

## کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO) جهت تخمین ضرایب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی

الهه حسینیان<sup>۱</sup> و حسن ترابی<sup>۲\*</sup>

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در کشاورزی، ضریب یکنواختی توزیع آب (CU) در آبیاری بارانی است. مقدار CU حاصل از هر آبپاش در مقادیر مختلف فشار کارکرد آبپاش، ارتفاع پایه آبپاش، فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر تغییر می‌یابد. تعیین بهترین ترکیب از پارامترهای بالا که بالاترین ضریب CU را حاصل کند، همواره سؤالی بی‌جواب برای کاربران بوده است. در این پژوهش، مقادیر ضریب CU آبپاش مدل zb ساخت ایران در ۳ تیمار مختلف فشار کارکرد آبپاش، ۲ تیمار ارتفاع پایه آبپاش و ۷ تیمار آرایش شبکه آبپاش‌ها که در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان اندازه‌گیری شد، با استفاده از الگوریتم غذایابی باکتری بهینه شد و معادله‌ای با بهینه‌ترین ضرایب برای تخمین مقدار CU با استفاده از پارامترهای ذکر شده توسط این الگوریتم به دست آمد. در این الگوریتم پارامترهای  $N_c$ ،  $N_{re}$ ،  $N_{ed}$  و  $C(i)$  به ترتیب برابر ۵۰۰، ۸، ۰/۱ و ۰/۱ بهترین جواب را ارائه کردند. نتایج نشان داد که این الگوریتم دارای خطای مطلق ۲ درصد است. همچنین، مقدار پارامتر ریشه دوم میانگین مربع خطا برابر ۲/۱۳ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل برای برآورد ضریب یکنواختی پخش بود.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری بارانی، الگوریتم غذایابی باکتری، ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان، ضریب یکنواختی.

**ارجاع:** حسینیان ا. و ترابی ح. ۱۳۹۸. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO) جهت تخمین ضرایب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۴۴-۴۴.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

\* نویسنده مسئول: [torabi.ha@lu.ac.ir](mailto:torabi.ha@lu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۳

## مقدمه

با توجه به آمار جهانی ۹۳ درصد آب شیرین مصرفی در جهان به بخش کشاورزی اختصاص دارد. این رقم برای کشور ایران نیز بالای ۹۰ درصد است. کمبود و محدودیت منابع آب، خصوصاً در ایران شرایطی را می‌طلبد که از آب حداکثر استفاده شود و تا حد امکان از تلفات آن جلوگیری شود. یکی از راه‌حل‌های مؤثر در صرفه‌جویی و حفاظت بیشتر منابع آب، استفاده از سیستم‌های آبیاری بارانی است. چنانچه این سیستم‌ها به درستی طراحی، اجرا و مدیریت شوند، باعث کاهش تلفات آب و افزایش یکنواختی توزیع آب خواهند شد. خوشبختانه، همراه با توسعه روش‌های آبیاری بارانی در سال‌های اخیر در کشور، تولید و ساخت وسایل آن نیز رونق یافته است. یکی از تجهیزاتی که با تنوع تولید روبه‌رو بوده و شرکت‌های داخلی مشابه انواع خارجی را تولید می‌کنند، آبیاش است. با توجه به عدم ارائه مشخصات فنی و هیدرولیکی این آبیاش‌ها، لازم است تا با تغییرات ساده‌ای چون ایجاد تغییر فشار در سیستم، تغییر ارتفاع پایه‌های آبیاش، تنظیم فاصله آبیاش‌ها روی لوله جانبی و همچنین فاصله لوله‌های جانبی از هم (آرایش شبکه)، یکنواختی توزیع آب و عملکرد سیستم آبیاری بارانی را بهبود بخشید. اولین مطالعه در خصوص یکنواختی آبیاری بارانی توسط کریستیانسن (۱۹۴۲) در کالیفرنیا انجام شده است که منجر به ارائه ضریب یکنواختی کریستیانسن شده است. این ضریب از معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \quad (1)$$

که در فرمول مذکور  $CU$ ، ضریب یکنواختی کریستیانسن؛  $x_i$ ، عمق آب در هر یک از قوطی‌های جمع‌آوری آب (میلی‌متر)؛  $\bar{x}$ ، میانگین عمق آب در قوطی‌ها (میلی‌متر)؛ و  $n$ ، تعداد قوطی‌های جمع‌آوری آب است. استفاده از ضریب یکنواختی کریستیانسن در سیستم‌های آبیاری بارانی بسیار متداول است. محققان زیادی در زمینه ضریب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی ثابت که در آن آبیاش‌ها در زمان آبیاری تغییر مکان نمی‌دهند، کار کرده‌اند که منجر به ارائه روابطی برای ضریب یکنواختی شده است که از آن جمله می‌توان به ضریب یکنواختی هارت و رینولدز (۱۹۶۵)، ضریب یکنواختی کارملی (۱۹۹۷)، ضریب یکنواختی کریستیانسن (۱۹۴۲) و ضریب

یکنواختی به روش هاوانی اشاره کرد (علیزاده، ۱۳۸۱). دابوس (۱۹۶۲) از طریق روش‌های آماری مشخص کرد که ضریب یکنواختی کریستیانسن در مقایسه با دیگر روش‌ها معتبرتر است. هیرمن (۱۹۸۳) در تحقیقی ذکر کرد که شرکت‌های سازنده آبیاش معمولاً از ضریب یکنواختی کریستیانسن برای ارزیابی سیستم‌ها استفاده می‌کنند. کلا و بلیسنر (۱۹۹۰) دریافتند در فشار کم به دلیل ریزش بیشتر آب در فواصل نزدیک به آبیاش و در فشار بالا به دلیل تولید قطرات ریزتر و حساس‌تر به باد، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. کاریون و همکاران (۲۰۰۱)، عوامل مؤثر بر توزیع آب از آبیاش‌ها را به سه دسته کلی طراحی آبیاش، اندازه، تعداد و طراحی داخلی نازل‌ها و فشار کارکرد تقسیم‌بندی کرد. در انتخاب آبیاش‌ها، هدف اصلی پیدا کردن ترکیبی از فاصله آبیاش‌ها، فشار کاری و اندازه نازل برای به دست آوردن میزان مناسب کاربرد آب با بالاترین درجه یکنواختی ممکن در آبیاش است. هر نوع آبیاش پروفیل پاشش خاصی دارد که به اندازه نازل و فشار کارکرد بستگی دارد. مونتر و همکاران (۲۰۰۳)، نتیجه گرفتند که فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی مؤثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است. محمد عبدالمنیمو همکاران (۲۰۱۹)، ضرایب یکنواختی توزیع آب را در مقیاس کوچک مورد بررسی قرار دادند. معروف‌پور و همکاران (۲۰۱۹)، نیز به بررسی ضرایب یکنواختی پرداختند. نتایج نشان داد قطر بزرگ نازل کمترین تأثیر را در مدل‌سازی ضرایب یکنواختی آبیاری بارانی دارد. باوی و همکاران (۲۰۰۶) برای بررسی اثر مقادیر مختلف فشار کارکرد، فواصل و آرایش آبیاش‌ها بر یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی نشان دادند که با افزایش فشار کارکرد، ضریب یکنواختی توزیع کریستیانسن به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش نسبت فواصل آبیاش‌ها 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. فارابی و قربانی (۱۳۹۴)، اثبات کردند که برخی از ضرایب یکنواختی توزیع آب نظیر ضریب یکنواختی کارملی به شدت وابسته به شرایط ویژه مزرعه‌ها بوده و نمی‌توان آنها را در سایر شرایط مزرعه استفاده کرد. از این‌رو، می‌توان گفت طراحی نکردن صحیح و اصولی به دلیل نداشتن روابط و پارامترهای مورد نیاز طراحی، با توجه به عدم سابقه

نشان داد الگوریتم غذایی باکتری در بهینه‌سازی توابع چندبعدی با ابعاد بالاتر کارایی چشمگیری دارد. پژوهش‌های زیادی تاکنون در راستای تخمین یکنواختی توزیع آب در روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از سایر روش‌های شبیه‌سازی انجام شده است. میثاقی و همکاران (۱۳۸۷) به بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های ریاضی برآورد نیم‌تغییرنما با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای پهنه‌بندی نیترا ت پرداختند. زرگر و مدبر (۱۳۸۷)، ضرایب مدل‌سازی عددی رودخانه‌ها را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست آوردند. قلعه‌نی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نورد شبیه‌سازی شده پرداختند. هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰)، یکنواختی توزیع آبیاری بارانی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند و بهترین ضرایب را به‌دست آوردند. منصوری و همکاران (۱۳۹۳) نیز بهترین ضرایب رابطه غیرخطی تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی را با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) به‌دست آوردند. هدف در این مقاله، تعیین بهترین ضرایب رابطه غیرخطی تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی برای آبپاش مدل zb ساخت داخل کشور از روی پارامترهای مؤثر بر آن، با استفاده از الگوریتم غذایی باکتری (BFO) است.

### مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مقاله مربوط به تحقیقات هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) است. این طرح در ایستگاه تحقیقات کشاورزی هاشم‌آباد شهر گرگان وابسته به مؤسسه تحقیقات پنبه کشور در حدود ۱۱ کیلومتری شمال غربی گرگان اجرا شد. این ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی واقع است. در پژوهش ایشان، از یک آبپاش مدل zb ساخت داخل کشور که بر روی یک لوله فرعی نصب شده بود، استفاده شد و برای تعیین شدت پاشش، تعداد ۲۵۶ لیوان در شبکه مربعی شکل به ابعاد ۲\*۲ متر در اطراف آن آبپاش تعبیه شدند. بعد از ۱ تا ۱/۵ ساعت پاشش آب در داخل لیوان‌ها، پمپ خاموش و عمق آب داخل هر لیوان اندازه‌گیری شده است. آنها در نهایت، با فرض یکسان بودن آبپاش‌ها و لوله-

کاربرد سیستم‌های آبیاری بارانی یا انجام پروژه‌های تحقیقاتی در ایران باعث شده است تا طراحی‌ها به‌صورت کلیشه‌ای از نمودارها و جدول‌هایی صورت گیرد که برای سایر سیستم‌ها و مناطق مشابه به‌دست آمده‌اند. با توجه به اهمیت بالای ضریب یکنواختی، این ضریب با استفاده از نتایج یک آبپاش منفرد با توجه به هم‌پوشانی کردن آبپاش‌های مجاور اندازه‌گیری می‌شود، که گاهی همراه با استفاده از نرم‌افزارهای خاصی است و به‌دلیل تخصصی بودن از عهده کشاورزان و کاربران خارج است و کار وقت‌گیری خواهد بود. ضمن اینکه مقدار CU حاصل از هر آبپاشی در مقادیر مختلف فشار کارکرد آبپاش (P)، ارتفاع پایه آبپاش (RH)، فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی (S<sub>i</sub>) و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر (S<sub>m</sub>) تغییر می‌یابد. بنابراین، ضروری است در وضعیت‌های مختلف از پارامترهای ذکر شده که تعداد آزمایش‌ها را نیز به تعداد بسیار زیاد افزایش می‌دهد، مقدار CU اندازه‌گیری شود تا شرایط متناسب برای حصول حداکثر CU از هر آبپاش برای استفاده کشاورزان فراهم شود. جهت پرهیز از مشکل بالا، استفاده از روشی که بتواند مقادیر CU را با دقتی قابل قبول و با کار عملی و محاسباتی کمتر و در زمانی کوتاه‌تر در شرایط مختلفی از P، RH، S<sub>i</sub> و S<sub>m</sub> تخمین بزند، ضروری به نظر می‌رسد. امروزه، استفاده از روش‌های نوین هوشمند برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از الگوریتم‌های هوشمند در مسائل پیش‌بینی و بهینه‌سازی، الگوریتم غذایی باکتری<sup>۱</sup> است. این روش، از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته‌جمعی است که اولین بار توسط پاسینو برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته ابداع و در سال ۲۰۰۲ به جامعه علمی معرفی شد. این الگوریتم با الهام‌گیری از زندگی برخی از باکتری‌های موجود در طبیعت ابداع شده است. الگوریتم غذایی باکتری بر روی مسائل بهینه‌سازی مختلف به‌کار گرفته شده و کارایی خوبی از خود نشان داده است و در طیف وسیعی از مسائل مهندسی به‌کار می‌رود (داتا و همکاران، ۲۰۰۸؛ ناصیر و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن و همکاران، ۲۰۱۷؛ پان و همکاران، ۲۰۱۷). صادقی رام (۱۳۹۳)، با مقایسه دو روش پرکاربرد الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم غذایی باکتری در شرایط مساوی، ضمن تأیید دقت بالای همگرایی هر دو الگوریتم در ابعاد پایین،

1- Bacterial Foraging Algorithm (BFO)

درمی‌آیند. اگر در اثر این حرکت تصادفی، باکتری به نقطه بهینه‌تری جابه‌جا شود این حرکت همچنان به‌طور تصادفی ادامه می‌یابد و در غیر این صورت، حرکت آن باکتری متوقف می‌شود. پیش از عمل تولیدمثل، عمل کموتکسیز به تعداد دفعات معین و از پیش تعیین‌شده‌ای (که با  $N_c$  نشان داده می‌شود) توسط باکتری‌ها انجام می‌شود. پس از انجام عمل کموتکسیز، مرحله تولیدمثل آغاز می‌شود. در این مرحله، باکتری‌ها بر اساس مجموع امتیازاتی که در طی  $N_c$  بار انجام عمل کموتکسیز کسب کرده‌اند، مرتب‌سازی می‌شوند. پس از آن، نیمی از باکتری‌ها، که امتیازهای بدتری کسب کرده باشند، حذف می‌شوند و به جای هر یک از آنها یک کپی از باکتری‌های باقی‌مانده جایگزین می‌شود. پس از انجام عمل تولیدمثل، دوباره عمل کموتکسیز به همان ترتیب انجام می‌شود و این فرایند تولیدمثل نیز  $N_{re}$  بار تکرار می‌شود. پس از  $N_{re}$  بار عمل تولیدمثل (که هر یک از آنها مستلزم  $N_c$  بار انجام عمل کموتکسیز است) نوبت به مرحله پایانی، یعنی مرحله حذف و پراکنی می‌رسد. در این مرحله، هر یک از باکتری‌ها با احتمال معین  $P_{ed}$  دچار مرگ و سپس پراکنگی می‌شوند.

های فرعی و مشابه‌سازی عمق آب داخل لیوان‌ها در حالت‌های مختلف از  $S_1$  و  $S_m$  ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن برای تیمارهای مختلف ارتفاع پایه آبپاش و فشار کارکرد آبپاش اندازه‌گیری شد. مقادیر ضریب  $CU$  آبپاش مدل  $z_b$  ساخت ایران در ۳ تیمار مختلف فشار کارکرد آبپاش (۲/۵، ۳ و ۳/۵ اتمسفر)، ۲ تیمار ارتفاع پایه آبپاش (۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) و ۷ تیمار آرایش شبکه آبپاش‌ها ( $S_1 \times S_m$ ) شامل  $9 \times 12$ ،  $9 \times 15$ ،  $12 \times 12$ ،  $12 \times 15$ ،  $12 \times 18$ ،  $15 \times 15$  و  $15 \times 18$  متر در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری ضریب یکنواختی کریستیانسن (ووریس و برنوت، ۱۹۸۶) نیز معادله (۱) مورد استفاده قرار گرفت، که نتایج حاصل از این تحقیق در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

### الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری

در الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری، ابتدا جمعیت اولیه‌ای از باکتری‌های مصنوعی (که تعداد آن‌ها با  $S$  نمایش داده می‌شود) به‌طور تصادفی تولید و سپس در اجرای الگوریتم به‌ترتیب سه نوع عملیات بر روی آنها انجام می‌شود که عبارت‌اند از: کموتکسیز، تولیدمثل و حذف-پراکنی. در مرحله کموتکسیز، ابتدا هر یک از این باکتری‌ها به‌طور تصادفی در یک جهت خاص به حرکت

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

فشار (P) (اتمسفر)	ارتفاع پایه آبپاش (RH) (سانتی‌متر)	فواصل آبپاش بر حسب متر ( $S_m \times S_1$ )						
		۱۵×۱۸	۱۵×۱۵	۱۲×۱۸	۱۵×۱۲	۱۲×۱۲	۹×۱۵	۹×۱۲
۳/۵	۶۰	۸۰/۲	۸۲/۵	۸۵/۰	۸۵/۰	۹۱/۰	۸۶/۲	۸۷/۵
	۱۰۰	۷۹/۵	۸۳/۵	۸۶/۳	۸۵/۸	۹۱/۶	۸۶/۵	۹۱/۱
۳	۶۰	۸۱/۲	۸۴/۱	۸۴/۹	۸۶/۱	۸۷/۵	۸۷/۶	۹۰/۲
	۱۰۰	۸۴/۸	۸۴/۶	۸۶/۷	۸۷/۱	۸۹/۹	۸۹/۶	۹۲/۲
۲/۵	۶۰	۷۳/۷	۷۹/۵	۷۴/۵	۸۱/۱	۸۵/۸	۸۲/۹	۸۹/۳
	۱۰۰	۷۷	۸۰/۷	۸۲/۶	۸۳/۵	۸۶/۴	۸۴/۷	۸۶/۰

در هر بار انجام عمل کموتکسیز، موقعیت باکتری  $\lambda_m$  به‌صورت معادله (۲) تغییر داده می‌شود:

$$q^i(j+1, k, l) = q^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \cdot \Delta(i)}} \quad (2)$$

که در آن:  $\Delta(i)$ ، یک بردار  $n$  بعدی است که هر یک از درایه‌های آن یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه

برای این منظور اگر یک باکتری با مرگ خود از گردونه حیات حذف شود، به جای آن یک باکتری به‌طور تصادفی در نقطه‌ای از دامنه مسئله قرار داده می‌شود. مرحله حذف و پراکنی  $N_{ed}$  بار انجام می‌گیرد.

فرض می‌کنیم  $(j, k, l)$ ، برداری  $n$  بعدی باشد که موقعیت باکتری  $\lambda_m$  را در کموتکسیز  $\lambda_m$ ، تولیدمثل  $k$  و حذف و پراکنگی  $l$  نشان می‌دهد. در الگوریتم BFO.

میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد. سپس، با محاسبه مقادیر بالا 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 می‌شود. هرچه مقدار  $R^2$  به عدد ۱ و مقادیر MAE و RMSE مقادیر خطای محاسباتی به صفر نزدیک‌تر باشند، دقت تخمین رابطه بالاتر خواهد بود. در مرحله نخست، برای به دست آوردن بهترین شرایط الگوریتم که بهینه‌ترین حالت ممکن را ارائه کند، ۱۵ اجرای مختلف برای پارامتر S مورد بررسی قرار گرفت و برای هر باکتری جدید ۵ مرتبه اجرا صورت گرفت. پس از تعیین S، هر کدام از پارامترهای حساس دیگر بیش از ۱۰ بار تغییر یافته و به ازای هر تغییر، الگوریتم ۵ مرتبه اجرا شد که میانگین این ۵ مرتبه برای مقایسه با دیگر حالات مورد نظر قرار گرفت. در این بررسی، تعداد دفعات کموتکسیز از رقم ۲۰۰ تا ۹۰۰ و اندازه گام کموتکسیز از دامنه ۰/۱ تا ۰/۰۱ مورد بررسی قرار گرفتند و همچنین افزایش تعداد دفعات تولیدمثل و حذف و پراکنی نیز صرفاً تا حدی سبب بهبود حل مسئله شدند و افزایش آنها بیش از این حد، بدون تغییر است؛ در نتیجه، فقط بار محاسبات افزایش می‌داد که این تعداد دفعات بهینه با ۶۰ بار اجرا شناسایی شدند. در مجموع، بیش از ۷۰ بار برای شرایط مختلف الگوریتم اجرا شد و بهترین حالت به دست آمد.

### نتایج و بحث

مهم‌ترین پارامتر مورد استفاده در الگوریتم BFO تعداد باکتری‌ها (S) است. افزایش S، ممکن است به نحو چشمگیری باعث افزایش بار محاسباتی الگوریتم شود. با این حال، وقتی از مقادیر بزرگ S جمعیت اولیه بزرگی از باکتری‌ها به طور تصادفی در فضای مسئله پخش می‌شود، احتمال اینکه یک یا چند تا از آنها در نقطه‌ای نزدیک به نقطه بهینه سراسری قرار گیرند و با گذشت زمان باکتری‌های بیشتری را در اثر کموتکسیز یا تولیدمثل به سمت خود بکشند، نیز افزایش می‌یابد. پس از سعی و خطا بهترین تعداد باکتری ۲۴ به دست آمد. یکی دیگر از پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم BFO، اندازه گام کموتکسیز،  $C(i)$  است. شبیه‌سازی‌های متعدد، بیانگر این

است. ( $i=1,2,\dots,S$ ). ضریب  $C(i)$ ، نیز اندازه گام کموتکسیز است. سپس، در ادامه باید مقدار حاصل از قرار دادن  $\theta^i(j, k, l)$  در تابع هزینه با  $J(i, j, k, l)$  نشان داده شود. تابع هدف به ازای جمعیت اولیه محاسبه می‌شود. باکتری‌های بد از محاسبات حذف و باکتری‌های خوب تکثیر می‌شوند. جمعیت جدید محاسبه شده و این روال آن قدر تکرار می‌شود تا تمامی جواب‌ها به نقطه بهینه تخمین پارامترهای ضریب یکنواختی نزدیک شوند. عامل تعیین کننده ارزیابی، تابع هدف است که براساس میزان تطابق با ضریب یکنواختی اندازه‌گیری شده، تعریف می‌شود. 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 معادله (۳) استفاده شده است:

$$\phi(s) = \sum_{i=1}^n (CU_i(m) - CU_i(s))^2 \quad (3)$$

در معادله بالا: m و s، به ترتیب اندیس مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده هستند. در این تحقیق از کل داده‌ها، مدل‌سازی با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها انجام شده و ۳۰ درصد باقیمانده برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به تحقیقات هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰)، معادله (۴) برای تخمین ضریب یکنواختی کیستیانسن از روی فشار کارکرد آبپاش، ارتفاع پایه آبپاش، فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی نسبت به دیگر معادلات از دقت بالاتری برخوردار است:

$$CU = k_1 P^{k_2} RH^{k_3} S_l^{k_4} S_m^{k_5} \quad (4)$$

که در آن: P، فشار بر حسب اتمسفر؛ RH، ارتفاع پایه آبپاش بر حسب سانتی‌متر؛ S<sub>l</sub> و S<sub>m</sub>، به ترتیب ضریب فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر است.  $k_1, k_2, k_3, k_4$  و  $k_5$  اعداد ثابتی هستند که به کمک الگوریتم غذاییابی باکتری بهینه خواهند شد. در این پژوهش، برنامه‌ای در محیط برنامه‌ویسی نرم‌افزار Matlab برای شبیه‌سازی روش الگوریتم غذاییابی باکتری تهیه شد و رابطه غیرخطی برای تعداد باکتری (S)، تعداد دفعات کموتکسیز ( $N_c$ )، تولیدمثل ( $N_{re}$ ) و حذف - پراکنی ( $N_{ed}$ ) بررسی شد. برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری میدانی، از سنجه‌های آماری ریشه دوم

الگوریتم BFO به یک جستجوگر تصادفی بی‌هدف و بدون حافظه تنزل پیدا می‌کند. برای یافتن بهترین ترکیب این ضرایب، حالت‌های مختلف از ترکیب پارامترها انتخاب شد. نحوهٔ آزمون به این صورت بود که هر یک از ضرایب آزمایش شد و در هر آزمون جواب با جواب‌های قبلی مقایسه و برای ترکیب بعدی تصمیم‌گیری شد. هر جواب که از سایر اجراهای قبلی کمتر محاسبه می‌شد و دارای خطای کمتری بود، ملاک برتری پارامترهای مورد استفاده تلقی شد. جدول ۲، نشان‌دهندهٔ برخی ترکیبات و نتایج است. برای بررسی نتایج و مشخص کردن بهتر یا بدتر بودن جواب‌ها از مقدار به‌دست‌آمده بهینهٔ تابع هدف استفاده شد.

واقعیت است که کارایی الگوریتم BFO شدیداً به انتخاب مقادیر مناسب برای این پارامتر وابسته است. در صورتی که این مقدار بیشتر از اندازه بزرگ انتخاب شده باشد، ممکن است باکتری‌ها از روی جواب بهینه سراسری عبور کنند؛ بدون اینکه متوجه وجود آن شوند. از طرف دیگر استفاده از مقادیر بسیار کوچک  $C(i)$  نیز می‌تواند باعث کند شدن سرعت همگرایی الگوریتم شود. بهترین اندازهٔ گام کموتکسیز  $0.1$  به‌دست آمد. با افزایش مقدار  $N_c$ ، تعداد گام‌های کموتکسیز افزایش می‌یابد. مقدار  $N_{re}$  تنها در نحوهٔ صرف نظر کردن الگوریتم از نواحی بد و تمرکز آن بر روی نواحی خوب تأثیرگذار خواهد بود. واضح است که با افزایش  $N_{ed}$ ، احتمال گریز از نقطه بهینه محلی و یافتن جواب بهینه سراسری افزایش می‌یابد. با افزایش  $P_{ed}$ ،

جدول 2- خلاصه نتایج ترکیب‌های مختلف الگوریتم

مقدار به‌دست‌آمده تابع هدف	ترکیب ضرایب
۱۸۸/۳۶۱۸	$S=24 N_c=60 N_{re}=6 N_{ed}=7 C_i=0.1$
۱۸۸/۸۰۳	$S=24 N_c=60 N_{re}=5 N_{ed}=6 C_i=0.1$
۱۸۸/۶۹۰	$S=24 N_c=50 N_{re}=6 N_{ed}=4 C_i=0.1$
۱۸۸/۵۱۷	$S=24 N_c=60 N_{re}=4 N_{ed}=4 C_i=0.1$
۱۸۸/۰۷۱	$S=24 N_c=50 N_{re}=8 N_{ed}=8 C_i=0.1$
۱۸۸/۵۱۶	$S=24 N_c=60 N_{re}=10 N_{ed}=4 C_i=0.1$
۱۹۰/۰۹۰	$S=24 N_c=60 N_{re}=6 N_{ed}=6 C_i=0.1$

جدول 3- ضریب یکنواختی توزیع آب تخمینی در تیمارهای مختلف فشار، ارتفاع پایه آبپاش و فواصل آبپاش

فشار (P) (اتمفر)	ارتفاع پایه آبپاش (RH) (سانتی‌متر)	فواصل آبپاش بر حسب متر ( $S_m \times S_i$ )						
		۱۵×۱۸	۱۵×۱۵	۱۲×۱۸	۱۵×۱۲	۱۲×۱۲	۹×۱۵	۹×۱۲
3/5	60	81/49	83/86	83/27	86/84	88/58	87/74	90/87
	100	83/18	85/59	84/84	88/64	90/41	89/56	92/75
3	60	79/69	82/00	81/28	84/92	86/61	85/80	88/85
	100	81/34	83/69	82/96	86/67	88/41	87/57	90/69
2/5	60	77/60	79/85	79/15	82/69	84/35	83/55	86/53
	100	79/21	81/51	80/79	84/41	86/09	85/28	88/32

داده‌های اندازه‌گیری شده توسط الگوریتم غذاییابی باکتری بهینه‌ترین ضرایب به صورت معادلهٔ (۵)، به‌دست آمد.

$$CU = 112.6964 \times P^{0.1474} \times RH^{0.0393} \times S_i^{-0.087} \times S_m^{-0.1497} \quad (5)$$

ضریب یکنواختی حاصل از این معادله بهینه در جدول ۳ مشخص است. شکل ۱ و شکل ۲، به ترتیب نتایج مقایسه ضریب یکنواختی تخمین‌زده شده از معادلهٔ (۵) و ضریب یکنواختی اندازه‌گیری شده را در مرحله واسنجی و

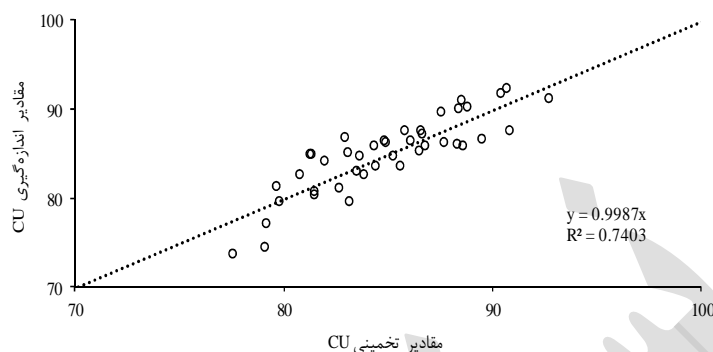
رابطهٔ بهینهٔ پیشنهادی برای ضریب یکنواختی (CU)

پس از بیش از ۷۰ بار اجرای مدل الگوریتم غذاییابی باکتری برای رسیدن به کمترین مقدار معادلهٔ (۵)، بهترین ترکیب ضرایب تعداد باکتری (S)، کموتکسیز ( $N_c$ )، تولیدمثل ( $N_{re}$ )، حذف-پراکنی (Ned) و پارامتر  $C(i)$  با توجه به حصول کمترین خطا به ترتیب برابر با ۲۴، ۵۰۰، ۸، ۰/۰۱ و ۰/۰۱ انتخاب شدند. بر اساس معادلهٔ (۴)، روی

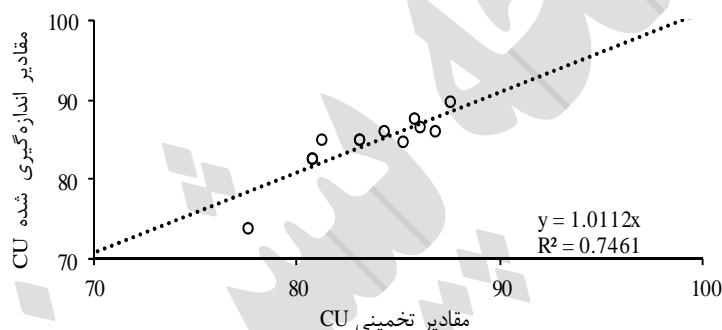


به پارامترهای آماری جدول ۴، مشخص است که رابطه با ضرایب بهینه‌شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است؛ به‌طوری که خطای مطلق کل داده‌ها ۲ درصد است.

صحت‌سنجی نشان می‌دهند. در جدول ۴، خلاصه تحلیل‌های آماری برای آزمون واسنجی، آزمون صحت‌سنجی و کل داده‌ها نشان داده شده است. با توجه



شکل ۱- مقایسه نتایج برای ۷۰ درصد داده‌ها



شکل ۲- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج تخمین زده شده برای داده‌های صحت‌سنجی

آزمون صحت‌سنجی به‌دست آوردند و مقدار تابع  $\phi(s)$  را برابر  $۱۹۱/۰۳۸$  برای کل داده‌ها به‌دست آوردند. همچنین،  $R^2$  به‌دست‌آمده از نتایج تحقیق منسوری و همکاران (۱۳۹۳) برای آزمون واسنجی برابر  $۰/۷۲۰$  بود و مقدار  $۲/۴۷$  را برای پارامتر RMSE در آزمون صحت‌سنجی و مقدار تابع  $\phi(s)$  را برابر  $۱۸۹/۷۶۶$  برای کل داده‌ها به‌دست آوردند. در حالی که پارامترهای به‌دست‌آمده فوق در این تحقیق به‌ترتیب برابر  $۰/۷۴۶$  و  $۲/۱۳$  و  $۱۸۸/۰۷۱$  هستند. مقایسه این عددها نشان می‌دهد که ضرایب بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم غذایابی باکتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی بهتر است؛ زیرا تابع  $\phi(s)$  با ضرایب‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق مقدار کمتری را نشان می‌دهد. همچنین، می‌توان گفت با توجه به حداکثر بودن توان P در معادله ۵، نتایج این پژوهش و نتایج پژوهش مونتر و همکاران (۲۰۰۳) را مبنی بر اینکه

جدول ۴- پارامترهای آماری برای آزمون واسنجی، صحت‌سنجی و کل داده‌ها

آزمون‌ها	RMSE	MAE	$R^2$	خطای مطلق
واسنجی	1/83	0/02	0/7403	۱/۸%
صحت‌سنجی	1/09	0/02	0/746	۲/۱%
کل داده‌ها	2/13	0/02	0/74	۲%

مقادیر RMSE و MAE نسبت به محدوده داده‌ها بسیار خوب است و همچنین پارامترهای آماری  $R^2$  هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری و داده‌های تخمین‌زده شده است، که مقدار به‌دست آمده برای کل داده‌ها، نشانه از این دارد که ضرایب بهینه به‌دست‌آمده مناسب هستند. لازم به ذکر است که  $R^2$  به‌دست‌آمده از نتایج هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) برای آزمون واسنجی برابر  $۰/۵۷۱$  است. همچنین، آنها مقدار  $۳/۵۷$  را برای پارامتر RMSE در

۴. فاریابی الف. و قربانی. ب. ۱۳۹۴. ارزیابی معادلات یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی و امکان استفاده از آن‌ها در شرایط مختلف مزرعه‌ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۴): ۵۲۵-۵۳۶.
۵. قلعه‌نی م. بزرگ حداد الف. و ابراهیمی ک. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نورد شبیه‌سازی شده. نشریه آب و خاک. ۲۴(۵): ۹۰۸-۹۱۹.
۶. منصوری ر. ترابی ح. گلچ ج. و میرشاهی د. ۱۳۹۳. امکان سنجی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای تخمین ضرایب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با آبیاش zb. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(۳): ۵۸۵-۵۹۸.
۷. میثاقی ف. محمدی ک. و گشتاسی الف. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های ریاضی برآورد نیم تغییرنما با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت پهنه‌بندی نیرتات. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز. ۲۳ مهر.
۸. هزارجریبی الف. دهقانی الف. حسام م. و شریفان ح. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۴): ۱۲۹-۱۴۴.

9. Bavi A. Kashkouli H. Vaelizade M. and broumandnasab S. 2006. Evaluation of the weather and hydraulic parameters on water distribution uniformity in sprinkler irrigation at omidiye region. Conference on management of irrigation and drainage networks. Shahid Chamran University. Ahvaz. 2-4 May 2006
10. Carrion P. Tarjuelo J. M. and Montero J. 2001. A simulation model for sprinkler irrigation: I. Description of model. Irrigation Science, 20(2): 73-84.
11. Chen Y. Li Y. Wang G. Zheng Y. Xu Q. Fan J. and Cui X. 2014. A novel bacterial foraging optimization algorithm for feature selection. Expert Systems with Applications. 83: 1-17.
12. Christiansen J. E. 1942. Irrigation by Sprinkling. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670. University of California, Berkeley. CA. 124 p.
13. Dabbous B. 1962. A study of sprinkler uniformity evaluation method. Thesis submitted to Utah State University at Logan. Utah, in partial fulfillment of the

فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی مؤثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است، تأیید می‌کند. کوچک بودن نمای ارتفاع پایه آبیاش ( $k_3$ )، بیانگر آن است که افزایش ارتفاع پایه آبیاش (از ۶۰ به ۱۰۰ سانتی‌متر)، تأثیر محسوسی بر یکنواختی توزیع آب ندارد. این نتیجه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صحرایی کاملاً تطابق دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضرایب رابطه غیرخطی یکنواختی پخش در آبیاری بارانی با استفاده از الگوریتم غذایابی باکتری بهینه شد. پارامترهای  $N_{ed}$ ،  $N_{re}$ ،  $N_c$  و  $C(i)$  برای بهینه‌کردن این تابع غیرخطی به ترتیب برابر ۸، ۸ و ۰/۱ بهترین جواب را ارائه می‌کنند. بررسی تعداد باکتری نشان داد که استفاده از تعداد ۲۴ مناسب است. بررسی اندازه گام کموتکسز نشان داد به ازای اندازه گام ۱۶ جواب‌های خوبی را ارائه داده است. الگوریتم غذایابی باکتری با توجه به شرایط بالا، ضرایب رابطه یکنواختی پخش در آبیاری بارانی را به خوبی بهینه کرد. میانگین خطای مطلق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های تخمین‌زده شده برابر ۲ درصد بود؛ همچنین، نتایج تحقیقات گذشته در زمینه ضریب یکنواختی پخش در آبیاری بارانی با ضرایب به دست آمده همخوانی دارد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO) برای بهینه‌کردن توابع غیرخطی بسیار خوب است و نسبت به دیگر الگوریتم‌ها، مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی، جواب دقیق‌تری را ارائه می‌کند.

### منابع

۱. زرگر م. و مدبر ل. ۱۳۸۷. تعیین ضرایب مدل‌سازی عددی رودخانه‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Shuffled. چهارمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه تهران. ۱۷ اردیبهشت.
۲. صادقی رام س. ۱۳۹۳. مقایسه کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات و غذایابی باکتری در بهینه‌سازی مسائل چندبعدی. اولین کنفرانس ملی ریاضیات صنعتی. دانشگاه تبریز. ۷ خرداد. ۱-۷.
۳. علیزاده الف. ۱۳۸۱. طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد. ۶۵۶ ص.



- requirements for the degree of Master of Science, Utah 84322.108 p.
14. Datta. T. Misra I. S. and angaraj B. B. 2008. Improved adaptive bacteria foraging algorithm in optimization of antenna array for faster convergence. *Progress in Electromagnetics Research*. 1: 143-157.
  15. Hart W. E and Reynolds W. N. 1965. Analytical design-sprinkler system. *Transactions. American Society of Agricultural Engineers*. 1: 83-89.
  16. Heerman D. F. 1983. Design and operation of farm irrigation systems. *ASAE*: 591-600.
  17. Karmeli D. 1997. Estimating sprinkler distribution pattern using ear regression. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*. 21(4): 682-685.
  18. Keller J. and Bliesner R.D. 1990. *Sprinkler and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold. New York, NY, USA. 652 p.
  19. Maroufpoor S. Shiri J. and Maroufpoor E. 2019. Modeling the sprinkler water distribution uniformity by data-driven methods based on effective variables. *Agricultural Water Management*. 215: 63-73
  20. Mohamed Abdelmoneim Z. Troy Peters R. Zhu X. and Sarwar A. 2019. Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. *Agricultural Water Management*. 213: 1078-1083.
  21. Montero J. Tarjuelo J. M. and Carrion P. 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. *Irrigation science*. 22(2): 47-56.
  22. Nasir A. N. K. Tokhi M. O. and Ghani N. M. A. 2014. Novel adaptive bacteria foraging algorithms for global optimization, *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 1-7.
  23. Pan Y. Xia Y. Zhou T. and Fulham M. 2017. Cell image segmentation using bacterial foraging optimization. *Applied Soft Computing*. 58: 770-782.
  24. Passino K. M. 2002. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control System Management*. 22: 52-67.
  25. Vories E. D. and von Bernuth R. D. 1986. Single nozzle sprinkler performance in wind. *Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 29(5): 1325-1330.