

# مقایسه‌ی روش‌های الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک در تخمین یکنواختی توزیع آب در روش آبیاری بارانی

حسن ترابی پوده<sup>۱\*</sup>، حسن گلیج<sup>۲</sup>، ناصر نیک‌نیا<sup>۳</sup> و فریدون امیدیناسب<sup>۴</sup>

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان torabi1976@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۸

## چکیده

اندازه‌گیری ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی ثابت از روی نتایج یک آب پاش منفرد با توجه به لحاظ هم پوشانی آب پاش‌های مجاور و در مقادیر مختلف فشار کارکرد، ارتفاع پایه آب پاش، فاصله آب پاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر کاری وقت‌گیر می‌باشد. تعیین بهترین ترکیب از پارامترهای فوق که بالاترین ضریب یکنواختی توزیع آب را حاصل نماید، همواره سؤالی بی‌جواب برای کاربران بوده است. در این پژوهش، مقادیر ضریب یکنواختی توزیع آب پاش مدل ZB ساخت ایران در سه تیمار مختلف فشار کارکرد آب پاش (۲/۵، ۳ و ۳/۵ اتمسفر)، دو تیمار ارتفاع پایه آب پاش (۶۰ و ۱۰۰ سانتی متر) و هفت تیمار آرایش شبکه آب پاش‌ها شامل ۹×۱۲، ۹×۱۵، ۱۲×۱۲، ۱۵×۱۲، ۱۵×۱۸، ۱۲×۱۸، ۱۵×۱۵، ۱۵×۱۸ متر با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان اندازه‌گیری شدند. سپس به روش الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک برنامه‌ای در محیط برنامه نویسی نرم افزار متلب تهیه و روابط مختلف برای تخمین مقدار ضریب یکنواختی با استفاده از پارامترهای ذکر شده مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج، مجذور میانگین مربعات خطا و انحراف معیار نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده حاصل از محاسبات الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک مشخص شد که هر دو روش در برآورد معادله‌ی نهایی ضریب یکنواختی از دقت خوبی برخوردارند، بنابراین می‌توان آنها را در برآورد ضریب یکنواختی بکار برد.

**کلیدواژه‌ها:** ضریب یکنواختی، توزیع آب، آبیاری بارانی، الگوریتم ازدحام جمعیت، الگوریتم ژنتیک.

## Comparison of PSO and GA Algorithm in Estimation of The Water Distribution Uniformity in Sprinkler Irrigation Method

H. Torabi Poudeh<sup>1\*</sup>, H. Goleij<sup>2</sup>, N. Niknia<sup>3</sup> and F. Omidinasab<sup>4</sup>

1\* - Assistant Professor Water Structure of Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Ph.D. Student In Water Structure of Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Ph.D. Student In Water Structure of Lorestan University, Khorramabad, Iran

4-Assistant Professor of Civil Engineering in Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 29 December 2013

Accepted: 16 December 2014

## Abstract

Determination of water distribution uniformity of coefficient of sprinkler irrigation based on

data of a single sprinkler is time consuming due to overlapsprinkling by neighboring sprinklers and also different pressure heads, riser heads, sprinkler gaps on laterals and the distance between laterals. The best combination of the mentioned parameters to achieve maximum water distribution uniformity of coefficient, is still unknown question for applicators. In this research, water distribution uniformity of coefficient of ZB model sprinkler (made in Iran) were measured at Hashemabad cotton research station of Gorgan under 3 different pressure heads (2.5, 3 and 3.5 atm), two riser heads (60 and 100 cm) and seven sprinkler (Sl×Sm including 9×12, 9×15, 12×12, 15×12, 12×18, 15×15, 15×18m) arrangements. Two different algorithms namely PSO and GA were developed in MATLAB to determine water distribution uniformity of coefficient parameters with respect to mentioned parameters. based on statistical parameters such as coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and also standard deviation (SD) the performance of these algorithms were investigated. The results show that both of them can accurately predict water distribution uniformity of coefficient and therefore they can be used in determination of water distribution uniformity of coefficient.

**Keywords:** Uniformity coefficient, Water distribution, Sprinkler irrigation, PSO algorithm; GA algorithm.

بارانی را بهبود بخشید. روابط مختلفی جهت اندازه‌گیری ضریب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی ثابت که در آن آب‌پاش‌ها در زمان آبیاری تغییر مکان نمی‌دهند شامل: ضریب یکنواختی به روش هاوایی (علیزاده، ۱۳۸۵)، ضریب یکنواختی کریستیانسن (ووریس و برنوت<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶)، ضریب یکنواختی مریام و کلر<sup>۲</sup> (۱۹۷۸)، ضریب یکنواختی کارملی<sup>۳</sup> (۱۹۹۷) و ضریب یکنواختی هارت و رینولدز<sup>۴</sup> (۱۹۶۵) ارائه شده است، ولی دابوس<sup>۵</sup> (۱۹۶۲) به روش آماری نشان داد که ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن در مقایسه با دیگر روابط، از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد. باوی و همکاران (۱۳۸۵) به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف فشار کارکرد، فواصل و آرایش آب‌پاش‌ها بر یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی نشان دادند که با افزایش فشار کارکرد، ضریب یکنواختی توزیع کریستیانسن به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد (افزایش فشار از ۳۵ متر به ۴۰ متر، ضریب یکنواختی توزیع آب را در مقایسه با افزایش فشار کارکرد از ۴۰ متر به ۴۵ متر بیشتر افزایش می‌دهد)، همچنین با افزایش نسبت فواصل آب‌پاش‌ها به قطر پراکنش، ضریب یکنواختی کاهش یافته و آرایش مربعی و مستطیلی به ترتیب حداکثر و حداقل ضریب یکنواختی توزیع آب را به همراه داشته‌اند. اسی<sup>۶</sup> (۲۰۰۹) میانگین ضریب یکنواختی توزیع آب را در فواصل ۱۲ در ۱۲ و ۱۸ در ۱۸ متر برابر ۹۱ درصد و ۸۷ درصد به دست آورد. مونترو و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۳) نتیجه گرفتند که فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی مؤثر بر توزیع آب در آبیاری

### مقدمه

بر اساس شاخص سازمان ملل، ایران هم اکنون در بحران شدید آبی قرار گرفته و بر اساس شاخص موسسه بین‌المللی مدیریت آب نیز، ایران در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد. بنا به گزارش این موسسه بین‌المللی، ایران برای حفظ منابع خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید. که این مقدار با توجه به امکانات و منابع موجود غیر ممکن به نظر می‌رسد. لذا وضعیت موجود آب کشور باید جزو دغدغه‌ها و نگرانی‌های کارشناسان و مدیران بوده و برای حل این معضل لازم است با اتخاذ تصمیمات اصولی و کارساز مانع گسترش این بحران شد. با توجه به پایین بودن راندمان آبیاری در کشور، تأمین نیاز آبی کامل بخش کشاورزی به منابع آبی بیشتری نیاز دارد که برای شرایط اقلیمی ایران افزایش منابع آبی مشکل بوده و باید ارتقاء بهره‌وری آب را به عنوان مهم‌ترین راه مقابله با کم‌آبی در نظر گرفت. در این راستا گسترش سیستم‌های آبیاری بارانی به لحاظ توانمندی زیاد در توزیع آب با راندمان قابل توجه، راه‌کاری مطمئن برای استفاده بهینه از منابع آب می‌باشد. با هدف توسعه کمی، کیفیت کار یا عملکرد این گونه طرح‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. خوشبختانه همراه با توسعه روش‌های آبیاری بارانی در سال‌های اخیر در کشور تولید و ساخت وسایل و ابزار مختلف آن نیز رونق یافته است. یکی از این وسایلی که با تنوع تولید روبه‌رو بوده و علاوه بر آن، شرکت‌های داخلی مشابه انواع خارجی را تولید می‌کنند، آب‌پاش است. با توجه به عدم ارائه مشخصات فنی و هیدرولیکی این آب‌پاش‌ها لازم است تا با تغییرات ساده‌ای چون ایجاد تغییر فشار در سیستم، تغییر ارتفاع پایه‌های آب‌پاش، تنظیم فاصله آب‌پاش‌ها روی لوله جانبی و همچنین فاصله لوله‌های جانبی از هم (آرایش شبکه)، یکنواختی توزیع آب و عملکرد سیستم آبیاری

- 1 - Vories and Bernuth
- 2 - Merriam and Keller
- 3 - Karmeli
- 4 - Hart and Reynolds
- 5 - Dabbous
- 6- OSEI
- 7 - Montero *et al.*

بارانی است. کلر و بلیسنر<sup>۱</sup> (۱۴) دریافتند در فشار کم به دلیل ریزش بیشتر آب در فواصل نزدیک به آبپاش و در فشار بالا به دلیل تولید قطرات ریزتر و حساس تر به باد، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. اندازه گیری مقدار ضریب یکنواختی با استفاده از نتایج یک آبپاش منفرد با توجه به هم‌پوشانی نمودن آبپاش‌های مجاور صورت می‌گیرد که گاهی همراه با استفاده از نرم‌افزارهای خاصی است، به دلیل تخصصی بودن از عهده زارعین و کاربران خارج بوده و کار وقت‌گیری خواهد بود. ضمن این که مقدار ضریب یکنواختی حاصل از هر آبپاشی در مقادیر مختلف فشار کارکرد آبپاش، ارتفاع پایه آبپاش، فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر تغییر می‌یابد. بنابراین ضروری است در وضعیت‌های مختلف از پارامترهای ذکر شده که تعداد آزمایش‌ها را نیز به تعداد بسیار زیاد افزایش می‌دهد، مقدار ضریب یکنواختی اندازه گیری شود تا شرایط متناسب برای حصول حداکثر ضریب یکنواختی از هر آبپاش برای استفاده زارعین توصیه گردد. برای پرهیز از مشکل فوق، استفاده از روشی که بتواند مقادیر ضریب یکنواختی را با دقتی قابل قبول و با کار عملی و محاسباتی کمتر و در زمانی کوتاه‌تر در شرایط مختلفی از فشار کارکرد، ارتفاع پایه آبپاش، فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر تخمین بزند، ضروری به نظر می‌رسد. امروزه استفاده از روش‌های نوین هوشمند به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه محققان قرار گرفته است. از میان الگوریتم‌های هوشمند الگوریتم ازدحام جمعیت<sup>۲</sup> یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه‌ی دسته به کار گرفته شد. در الگوریتم ازدحام جمعیت، ذرات<sup>۳</sup> در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگان‌شان است. بنابراین موقعیت دیگر توده<sup>۴</sup> ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دست آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. اساس کار الگوریتم ازدحام جمعیت بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل

همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. الگوریتم ازدحام جمعیت اولین بار توسط توسط آقایان کندی و ابرهات<sup>۵</sup> (۱۹۹۵) ارائه شد. الگوریتم ژنتیک که روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار (موجودات زنده) است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها، از آن به عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. الگوریتم جستجوی ژنتیکی روشی است که به صورت موازی و چند جانبه از نقاط مختلفی از فضا حل، جستجو را آغاز می‌کند. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی اختراع شده است و به طور موثری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند، تا حل‌های جدید و بهبود یافته را ایجاد کند. اساس این الگوریتم قانون تکامل داروین (بقا بهترین) است که می‌گوید: موجودات ضعیف‌تر از بین می‌روند و موجودات قوی‌تر باقی می‌مانند. این روش در سال ۱۹۷۵ میلادی توسط جان هولند (گولدبرگ<sup>۶</sup>، ۲۰۰۷) معرفی شد و بعد از آن به طور وسیع در مسائل مهندسی، به‌ویژه در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های لوله، سازه‌های ساختمانی، واسنجی مدل‌های بارش - روان‌آب و آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۷؛ هارونی و همکاران، ۱۹۹۶؛ کومار و ردی<sup>۷</sup>، ۲۰۰۶)، نیز در زمینه علوم آب و به خصوص بهره‌برداری مخزن با استفاده از الگوریتم هجوم ذرات و با بهره‌گیری از تکنیک وزن‌دهی و تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه، همچنین فرآیندهای تکاملی نظیر نخبه‌گرایی و جهش در فرآیند جستجوی تک‌هدفه، مسئله بهره-برداری مخزن با اهداف کشاورزی و برقایی را مورد بررسی قرار دادند. شوریان و موسوی (۱۳۸۵)، در مطالعه خود با استفاده از الگوریتم هجوم ذرات، برای برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز سیروان با اهداف انتقال آب استفاده کردند. کاکویی و عمادی (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم سیستم جامعه مورچگان به توزیع و تحویل بهینه آب در کانال AMX از شبکه آبیاری ورامین پرداختند. افشار (۲۰۱۰) الگوریتم جامعه مورچه‌های پیوسته را برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های فاضلاب به کار برد. یونگ و کارنی<sup>۸</sup> (۲۰۰۶)، برای بهینه‌کردن طول یک شبکه لوله و جایگزین‌کردن وسایل هیدرولیکی در آن به منظور کنترل و کاهش واکنش‌های زودگذر از دو روش ژنتیک و الگوریتم ازدحام جمعیت استفاده نمودند. حداقل‌کردن بیشترین ارتفاع، حداکثر‌کردن کمترین ارتفاع و حداقل‌کردن تفاضل بین بیشترین و کمترین ارتفاع در سیستم به عنوان سه تابع هدف در نظر گرفته شده است. نتایج نشان

5 - Kennedy and Eberhart  
6 - Goldberg  
7 - Kumar and Reddy  
8 - Jung and Karney

1 - Keller and Bliesner  
2 - Particle Swarm Optimization  
3 - Particle  
4 - Swarm

۱۶ متری در اطراف آب پاش چیده شد. بنابراین لیوان‌های جمع‌کننده آب در ۱۶ ردیف به موازات لوله فرعی قرار گرفتند به گونه‌ای که فاصله لیوان‌ها بر روی ردیف‌ها و همچنین فاصله ردیف‌ها از هم ۲ متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب هر لیوان در مرکز یک شبکه ۲×۲ متری قرار گرفت. برای تعیین حجم آب داخل لیوان‌ها از یک استوانه مدرج استفاده گردید. دبی آب پاش نیز به طریق حجمی و زمان تعیین شد. از هنگام روشن شدن موتور تا ثابت شدن دبی و تنظیم فشار آب پاش از طریق شیر فلکه لوله رانش، سطلی بر روی آب پاش قرار داده شده و به محض ثابت شدن فشار، سطل از روی آب پاش برداشته و به مدت تقریبی ۱ تا ۱/۵ ساعت آزمایش ادامه یافت. در صورت افزایش سرعت باد از مرز ۲ متر در ثانیه، آزمایش متوقف می‌گردد. با توجه به نزدیکی محل آزمایش به ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان (۲۰۰ متری) از آمار باد این ایستگاه استفاده گردید. در این پروژه فشار نازل در نقطه ای که جت آب در نازل اصلی (نازل بزرگ تر) فشرده می‌شود از طریق یک فشارسنج همراه با یک لوله پیتو اندازه‌گیری شد. بعد از ۱ تا ۱/۵ ساعت پاشش آب در داخل لیوان‌ها، پمپ خاموش و حجم آب داخل هر لیوان قرائت گردید. سپس حجم آب داخل هر لیوان با توجه به قطر لوله بالایی لیوان به عمق معادل تبدیل شد و در نهایت با فرض یکسان بودن آب پاش‌ها و لوله‌های فرعی و مشابه‌سازی عمق آب داخل لیوان‌ها در حالت‌های مختلف از فاصله آب پاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر، ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن برای تیمارهای مختلف ارتفاع پایه آب پاش و فشار کارکرد آب پاش اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که برای منظور نمودن اثر تبخیر بر عمق آب داخل لیوان‌ها تعداد هفت لیوان حاوی ۵، ۴۰، ۳۰، ۱۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر آب در هر نوبت آزمایش در مجاورت طرح قرار داده شد و در صورت تبخیر، مقدار آب تبخیر شده با توجه به عمق آب باقی مانده در این لیوان‌ها و لیوان‌های تحت آزمایش به لیوان‌های تحت آزمایش اضافه گردید.

در این پژوهش، مقادیر ضریب یکنواختی توزیع آب پاش مدل ZB ساخت ایران در سه تیمار مختلف فشار کارکرد آب پاش (۳، ۲/۵ و ۳/۵ اتمسفر)، دو تیمار ارتفاع پایه آب پاش (۶۰ و ۱۰۰ سانتی متر) و هفت تیمار آرایش شبکه آب پاش‌ها شامل ۱۲×۱۵، ۹×۹، ۱۲×۱۲، ۱۲×۱۵، ۱۵×۱۸، ۱۲×۱۸، ۱۵×۱۵، ۱۵×۱۸ متر با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری ضریب یکنواختی کریستیانسن (ووربس و برنوت، ۱۹۸۶) نیز رابطه (۱) به شکل زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$CV = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_i - \bar{X}}{n \cdot \bar{X}}}{n}\right) \times 100 \quad (1)$$

داد که این دو روش نسبتاً یکسان عمل کرده‌اند. زانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از یک الگوریتم آزاد بر اساس شبیه سازی روش الگوریتم هجوم ذرات روش جدیدی را برای زمان‌بندی نیروی محرکه کوتاه مدت مخزن ارائه کردند. با توجه به منابع ذکر شده تاکنون پژوهش مشابهی در راستای تخمین یکنواختی توزیع آب در روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از شبیه سازی روش الگوریتم هجوم ذرات و الگوریتم ژنتیک مشاهده نشد و این پژوهش اولین پژوهشی است که در این خصوص صورت می‌پذیرد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، تعیین بهترین رابطه غیرخطی تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی برای آب پاش مدل ZB ساخت داخل کشور از روی پارامترهای مؤثر بر آن (شامل فشارهای کارکرد ۲۵، ۳۰، ۳۵ متر، ارتفاع پایه آب پاش ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری و فواصل مختلفی از آب پاش‌ها) با استفاده از روش‌های الگوریتم هجوم ذرات و الگوریتم ژنتیک و همچنین مقایسه دقت آن‌ها در تخمین ضریب یکنواختی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

این طرح در ایستگاه تحقیقات کشاورزی هاشم‌آباد شهر گرگان وابسته به موسسه تحقیقات پنبه کشور در حدود ۱۱ کیلومتری شمال غربی گرگان اجرا شد. این محل در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی واقع است. در این پژوهش از یک موتور پمپ لیستر گازوئیلی برای تأمین فشار استفاده گردید. به لوله رانش پمپ یاد شده یک لوله فرعی به طول ۸۴ متر از جنس آلومینیوم به قطر ۳ اینچ متصل شد. بر روی این لوله که انتها آن با یک درپوش انتهایی مسدود شده بود، آب پاش مدل ZB ساخت داخل کشور به فاصله ۴۸ متری انتها لوله بر روی پایه آب پاش مورد نظر نصب گردید. برای تنظیم و کنترل فشار از دو فشارسنج یکی بر روی لوله رانش پمپ و دیگری بر روی آب پاش استفاده شد. فشار کارکرد آب پاش از طریق شیر فلکه‌ای که بر روی لوله رانش پمپ قرار داشت، تنظیم گردید. در ضمن آب مازاد بر نیاز یک آب پاش و در حال جریان در لوله فرعی از طریق آب پاش‌هایی که در انتها لوله فرعی و در فاصله ۳۵ متری از آب پاش تحت مطالعه قرار داده شده بودند، خارج می‌شد. در نتیجه آب خروجی از آب پاش‌های انتهایی هیچ گونه هم-پوشانی با محدوده پاشش آب پاش تحت مطالعه ایجاد نمی‌کرد. در این پروژه برای تعیین شدت پاشش از لیوان‌های آلومینیومی لوله تیز به قطر ۱۰/۶۸ سانتی‌متر و در یک شبکه مربعی شکل به ابعاد ۲×۲ متر در اطراف آب پاش تحت مطالعه استفاده گردید. باید توجه داشت که در زمان جمع آوری آب در داخل لیوان‌ها، سطح لیوان‌ها در طی آزمایش کاملاً افقی باشد. با توجه به حداکثر شعاع پاشش آب پاش در تیمارهای فشار مورد نظر تعداد ۲۵۶ قطعی در یک سطح مربعی شکل تا فاصله

$$Pbest_j = [pbest_{j,1} \ pbest_{j,2} \ \dots \ pbest_{j,g}] \quad (۳)$$

آنگاه تغییر موقعیت ذره بر اساس مقدار لغزش نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$v_{j,g}^{(t+1)} = wv_{j,g}^{(t)} + c_1 \cdot Rand() (Pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot rand() (gbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) \quad (۴)$$

$$v_{\min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_{\max}$$

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)} \quad \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, n \\ g = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، مقدار  $x$ : بیانگر موقعیت ذره،  $n$ : تعداد ذرات گروه و  $m$ : تعداد اعضای تشکیل دهنده ذره و تابع  $Rand()$  (برای تولید اعضای جامعه) و  $rand()$  (ضرب جهش در تولید اعضای جدید در گام‌های بعدی) تولیدکننده یک مقدار تصادفی بین صفر و یک می‌باشند. در این روابط باید به این نکته توجه داشت که بزرگ بودن  $v_{\max}$  ممکن است باعث شود که ذرات از روی نقطه حداقل عبور کنند و کوچک بودن آن نیز باعث می‌شود که ذره، حول موقعیت خود به چرخش در آمده و قادر به جستجو در فضای آزمون نشود. مقدار  $v_{\max}$  معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد محدوده متغیرها انتخاب می‌شود. از طرف دیگر انتخاب مناسب  $w$  باعث تکرار کمتر الگوریتم برای رسیدن به نقطه بهینه می‌شود. در الگوریتم‌های معمولی ازدحام جمعیت، ضریب  $w$  از مقدار ۰/۹ تا مقدار ۰/۴ در طول اجرای الگوریتم و بر اساس رابطه زیر کاهش می‌یابد:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} * iter \quad (۶)$$

از دیگر مشکلات در اجرای این الگوریتم انتخاب مناسب  $C_1$  و  $C_2$  است. در بسیاری از الگوریتم‌ها، مقادیر  $C_1$  و  $C_2$  به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که  $C_1 + C_2 \leq 4$  باشد.

### روش الگوریتم ژنتیک

مراحل تکثیر، جهش و تبادل ژنی بر روی جمعیت اولیه تولید شده صورت می‌گیرد. به این منظور ابتدا تعداد پاسخ در محدوده تغییر پارامترها حدس زده می‌شود و با تبدیل این اعداد به زنجیره‌ای از اعداد (به عنوان مثال در سیستم دودویی)، مقادیر تابع هدف (اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده ضریب یکنواختی توزیع آب) به ازای این مقدار پاسخ به دست می‌آید، آنگاه پس از انتخاب زنجیره‌های با تابع هدف کمینه و با برگزیدن درصد

در رابطه فوق  $X_i$ ؛ عمق آب معادل جمع شده در هر لیوان،  $\bar{X}$ ؛ میانگین عمق آب معادل جمع شده در لیوان‌ها و  $n$ : تعداد کل لیوان‌ها است.

### الگوریتم ازدحام جمعیت

عملکرد یک الگوریتم ازدحام جمعیت نیز به این گونه است، که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. شایان ذکر است که تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود ذره در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است.

برای شبیه‌سازی این رفتار، پارامترهای زیر تعریف می‌شود:

(الف)  $Pbest$ : این پارامتر، بیانگر بهترین موقعیتی است که هر ذره در طول اجرای الگوریتم می‌تواند کسب کرده باشد.

(ب)  $Gbest$ : این متغیر بهترین موقعیتی را که ذرات در طول اجرای الگوریتم کسب کرده اند، نشان می‌دهد.

(ج) پارامتر شناخت فردی ( $C_1$ ): این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که خود و همسایگانش پیدا کرده اند، حرکت کند. این ضریب، به عنوان ضریب تحریک به کار می‌رود.

(د) پارامتر شناخت اجتماعی ( $C_2$ ): این ضریب که با عنوان ضریب تحریک نیز به کار می‌رود، باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که ذرات تا به حال کسب کرده اند حرکت کند.

(ه) ضریب لختی ( $w$ ): این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و جستجوی کلی در الگوریتم می‌شود.

(و) لغزش ( $v$ ): این پارامتر، تغییر موقعیت ذره در محیط جستجو را نشان می‌دهد.

اکنون فرض کنید ذره  $j$ ام دارای بعد  $g$  باشد که به صورت زیر بیان شود:

$$X_j = [x_{j,1} \ x_{j,2} \ \dots \ x_{j,g}] \quad (۲)$$

و هر ذره دارای یک  $Pbest$  و تمام ذرات دارای یک  $Gbest$  به صورت زیر می‌باشند:

ترابی پوده و همکاران: مقایسه‌ی روش‌های الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک...

$$CU = k_1 + aP^{k_2} + bRH^{k_3} + c(S_l^{k_4} S_m^{k_5}) \quad (11)$$

که در آن P: فشار بر حسب اتمسفر، RH: ارتفاع پایه آبپاش بر حسب سانتی‌متر،  $S_l$  و  $S_m$ : به ترتیب ضریب فاصله آب‌پاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر است.  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ : اعداد ثابتی هستند که به کمک الگوریتم ازدحام جمعیت و الگوریتم ژنتیک بهینه خواهند شد. به منظور تعیین بهترین رابطه غیر خطی تخمین ضریب یکنواختی از روی پارامترهای مؤثر بر آن، روابط غیر خطی ارائه شده در فوق مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش برنامه‌ای در محیط برنامه نویسی نرم افزا متلب برای شبیه‌سازی روش الگوریتم ازدحام جمعیت و الگوریتم ژنتیک (هزارجریبی و همکاران، ۱۳۹۰) تهیه و روابط غیر خطی مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با محاسبه مقادیر ضریب تبیین، میانگین خطا و جذر میانگین مربعات خطا بین داده‌های تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده، بهترین رابطه تعیین ضریب یکنواختی توزیع آب با استفاده از پارامترهای فشار کارکرد آب‌پاش، ارتفاع پایه آب‌پاش، فاصله آب‌پاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر تعیین شد. هرچه مقدار ضریب تبیین به عدد یک، مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و انحراف معیار نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی به صفر و میانگین نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت تخمین هرکدام از الگوریتم‌ها نسبت به دیگری بهتر خواهد بود.

### نتایج و بحث

مقدار ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن با استفاده از اطلاعات حاصل از آزمایش‌های صحرايي برای کلیه تیمارهای فشار و ارتفاع پایه آبپاش و آرایش شبکه آب‌پاش‌ها اندازه‌گیری گردید (جدول ۱).

پس از سعی و خطا در مدل الگوریتم ازدحام جمعیت برای رسیدن به کمترین مقدار رابطه (۱) مقدار تکرار برابر ۳۰۰، تعداد جمعیت اولیه برابر ۲۰۰، پارامتر شناخت فردی ( $C_1$ ) برابر ۲/۵، پارامتر شناخت جمعی ( $C_2$ ) برابر ۰/۲، و مقادیر حداکثر و حداقل ضریب لختی به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۴ در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم نتیجه نهایی معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$CU = 112703P^{0.15}RH^{0.041}S_l^{-0.1478}S_m^{-0.093} \quad (12)$$

احتمال ترکیب مناسب، مکان‌هایی از تابع زنجیره‌ها برای رد و بدل کردن اطلاعات انتخاب می‌شود. در این پژوهش از ترکیب نقطه‌ای برای ترکیب زنجیره‌های صفر و یک استفاده شده است. مجدداً تابع هدف به ازای جمعیت جدید محاسبه شده و این روال آن قدر تکرار می‌شود تا تمامی جواب‌ها به سمت نقطه بهینه تخمین برای پارامترهای ضریب یکنواختی معرفی گردد. عامل تعیین‌کننده در برازش و ارزیابی کروموزوم‌ها، تابع برازش است که براساس میزان تطابق با ضریب یک نواختی اندازه‌گیری شده تعریف می‌گردد. الگوریتم ژنتیک به کار رفته در این مطالعه بر اساس یک سیستم دودویی شامل (۰ و ۱) می‌باشد. به طوری که پارامترهای مدل به مینا ۰ و ۱ انتقال یافته، به عبارت دیگر رمزدار می‌شوند. در این پژوهش عمل دورگه‌شدن با یک موقعیت برش در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش امکان دستیابی به نقاط بهینه مطلق، باید تنوع در جامعه افزایش یابد (جهش). نحوه تغییر ژن‌ها بستگی به فضا تعریف شده الگوریتم دارد. از آن جایی که در این پژوهش از سیستم دودویی استفاده شده است، بنابراین در صورتی که ژن حاوی مقدار صفر باشد به یک تبدیل می‌گردد و برعکس (هزارجریبی و همکاران، ۱۳۹۰). در این مقاله برای رسیدن به یک رابطه غیرخطی که بتوان با استفاده از آن ضریب یکنواختی را به پارامترهای ذکر شده ربط داد از تابع هدف مجموع مربعات خطا به صورت زیر استفاده شد:

$$\phi(s) = \sum_{i=1}^n (CU_i(m) - CU_i(s))^2 \quad (7)$$

در رابطه فوق  $m$  و  $s$ : به ترتیب اندیسی برای مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشند. در این پژوهش از کل داده‌ها، ۸۰ درصد برای مرحله واسنجی و ۲۰ درصد باقیمانده برای مرحله آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفته است. معادله‌های زیر به منظور تخمین ضریب یکنواختی کریستیانسن از روی فشار کارکرد آب‌پاش، ارتفاع پایه آب‌پاش، فاصله آب‌پاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفتند:

$$CU = k_1 P^{k_2} RH^{k_3} S_l^{k_4} S_m^{k_5} \quad (8)$$

$$CU = k_1 + aP^{k_2} + bRH^{k_3} + cS_l^{k_4} + dS_m^{k_5} \quad (9)$$

$$CU = k_1 + aP^{k_2} + b(RH^{k_3} S_l^{k_4} S_m^{k_5}) \quad (10)$$

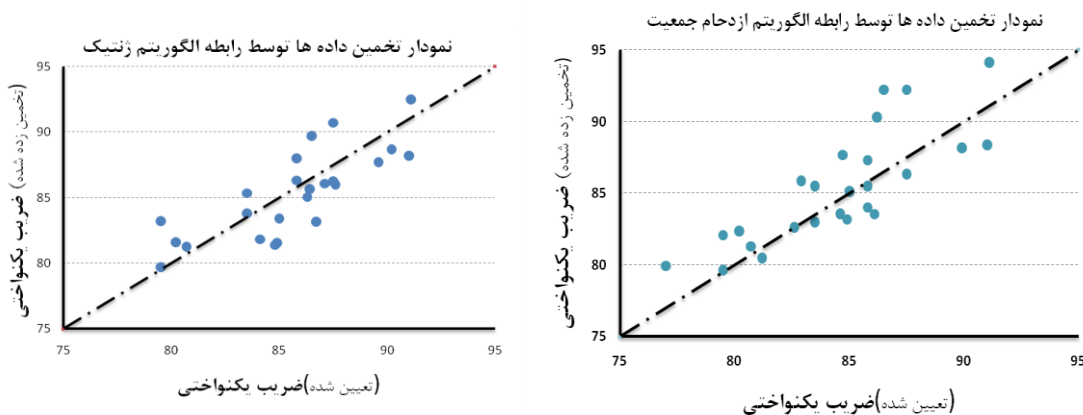
$$CU = 11279P^{0.1454}RH^{0.0383}S_i^{-0.0973}S_m^{-0.138} \quad (13)$$

برای بررسی دقت معادله‌های (۱۲) و (۱۳) داده‌های به‌دست آمده از این معادله‌ها نسبت به خط ۴۵ درجه مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده رسم گردید (شکل ۱). برای رسم این نمودار از ۷۰ درصد داده‌ها استفاده شد و از ۳۰ درصد باقیمانده داده‌ها برای صحت‌سنجی روابط (۱۲) و (۱۳) مورد استفاده قرار گرفت:

در مدل بهینه الگوریتم ژنتیک، تعداد جمعیت برابر ۲۰۰، درصد احتمال جهش برابر ۰/۰۰۵، درصد احتمال ترکیب برابر ۰/۸۵ و درصد احتمال انتخاب برابر ۰/۷ در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک نتیجه نهایی معادله به صورت زیر می‌باشد (هزارجریبی و همکاران، ۱۳۹۰):

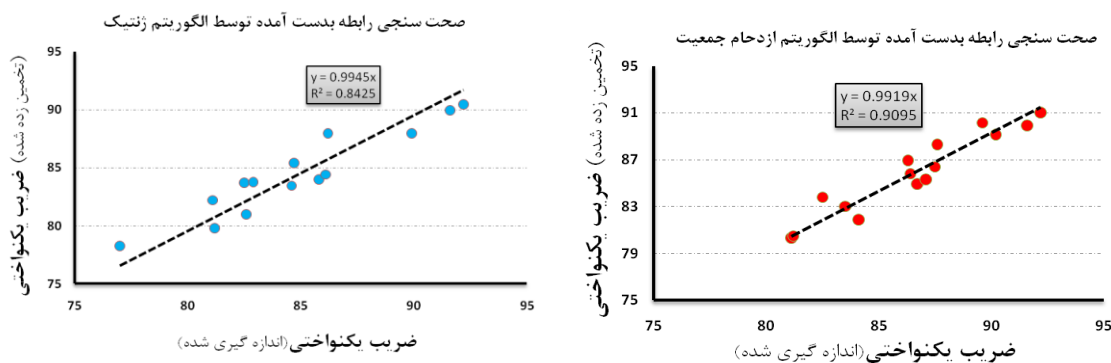
### جدول ۱- ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانس (درصد) در تیمارهای مختلف فشار، ارتفاع پایه آب‌پاش و فواصل آب‌پاش

فواصل آب‌پاش بر حسب متر (S <sub>f</sub> × S <sub>m</sub> )							ارتفاع پایه آب‌پاش (سانتی‌متر)	فشار (اتم‌سفر)
۹×۱۲	۹×۱۵	۱۲×۱۲	۱۵×۱۲	۱۲×۱۸	۱۵×۱۵	۱۵×۱۸		
۸۷/۵	۸۶/۲	۹۱	۸۵/۸	۸۵	۸۲/۵	۸۰/۲	۶۰	۳/۵
۹۱/۱	۸۶/۵	۹۱/۶	۸۵/۸	۸۶/۳	۸۳/۵	۷۹/۵	۱۰۰	
۹۰/۲	۸۷/۶	۸۷/۵	۸۶/۱	۸۴/۹	۸۴/۱	۸۱/۲	۶۰	۳
۹۲/۲	۸۹/۶	۸۹/۹	۸۷/۱	۸۶/۷	۸۴/۶	۸۴/۸	۱۰۰	
۸۵/۳	۸۲/۹	۸۵/۸	۸۱/۱	۷۴/۵	۷۹/۵	۷۳/۷	۶۰	۲/۵
۸۶/۰	۸۴/۷	۸۶/۴	۸۳/۵	۸۲/۶	۸۰/۷	۷۷	۱۰۰	



شکل ۱- تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک نسبت به خط ۴۵ درجه

ترابی پوده و همکاران: مقایسه‌ی روش‌های الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک...



شکل ۲- تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک نسبت برای صحت سنجی معادلات

میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، بین داده‌های تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده، میانگین نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده و انحراف معیار نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

با توجه به جدول (۲) مشخص است که بین الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک در تخمین ضریب یکنواختی نمی‌توان تمایز خاصی قائل شد چرا که هر دو روش از نظر آماری خیلی نزدیک به هم می‌باشند ولی با توجه به کم‌تر بودن اعداد مربوط به روش ازدحام جمعیت بطور کلی می‌توان گفت که روش ازدحام جمعیت نسبت به روش ژنتیک می‌تواند در تخمین ضریب یکنواختی در این تحقیق ارجحیت داشته باشد. با رسم داده‌های تخمین زده شده توسط معادله‌های الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک بر روی یک نمودار (شکل‌های ۳) نیز مشخص است که نمی‌توان تمایز خاصی بین این دو الگوریتم قائل شد.

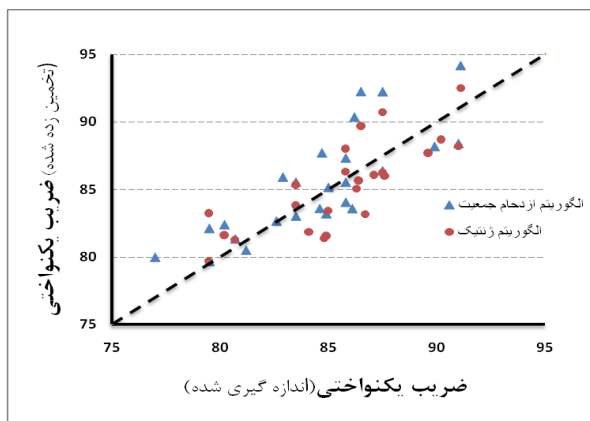
با توجه به شکل (۱) مشخص است که داده‌های تخمین زده شده توسط معادله‌های (۱۲) و (۱۳) پراکندگی خوبی نسبت به خط ۴۵ درجه از خود نشان می‌دهند که حاکی از آن است که معادله‌های به‌دست آمده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک از دقت خوبی برخوردارند. حال برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، ۳۰ درصد داده‌های باقیمانده برای صحت‌سنجی روابط ارائه شده توسط الگوریتم‌ها به‌دست آورده و که در شکل (۲) به صورت نمودار نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۲) مشخص است که معادله‌های (۱۲) و (۱۳) تخمین زده شده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک ۳۰ درصد داده‌های واقعی را نیز با دقت خوبی تخمین می‌زنند که مقادیر ضریب تبیین ۹۱ و ۸۵ درصد بیان‌کننده این موضوع می‌باشد. همچنین برای مقایسه‌کردن الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک در تخمین ضریب یکنواختی از روش‌های آماری استفاده گردید. بررسی‌های آماری صورت گرفته از قبیل مقدار ضریب تبیین، جذر

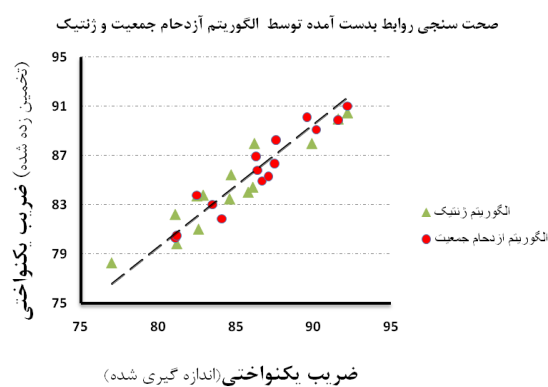
جدول ۲- بررسی آماری مقایسه دقت الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک نسبت در تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب با توجه به داده‌های صحت سنجی

الگوریتم	ضریب تبیین	جذر میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	میانگین نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده	انحراف معیار نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده
ازدحام جمعیت	۹۱	۲/۵۱۳	۱/۳۷	۰/۹۸	۰/۰۰۱
ژنتیک	۸۵	۳/۵۷	-	۰/۹۹	۰/۰۱۴





(الف)



(ب)

شکل ۳- مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک روی یک نمودار

### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک روابطی مطابق معادله‌های (۱۲) و (۱۳) استخراج گردید. با توجه به شکل (۱) مشخص شد که داده‌های تخمین زده شده توسط معادله‌های (۱۲) و (۱۳) پراکنده‌گی خوبی نسبت به خط ۴۵ درجه از خود نشان می‌دهند که حاکی از آن است معادله‌های به دست آمده توسط الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک از دقت خوبی برخوردار است. برای صحت‌سنجی معادله‌های (۱۲) و (۱۳)، ۳۰ درصد داده‌های باقیمانده واقعی توسط آن‌ها به دست آمد و بر روی شکل (۲) نشان داده شد. با توجه به شکل (۲) مشخص شد که معادله‌های (۱۲) و (۱۳)، ۳۰ درصد داده‌های واقعی را با دقت خوبی تخمین می‌زنند که مقادیر ضرایب تبیین بیان‌کننده این موضوع می‌باشد. همچنین برای مقایسه کردن دقت الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و ژنتیک در تخمین ضریب یکنواختی از روش‌های آماری استفاده گردید. با توجه به جدول (۲) مشخص شد که بین الگوریتم‌های ازدحام جمعیت و

با توجه به حداکثر بودن  $P$  در معادله‌های (۱۲) و (۱۳)، نتایج این پژوهش، نتایج پژوهش مونتر و همکاران (۲۰۰۳) مبنی بر این که فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی موثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است را تایید می‌کند. نمای کوچک ارتفاع پایه آب پاش،  $k_p$ ، در معادلات (۱۲) و (۱۳) بیانگر عدم تأثیر محسوس افزایش ارتفاع پایه آب پاش (از ۶۰ به ۱۰۰ سانتی‌متر)، بر یکنواختی توزیع آب است. این نتیجه با نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی کاملاً تطابق دارد. اضافه بر این که در عمل، حداقل ارتفاع پایه آب پاش به ارتفاع گیاه نیز بستگی دارد. به طور کلی در ارتفاع پایه آب پاش ۱۰۰ سانتی‌متر آب به شکل یکنواخت‌تری توزیع گردید، ضمن اینکه حداکثر یکنواختی توزیع آب در آرایش مربعی  $12 \times 12$  متر، حاصل شد که مشابه با نتایج حاصل از پژوهش اسی (۲۰۰۹) است. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده بیانگر آن است که در فشار کارکرد ۳ اتمسفر، آب با یکنواختی بالاتری توزیع می‌گردد.

ترابی پوده و همکاران: مقایسه‌ی روش‌های الگوریتم ازدحام جمعیت و ژنتیک...

(۲۰۰۳) مبنی بر اینکه فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی موثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است را تایید کرد. مطابق با نتایج پژوهش کلر و بلیسنر (۱۹۹۰)، در این پژوهش نیز با توجه به کاهش یکنواختی توزیع آب در فشارهای بالا و پایین که به ترتیب ناشی از ایجاد ذرات پودری و درشت است، فشار ۳ اتمسفر در پایه آب‌پاش ۱۰۰ سانتی‌متری یک فشار پیشنهادی برای حصول حداکثر یکنواختی توزیع آب می‌باشد.

ژنتیک در تخمین ضریب یکنواختی نمی‌توان تمایز خاصی قائل شد چرا که هر دو روش از نظر آماری خیلی نزدیک به هم می‌باشند ولی با توجه به کم‌تر بودن اعداد مربوط به روش الگوریتم ازدحام جمعیت بطور کلی می‌توان گفت که روش الگوریتم ازدحام جمعیت نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌تواند در تخمین ضریب یکنواختی در این تحقیق ارجحیت داشته باشد. با توجه به حداکثر بودن توان  $P$  در معادله‌های (۱۲) و (۱۳)، نتایج این پژوهش، نتایج پژوهش مونتر و همکاران

### منابع

- ۱- باوی، ا.، کشکولی، ح.، ولیزاده، م. و س. برومندنسب. ۱۳۸۵. ارزیابی پارامترهای هواشناسی و هیدرولیکی بر یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی در منطقه امیدیه اهواز. کنفرانس مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۵.
- ۲- شوریان، م. و ج موسوی. ۱۳۸۵. برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز با اهداف انتقال آب بین حوضه‌ای. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸ صفحه.
- ۳- کاکویی، س. و ع. ر. عمادی. ۱۳۹۲. توزیع و تحویل بهینه آب در کانال AMX از شبکه آبیاری ورامین با استفاده از الگوریتم سیستم جامعه مورچگان. مجله پژوهش آب ایران، ۷ (۱۳): ۵۱-۵۸
- ۴- هزارجریبی، ا.، دهقانی، ا.ا.، حسام، م. و ح. شریفان. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸ (۴): ۱۴۳-۱۲۹
- ۵- علیزاده، ا. ۱۳۸۵. سیستم‌های آبیاری بارانی. انتشارات دانشگاه امام رضا. ۶۶-۶۳
- 6- Afshar, M. H. 2010. A parameter free continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the optimal design of storm sewer networks: Constrained and unconstrained approach. *Advances in Engineering Software*.41:188-195.
- 7- Dabbous, B. 1962. A study of sprinkler uniformity evaluation method. Thesis submitted to Utah State University at Logan, Utah, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Utah 84322.
- 8- Dehghani, A. A., Suzuki, K., Hashemi, F. and A.S. Salmatian. 2007. Estimation of the discharge coefficient of canal radial gates using artificial neural network. *IAHR-International Congress on Water Engineering, Venice, Italy*. P: 221-230.
- 9- Goldberg, E. D. 2007. *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. Goldberg, de Publisher: Addison Wesley.
- 10-Harrouni, K., Ouazar, D. and A. H. D. Walters. 1996. Groundwater optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 18: 287-296.
- 11-Hart, W. E. and W.N. Reynolds. 1965. Analytical design-sprinkler system. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, 1:83-89.
- 12-Jung, B. S. and B. W. Karney. 2006. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches, *Journal of Water Resource of Planning Management, ACSE*.132(1): 44-52.

- 13-Karmeli, D. 1997. Estimating sprinkler distribution pattern using ear regression. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 21(4): 682-685.
- 14-Keller, J. and R .D. Bliesner. 1990. Sprinkler and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, NewYork, NY, USA, 652 p.
- 15-Kumar, D. N. and M. J. Reddy. 2006. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation, Water Resource Management, 20(6): 279–292.
- 16-Kennedy, J. and R. C. Eberhart. 1995. Particle swarm optimization.Proc. IEEE International conference on Neural Networks. Perth, WA,Australia.
- 17-Merriam, J. I. and J. Keller, 1978. Farm irrigation system evaluation.3. Logan, Utah: Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, 271 p.
- 18-Montero, J., Tarjuelo, J. M. and P. Carrion, 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer. Irrigation Science, 22: 47-56.
- 19-Osei, F. K. B. 2009. Evaluation of sprinkler irrigation system for improved maize seed production for farmers in Ghana. A Thesis for M.sc,<http://dspace.knust.edu.gh/dspace/bitstream/123456789/1939/1/fulltxt.pdf>
- 20-Xiang, F., Anqiang, L., Liping, W. And J. Changming. 2011. Short-term scheduling of cascade reservoirs using an immune algorithm-based particle swarm optimization. Journal of Computers and Mathematics with Applications, 62: 2463–2471.
- 21-Vories, E. D. and R. D. von Bernuth, 1986. Single nozzle sprinkler performance in wind. transactions American Society of Agricultural Engineers, 29: 1325-1330.