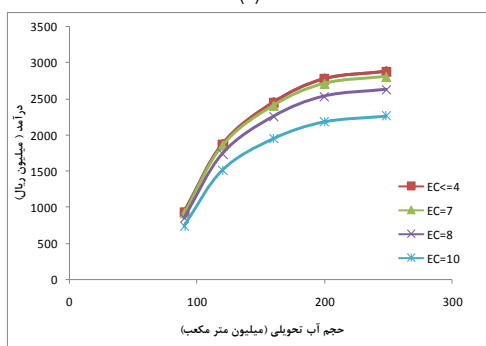
(د)



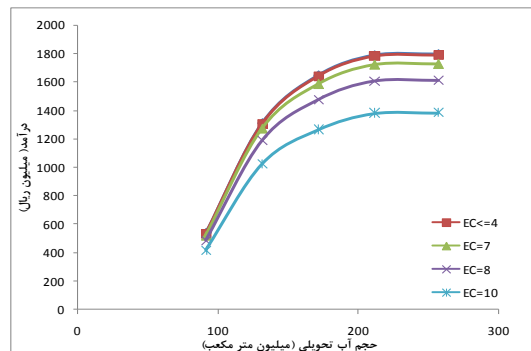
(ه)



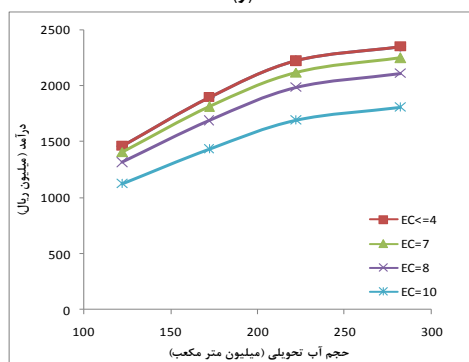
(الف)



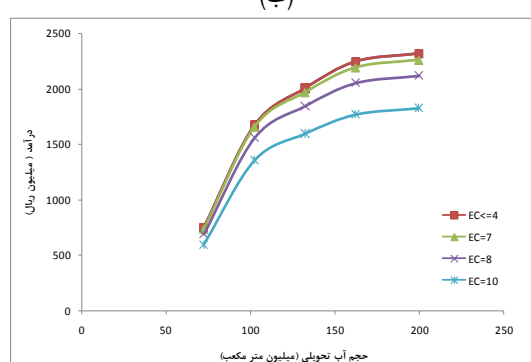
(و)



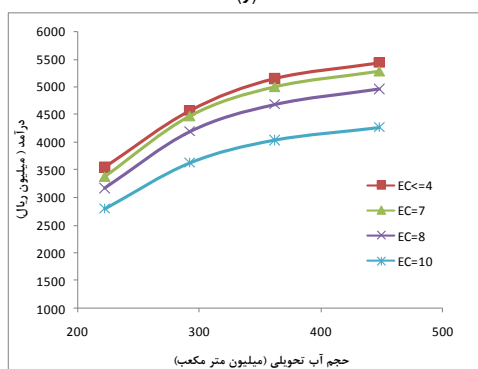
(ب)



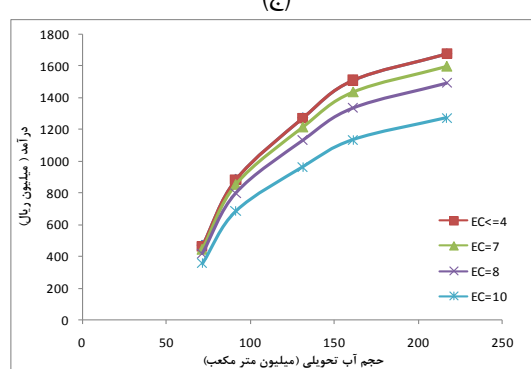
(ز)



(ج)



(ح)

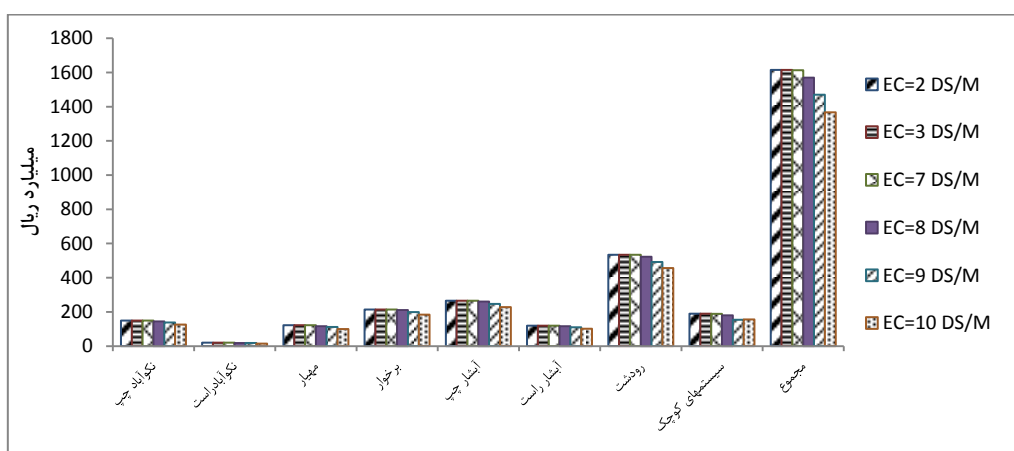


(د)

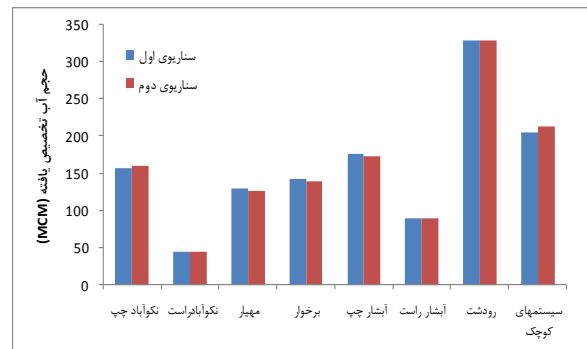
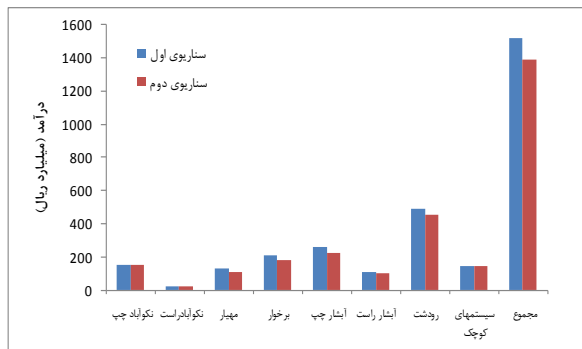
شکل ۴- توابع عملکرد الف) شبکه نکو آباد چپ، ب) نکوآباد راست، ج) مهیار، د) برخوار، ه) آبشار چپ، و) آبشار راست، ز) رودشت و ح) سیستم‌های آبیاری کوچک به ازای مقادیر مختلف EC آب بر حسب ds/m

جدول ۳- میزان تخصیص بهینه به شبکه‌های آبیاری (میلیون متر مکعب) در سال آبی (۷۹-۱۳۷۸) بر اساس مقادیر مختلف شوری آب

EC(ds/m) شبکه آبیاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نکوآباد چپ	۱۵۳	۱۵۳	۱۵۳	۱۵۳	۱۵۲/۹۹	۱۵۶/۱۹	۱۵۲/۹۹	۱۵۳/۵۶	۱۵۶/۸۲	۱۵۳/۸۷
نکوآباد راست	۴۱/۳۲	۴۱/۳۲	۱۴۱/۳۲	۴۱/۳۴	۴۱/۳۵	۴۳/۴۱	۴۱/۳۹	۴۰/۳۷	۴۲/۲	۳۹/۷۸
مهیار	۱۲۴/۴۵	۱۲۴/۴۵	۱۲۴/۴۵	۱۲۴/۴۵	۴۶	۱۲۸/۴۳	۱۲۴/۴۷	۱۲۳/۹۵	۱۲۷/۶۸	۱۲۳/۴۸
برخوار	۱۴۰/۸۲	۱۴۰/۸۲	۱۴۰/۸۲	۱۴۰/۸۱	۱۴۰/۸۱	۱۴۲/۵۶	۱۴۰/۸	۱۴۱/۱۹	۱۴۲/۹۱	۱۴۱/۳۵
آبشار چپ	۱۷۵/۵۷	۱۵۷/۵۷	۱۷۵/۵۷	۱۷۵/۵۶	۱۷۵/۵۵	۱۷۷/۷۹	۱۷۵/۵۴	۱۷۶/۰۸	۱۷۸/۲۸	۱۷۶/۳
آبشار راست	۹۱/۲۸	۹۱/۲۸	۹۱/۲۸	۹۱/۲۷	۹۱/۲۷	۹۲/۶۵	۹۱/۲۶	۹۱/۵۴	۹۲/۸۷	۹۱/۶۱
رودشت	۳۳۱/۲۴	۳۳۱/۲۴	۳۳۱/۲۴	۳۳۱/۲۴	۳۳۱/۲۳	۳۳۳/۶۵	۳۳۱/۲۲	۳۳۱/۴۳	۳۳۳/۸۸	۳۳۱/۶۷
سیستمهای کوچک	۲۲۰/۰۳	۲۲۰/۰۳	۲۲۰/۰۳	۲۲۰/۰۳	۲۲۰/۰۳	۲۰۳/۰۲	۲۲۰/۰۴	۲۱۹/۵۸	۲۰۳/۰۵	۲۱۹/۶۴
جمع	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷	۱۲۷۷/۷



شکل ۵- مقایسه درآمد شبکه‌ها بر اساس مقادیر مختلف شوری آب در سال آبی (۷۹-۱۳۷۸)



شکل ۶- مقایسه میزان حجم آب تخصیص یافته و درآمد شبکه‌ها بر اساس سناریوهای مختلف تغییر شوری آب در سال آبی (۱۳۷۸-۷۹)

علیزاده ا (۱۳۸۰) طرح پروژه ملی (توتک) بهینه‌سازی الگوی مصرف آب کشاورزی در ایران. سازمان هواشناسی کشور و وزارت جهاد کشاورزی.

Allen R G, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300p.

Das B, Singh A, Panda S N, Yasuda H (2015) Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. Land Use Policy 42:527-537.

Doorenbos J, Pruitt WO (1984) Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper 24. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy, 35-48.

Droogers P, Torabi M (2002) Field scale scenarios for water and salinity management by simulation modeling. IAERI-IWMI Research Reports 12.

English M J, Raja S N (1996) Perspective on deficit irrigation. Agri Water Manag. 32: 1-14.

Feinerman E, Yaron D (1983) Economics of irrigation water mixing within a farm framework Water Resources Research 19:337-345.

Ghahraman B, Sepaskhah A R (2004) Linear and non-linear optimization models for allocation of alimited water supply. Irrigation and Drainage 53:39-54.

Lety J, Dinar A, Knapp KC (1985) Crop-water production function model for saline irrigation waters. Soil Science Society of America Journal 49(4):1005-1009.

Mass EV, Hoffman G J (1977) Crop salt tolerance current assessment. J.Irrigation and Drainage Division, ASCE 103:115-134.

McNeal B, Land Coleman NT (1966) Effect of solution and hydraulic conductivity. Soil Science 30:308-312.

۲- در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب به ازای مقدار معین آب قابل دسترس، با افزایش شوری تا ۶ دسی زیمنس بر متر، کاهش عملکرد برای گندم، جو و چغندر قند بسیار کم می‌باشد. در این شرایط محصولات یونجه و سیب زمینی حساسیت بیشتری از خود نشان داده و به طور متوسط با افزایش شوری از ۲ ds/m به ۱۰ ds/m به ترتیب ۶۰ و ۹۱ درصد کاهش عملکرد از خود نشان می‌دهند.

۳- تغییرات ناشی از کاهش کیفیت آب در طول مسیر رودخانه و محل آبیگری هر شبکه در نحوه توزیع آب در سطح شبکه‌ها محصولات هر شبکه و همچنین دروه رشد آنها بسیار موثر می‌باشد.

۴- توابع عملکرد شبکه‌ها میزان تخصیص آب به ازای مقادیر EC پائینتر از 4ds/m تغییر محسوسی از خود نشان نمی‌دهند، ولی با افزایش شوری عملکرد شبکه‌ها کاهش پیدا می‌کنند. در این شرایط میزان آب تخصیص یافته شده به هر شبکه لزوماً با تغییرات شوری آب متناسب نمی‌باشد و مدل بهینه سازی بر اساس معادله بیلان آب و املاح در خاک بهینه ترین میزان تخصیص آب را در طول دوره رشد گیاه و متناسب با آن در سطح محصولات هر شبکه و شبکه‌ها تعیین می‌کند.

۵- با افزایش شوری آب، افت قابل توجهی در میزان درآمد شبکه‌ها و کل سیستم حاصل می‌شود. در این مورد با افزایش مقدار شوری نرخ تغییرات درآمد بیشتر شده به گونه‌ای که با افزایش شوری در بازه ۷-۱۰ ds/m کاهش درآمد کل سیستم نسبت به حالت پایه ( بدون لحاظ اثرات شوری ) از ۴۳ میلیارد ریال تا ۱۰۳ میلیارد ریال می‌باشد.

## ۵- مراجع

فرشی ع ا، شریعتی م ر، جلالی ر، قاسمی م ر، شهابی فر م، فولادی س م (۱۳۷۶) برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور، جلد اول گیاهان زراعی. موسسه تحقیقات خاک و آب.



- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, Fereres E (2010b) AquaCrop Reference Manual (Annexes).
- Russo, D and Bakker, D (1987) Crop-water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters. Soil Science Society of America Journal. 51:1554-1562.
- Shangguan Z, Shao M, Horton R, (2002) A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. Agriculture Water Management 52:139-154.
- Steduto P, Hsiao T C, Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water productivity. Irrig. Sci. 25: 189-207.
- Vazifedoust M, Van Dam JC, Feddes RA , Feizi M (2008) Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management 95:89-102.
- Moghaddasi M, Morid S, Araghinejad S, Agha Alikhani M (2008) Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: the 1999 drought in the zayandeh rud irrigation system (iran). Journal Irrigation and Drainage. From <http://www.interscience.wiley.com>.
- Munns R, Termaat A (1986) Whole plant responses to salinity. Australian Journal of Plant Physiology 13:143-160.
- Paul S, Sudhindra N P, Kumar D N, (2000) Optimal irrigation allocation: A multilevel, Approach. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering 126:149-154.
- Prasad A S, Umamhesh N V, Viswanath G K (2011) Optimal irrigation planning model for an existing storage based irrigation system in India. Irrigation Drainage Systems 25(1):19-38.
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, Fereres E (2010a) Aqua Crop – The FAO crop model to simulate yield response to water, Reference Manual.