امکان‌سنجی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی با آبپاش zb

رامین منصوری[۱] *، حسن ترابی، حسن گلیج و دانیال میرشاهی

دانشجو دکتری سازه های آبی دانشگاه لرستان.Ramin_Mansouri@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان.torabi1976@gmail.com

دانشجو دکتری سازه های آبی دانشگاه لرستان. hassan_goleij37@yahoo.com

دانشجو کارشناسی ارشد سازه های آبی دانشگاه لرستان.mirshahi@yahoo.com

چکیده

کمبود و محدودیت منابع آب، خصوصاً در ایران، شرایطی را می‌طلبد که از آب موثرترین استفاده صورت گرفته و تا حد امکان از تلفات آن جلوگیری به عمل آید. یکی از پارامترهای مهم در آبیاری، ضریب یکنواختی توزیع آب (CU) در آبیاری بارانی می‌باشد. مقدار CU حاصل از هر آب‌پاشی در مقادیر مختلف فشار کارکرد آب-پاش (P)، ارتفاع پایه آب‌پاش(RH)، فاصله آب‌پاش‌ها روی لوله‌های جانبی (S_l) و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر (S_m) تغییر می‌کند.تعیین بهترین ترکیب از پارامترهای فوق که بیشترین ضریب CU را حاصل نماید، همواره مورد نظر کاربران بوده است. در این پژوهش، مقادیر ضریب CU آب‌پاش مدل zb ، ساخت ایران، در سه تیمار مختلف فشار کارکرد آبپاش (۲/۵، ۳ و ۳/۵ اتمسفر)، دو تیمار ارتفاع پایه آبپاش (۶۰ و ۱۰۰ سانتی متر) و هفت تیمار آرایش شبکه آبپاش‌ها ($S_l \times S_m$) شامل ۱۲×۹، ۱۵×۹، ۱۲×۱۲، ۱۲×۱۵، ۱۸×۱۲، ۱۵×۱۵، ۱۸×۱۵ متر در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان اندازه‌گیری شد و با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)و کاربرد نرم‌افزار Matlab بهینه گردید و رابطه‌ای با بهینه‌ترین ضرایب برای تخمین مقدار CU به‌دست آمد. این الگوریتم، ضریب مقیاس (F) و ضریب احتمال ترکیب (CR) را برابر ۲ و ۰/۵ با تعداد جمعیت ۱۰۰ عضوی و تعداد نسل (تکرار) ۱۰۰۰ بار، بهترین جواب را ارائه می‌کند. نتایج این الگوریتم دارای خطای مطلق ۲/۲٪ با نتایج اندازه‌گیری شده دارد. همچنین، مقادیر پارامتر ویلموت (d) و جذر میانگین مربع خطا (RMSE) به‌ترتیب برابر ۰/۹۱۹ و ۲/۱۲۶ به‌دست آمد که نشان دهنده دقت بالای این مدل بهینه برای برآورد ضریب یکنواختی پخش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب مقیاس، ضریب احتمال ترکیب، ضریب پخش آب، شبکه آبپاش.

---

۱ _ آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه لرستان، گروه مهندسی آب

* دریافت: دی ۱۳۹۲و پذیرش: مرداد ۱۳۹۳

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

روش‌های آبیاری با پیشرفت فناوری روز به روز وضعیت تازه‌تر و پیشرفته‌تری می‌یابند و هر روز روش‌های بهتر و مدرن‌تری با پتانسیل راندمان بیش‌تر، ابداع و ارائه می‌شود. استفاده از روش‌های مختلف آبیاری بستگی به شرایط اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جامعه و حالت خاص منطقه دارد. یکی از راه‌حل‌های مؤثر در صرفه-جویی و حفاظت بیش‌تر منابع آب، استفاده ازسیستم‌های آبیاری بارانی می‌باشد. 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 سال های اخیر در کشور تولید و ساخت وسایل و ابزار مختلف آن نیز رونق یافته است.

یکنواختی آبیاری به این معنی است که مقدار یکسانی آب در تمام قسمت‌های زمین توزیع شود. عملاً یکنواختی ۱۰۰٪ در آبیاری امکان‌پذیر نیست، زیرا عوامل غیرقابل کنترلی در آن نقش دارند. از آنجا که یکنواختی زیاد معمولاً با افزایش هزینه‌های ثابت، بهره‌برداری و نگهداری همراه است، بایستی طرح به‌صورتی باشد که علاوه بر برخورداری از یکنواختی زیاد، از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه باشد.

یکی از این وسایلی که با تنوع تولید روبرو 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 ساده ای 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)، یک نواختی توزیع آب و عملکرد سیستم آبیاری بارانی را بهبود بخشید.

اولین مطالعه در خصوص یکنواختی آبیاری بارانی توسط کریستیانسن(۱۹٤۲) در کالیفرنیا صورت گرفته است که منجر به ارائه ضریب یکنواختی[1] کریستیانسن شده است. این ضریب از رابطه (۱) قابل محاسبه است.وی برای تعیین یکنواختی، از یک شبکه مربعی قوطی‌های یکسان که در اطراف یک آبپاش روی زمین چیده می‌شوند استفاده کرد. آبپاش در مرکز شبکه مربعی گذاشته می‌شود و باید دقت شود که قوطی‌ها در تمام مدت آزمایش کاملاً افقی باشند.

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

که CU ضریب یکنواختی کریستیانسن، x_i عمق آب در هر یک از قوطی‌های جمع آوری آب (میلی‌متر)، $\bar{x}$ میانگین عمق آب در قوطی‌ها (میلی‌متر) و n تعداد قوطی-های جمع آوری آب می‌باشد.

استفاده از ضریب یکنواختی کریستیانسن در سیستم های آبیاری بارانی بسیار متداول است. محققان زیادی در زمینه ضریب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی ثابت که در آن آب‌پاش‌ها در زمان آبیاری تغییر مکان نمی‌دهند کار کرده‌اند که منجر به ارائه روابطی برای ضریب یکنواختی شده است که از آن جمله می توان به ضریب یکنواختی هارت و رینولدز (۱۹٦۵)، ضریب یکنواختی کارملی (۱۹۷۷)، ضریب یکنواختی مریام و کلر (۱۹۷۸)، ضریب یکنواختی کریستیانسن (ووریس و برنوث، ۱۹۸٦) و ضریب یکنواختی به روش هاوایی (علیزاده، ۲۰۰٦) اشاره کرد. دابوس (۱۹٦۲) از طریق روش‌های آماری مشخص کرد که ضریب یکنواختی کریستیانسن در مقایسه با دیگر روش‌ها معتبرتر است.

هرمن (۱۹۸۰) در تحقیقی ذکر کرد که شرکت های سازنده آبپاش معمولاً از ضریب یکنواختی کریستیانسن برای ارزیابی سیستم‌ها استفاده می‌کنند. کلر و بلیسنر (۱۹۹۰) دریافتند که در فشار کم به دلیل ریزش بیشتر آب در فواصل نزدیک به آبپاش و در فشار بالا به دلیل تولید قطرات ریزتر و حساستر به باد، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. کاریون و همکاران (۲۰۰۱)

[1] Uniformity Coefficient (CU)

Archive of SID

www.SID.ir

عوامل مؤثر بر توزیع آب از آبپاش‌ها را به سه دسته کلی طراحی آبپاش، اندازه، تعداد و طراحی داخلی نازل‌ها و فشار کارکرد تقسیم بندی کرده است. در انتخاب آبپاش‌ها هدف اصلی پیدا کردن ترکیبی از فاصله آبپاش‌ها، فشار کاری و اندازه نازل برای به دست آوردن میزان مناسب کاربرد آب با بالاترین درجه یکنواختی ممکن در آبپاش است.

هر نوع آبپاش پروفیل پاشش خاصی دارد که به اندازه نازل و فشار کارکرد بستگی دارد. مونترو و همکاران (۲۰۰۳) نتیجه گرفتند که فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی مؤثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است. باوی و همکاران (۲۰۰۶) 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 و 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.

از اینرو می‌توان گفت عدم طراحی صحیح و اصولی به دلیل نداشتن روابط و پارامترهای مورد نیاز طراحی، با توجه به عدم سابقه کاربرد سیستم‌های آبیاری بارانی یا انجام پروژه‌های تحقیقاتی در ایران باعث شده تا طراحی‌ها به صورت کلیشه‌ای از نمودارها و جداولی صورت گیرد که برای سایر سیستم‌ها و مناطق مشابه به‌دست آمده‌اند. این امر باعث شده است تا اولاً نتوان برنامه‌ریزی دقیق و واقعی برای منابع آب کشور انجام داد.ثانیاً، تعیین مقادیر پارامترهای طراحی با حدس و گمان صورت گیرد که منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بروز مشکلات و هزینه‌های اضافی در بهره‌برداری و نگهداری و بالاخره کاهش بازدهی اقتصادی طرح‌ها در طول عمر مفید می‌گردد.

با توجه به درک اهمیت بالای ضریب یکنواختی این ضریب با استفاده از نتایج یک آبپاش منفرد با توجه به هم‌پوشانی آبپاش‌های مجاور اندازه‌گیری می‌شود. ضمن این که مقدار CU حاصل از هر آب‌پاش در مقادیر مختلف فشار کارکرد آب‌پاش (P) ارتفاع پایه آب‌پاش (RH) فاصله آبپاش‌ها روی لوله‌های جانبی (S_L) و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر (S_m) تغییر می‌یابد. بنابراین ضروری است در وضعیت‌های مختلف از پارامترهای ذکر شده که تعداد آزمایشات را نیز به تعداد بسیار زیاد افزایش می‌دهد، مقدارCU اندازه‌گیری شود تا شرایط متناسب برای حصول حداکثر CU از هر آب‌پاش جهت استفاده زارعین توصیه گردد. جهت پرهیز از مشکل فوق، 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 فشار کارکرد، ارتفاع پایه آب‌پاش، S_L و S_m تخمین بزند، ضروری به نظر می‌رسد.

امروزه استفاده از روش‌های نوین هوشمند به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از الگوریتم‌های هوشمند در مسائل پیش‌بینی و بهینه سازی، الگوریتم تفاضل تکاملی[1] می‌باشد.این الگوریتم که توسط استورن و پرایس (۱۹۹۵) معرفی شده، کلاسی از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که ساختار آن از نظر مفهوم و پیاده‌سازی، بسیار ساده است.این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی کارآمد در محیط‌های پیوسته است و در طیف وسیعی از مسائل مهندسی به‌کار می‌رود.

استورن و پرایس (۱۹۹۷) در تحقیق بعدی خود، با استفاده از توابع محک بسیار متنوع، عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با تعدادی از مشهورترین روش‌های بهینه‌سازی مقایسه کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان‌دهنده برتری الگوریتم DE بود. یکی از چالش‌های مهندسین در دنیای واقعی، تنظیم مناسب پارامترهای روابط مختلف برای بهترین و بهینه‌ترین حالت می‌باشد. در مقالات

[1] Differential Evolution Algorithm (DE)

Archive of SID

www.SID.ir

مختلف، روش‌های کلاسیک و ابتکاری مختلفی ارائه شده است. یکی از این راه‌حل‌های ابتکاری، الگوریتم تکامل تفاضلی(DE) می‌باشد. این الگوریتم در مسائل مهندسی آب، بویژه در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های لوله، واسنجی مدل‌های بارش- رواناب، آب‌های زیرزمینی و سیستم‌های با چند مخزن مورد استفاده قرار گرفته است (بابو و آنگیرا ۲۰۰۳؛ ردی و کومار ۲۰۰۷؛ واسان و راجو ۲۰۰۷).

ولی تا کنون پژوهش مشابهی در راستای تخمین یک نواختی توزیع آب در روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از شبیه‌سازی روش الگوریتم DE مشاهده نشده است و این پژوهش اولین پژوهشی است که در این خصوص صورت می‌پذیرد.

هدف این مقاله، تعیین بهترین ضرایب رابطه 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 DE است.

مواد و روش‌ها

اطلاعات صحرایی مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این مقاله مربوط به تحقیقات هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) از طرحی است که در ایستگاه تحقیقات کشاورزی هاشم‌آباد وابسته به مؤسسه تحقیقات پنبه کشور،در حدود ۱۱ کیلومتری شمال غربی گرگان اجرا شده است، این محل در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی واقع است. به لوله رانش پمپ یاد شده یک لوله فرعی به طول ۸۴ متر از جنس آلومینیوم به قطر سه اینچ متصل شد. بر روی این لوله که انتها آن با یک درپوش انتهایی مسدود شده بود، آبپاش مدل zb ساخته شده در شرکت فن‌آوران آریا محور به فاصله ۴۸ متری انتها لوله بر روی پایه آب‌پاش مورد نظر نصب گردید.

برای تنظیم و کنترل فشار از دو فشارسنج یکی بر روی لوله رانش پمپ و دیگری بر روی آبپاش استفاده شد. فشار کارکرد آب پاش از طریق شیر فلکه‌ای که بر روی لوله رانش پمپ قرار داشت، تنظیم گردید.

در این پژوهش، مقادیر ضریب CU آب‌پاش مدلzb ساخت ایران در سه تیمار مختلف فشار کارکرد آبپاش (۲/۵، ۳ و ۳/۵ اتمسفر)، دو تیمار ارتفاع پایه آبپاش (۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) و هفت تیمار آرایش شبکه آبپاش‌ها ($S_l \times S_m$) شامل ۱۲×۹، ۱۵×۹، ۱۲×۱۲، ۱۲×۱۵، ۱۸×۱۲، ۱۵×۱۵ و ۱۸×۱۵متر اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری ضریب یکنواختی کریستیانسن (ووریس و برنوث، ۱۹۸۶) رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اندازه‌گیری شده از تحقیقات هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) و مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱- ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن (درصد) در تیمارهای مختلف فشار، ارتفاع پایه آبپاش و فواصل آبپاش هزارجریبی و همکاران(۱۳۹۰)

فشار(P) (اتمسفر)	ارتفاع پایه آبپاش(RH) (سانتی متر)	فواصل آبپاش بر حسب متر ($S_m \times S_l$)						
		۱۵×۱۸	۱۵×۱۵	۱۲×۱۸	۱۵×۱۲	۱۲×۱۲	۹×۱۵	۹×۱۲
۳/۵	۶۰	۸۰/۲	۸۲/۵	۸۵/۰	۸۵/۸	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	۸۵/۳
	۱۰۰	۷۷	۸۰/۷	۸۲/۶	۸۳/۵	۸۶/۴	۸۴/۷	۸۶/۰

Archive of SID

www.SID.ir

الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم‌های تکاملی[1] عموماً به عنوان الگوریتم های بهینه‌سازی چند منظوره شناخته می‌شوند که قادر به پیدا کردن جواب‌های نزدیک به بهینه برای مسائل ریاضی و واقعی می‌باشند؛ در حالی‌که روش‌های دقیق و تحلیلی قادر به پیدا کردن جواب بهینه در یک زمان محاسباتی منطقی نمی‌باشند. یکی از این الگوریتم‌های تکاملی که اخیراً ارائه شده، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) می باشد.این الگوریتم جهت غلبه بر عیب اصلی الگوریتم های ژنتیک، یعنی فقدان جستجوی محلی، ارائه شده است.تفاوت اصلی بین الگوریتم های ژنتیکی و الگوریتم DE در ترتیب عملگرهای جهش[2] و تقاطع (بازترکیبی)[3] و همچنین در نحوه کار عملگر انتخاب[4] می‌باشد. این الگوریتم از یک اپراتور تفاضلی جهت تولید جواب‌های جدید بهره می‌گیرد که این اپراتور باعث مبادله اطلاعات بین اعضای جمعیت می‌شود.

یکی از مزایای این الگوریتم داشتن حافظه می-باشد که اطلاعات جواب‌های مناسب را در جمعیت فعلی حفظ می‌کند. دیگر مزیت این الگوریتم مربوط به عملگر انتخاب آن می‌باشد. در این الگوریتم، همه اعضای یک جمعیت شانس مساوی برای انتخاب شدن به عنوان یکی از والدین را دارد. به اینصورت که نسل نوزاد با نسل والد از نظر میزان شایستگی که توسط تابع هدف سنجیده می-شود، مقایسه می‌گردد. سپس بهترین اعضا به عنوان نسل بعدی وارد مرحله بعد می‌گردند.

مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم DE، سرعت بالا، سادگی و قدرتمند بودن آن است. این روش تنها با تنظیم سه پارامتر شروع به کار می‌کند. پارامتر NP اندازه جمعیت[5]، پارامتر F وزن جهش و پارامتر CR احتمال انجام بازترکیبی یا تقاطع است، که در تفاضل دو بردار ضرب میشود و به بردار سوم اضافه می‌شود. به گفته استورن و پرایس (۱۹۹۷)، پارامتر F معمولاً بین صفر تا دو تنظیم می‌شود، همچنین، پارامتر CR مقداری بین صفر تا یک می‌گیرد. به‌طور کلی، این الگوریتم دارای چهار مرحله اساسی ارزش‌دهی[6]، جهش، تقاطع یا بازترکیبی و در نهایت انتخاب می‌باشد، که هر مرحله به تفصیل در زیر شرح داده شده است.

مرحله اول

عملگر ارزش‌دهی

این الگوریتم، ابتدا جمعیتی به اندازه مقادیر تصادفی (NP) در محدوده مقادیر مسئله مربوطه ایجاد می‌کند. در این مرحله مرزهای مقادیر مشخص می-گردد.گام بعدی در این مرحله، انتخاب چهار عضو از جمعیت به صورت تصادفی می‌باشد. از این چهار عضو یک عضو به عنوان عضو هدف[7] و سه عضو دیگر به عنوان بردارهای(۱، ۲ و ۳) به‌صورت تصادفی جدا می-شوند.

مرحله دوم

عملگر جهش

در این مرحله برای تولید بردار جهش یافته، در ابتدا اختلاف دو بردار دو و سه ($x_{r2,G} - x_{r3,G}$) در ضریب F با بردار یک ($x_{r1,G}$) جمع می‌شود. بردار جهش یافته[8] به صورت رابطه (۲) در هر عمل جهش درون جمعیت ایجاد می‌شود.

$$V_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \times (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \qquad (۲)$$

ثابت F که ضریب مقیاس[9] نام دارد، همان‌طور که اشاره شد مقداری بین صفر تا دو به خود می‌گیرد. این ضریب طول گام جهش را مشخص می‌کند. هرچه این ضریب کوچکتر باشد محیط مورد نظر برای یافتن عضو

[1] Evolutionary Algorithms
[2] Mutation
[3] Crossover
[4] Selection
[5] Number of Population
[6] Initialization
[7] Target Vector
[8] Noisy (Donor) Vector
[9] Scale Factor

Archive of SID

www.SID.ir

جدید، با فواصل کوچکتری جستجو می‌شود که باعث افزایش زمان اجرای الگوریتم می‌گردد. این امر ممکن است باعث گردد الگوریتم در بهینه‌های موضعی به دام بیفتد. در حالی‌که برای مقادیر بالای این ضریب، مشکل بهینه‌های موضعی رفع می‌گردد اما محیط مورد نظر برای یافتن عضو جدید، با فواصل بزرگتری جستجو می‌گردد که ممکن است جواب به‌دست آمده نسبت به حالت اول از دقت کمتری برخوردار باشد. مقدار ضریب مقیاس یکی از پارامترهایی می‌باشد که می‌بایست قبل از انجام بهینه-سازی نهایی مورد ارزیابی قرار گیرد. زیرا با توجه به نوع مسئله بهینه‌سازی و نوع محیط مورد نظر، تغییر این ضریب مقادیر متفاوتی را ارائه می‌دهد.

مرحله سوم

عملگر تقاطع (بازترکیبی)

در این بخش، بین بردار جهش‌یافته و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شد، یک ترکیب صورت می‌گیرد و بردار سنجش[1] تولید می‌شود. اساس این ترکیب ترکیب بر پایه ضریب CR می‌باشد، همان‌طور که اشاره شد ضریبی در بازه صفر تا یک می‌باشد. به این‌صورت که هر یک از مؤلفه‌های این بردار جهش‌یافته با احتمال CR به بردار کاندیدا منتقل می‌گردد و در غیر این صورت، مؤلفه معادل در بردار اصلی جایگزین می‌گردد. رابطه (۳) نشان‌دهنده این عملگر می‌باشد.

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} V_{ji,G+1} & If\ rand(j) \le CR\ \ or\ \ j = randb() \\ x_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۳)$$

در معادله (۳)، rand(j) jامین فراخوانی تابع تصادفی است که عددی میان صفر و یک تولید می-کند.البته برای تضمین اینکه حداقل یک مؤلفه به بردار آزمایشی منتقل می‌گردد، یک مؤلفه بصورت اتفاقی و بدون در نظر گرفتن CR از بردار جهش‌یافته به بردار آزمایشی منتقل می‌گردد. برای اینکار، برای هر بردار کاندیدا یک مؤلفه به صورت تصادفی و با استفاده از تابع randb() برای انتقال به نسل بعدی انتخاب می‌شود. به طور ساده می‌توان گفت که ضریب CR احتمال اشتراک خصوصیات یا مؤلفه‌های بین بردار جهش یافته و عضو هدف می‌باشد.

مرحله چهارم

انتخاب

در این مرحله، بردار سنجش به‌دست آمده از مرحله قبل و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شده بود با توجه به تابع هدف، ارزش‌دهی می‌شوند و در صورتی که بردار سنجش، ارزشی بیش از عضو هدف داشته باشد، یکی از اعضای نسل بعد قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، عضو هدف خود یکی از جمعیت نسل بعد می‌شود. رابطه (٤) بیان کننده انتخاب بین بردارسنجش و عضو هدف می‌باشد.

$$x_{ji,G+1} = \begin{cases} u_{ji,G+1} & If\ \ f(u_{i,G+1}) \le f(x_{i,G}) \\ x_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (٤)$$

در نهایت، این روند ادامه می‌یابد تا نسل جدید به تعداد NP برسد. سپس به همین صورت این روند تکرار می‌گردد تا شرایط خاتمه وصول گردد.

شکل (۱) نمایی کلی از مدل عددی الگوریتم تکامل تفاضلی مورد استفاده در این مقاله ارائه می‌کند، که تمامی مراحل بالا در این شکل به صورت عددی مشخص می‌باشد.

در این پژوهش همانند ساختار یک الگوریتم تکامل تفاضلی عمل شده است. مجدداً تابع هدف به ازای جمعیت جدید محاسبه شده و این روال آن‌قدر تکرار می-شود تا تمامی جواب‌ها به سمت نقطهٔ بهینه تخمین برای پارامتر ضریب یکنواختی معرفی گردد. عامل تعیین کننده ارزیابی، تابع هدف است که براساس میزان تطابق با ضریب یک نواختی اندازه گیری شده تعریف می‌گردد. برای رسیدن به یک رابطه غیرخطی که بتوان با استفاده از

[1] Trial Vector

Archive of SID

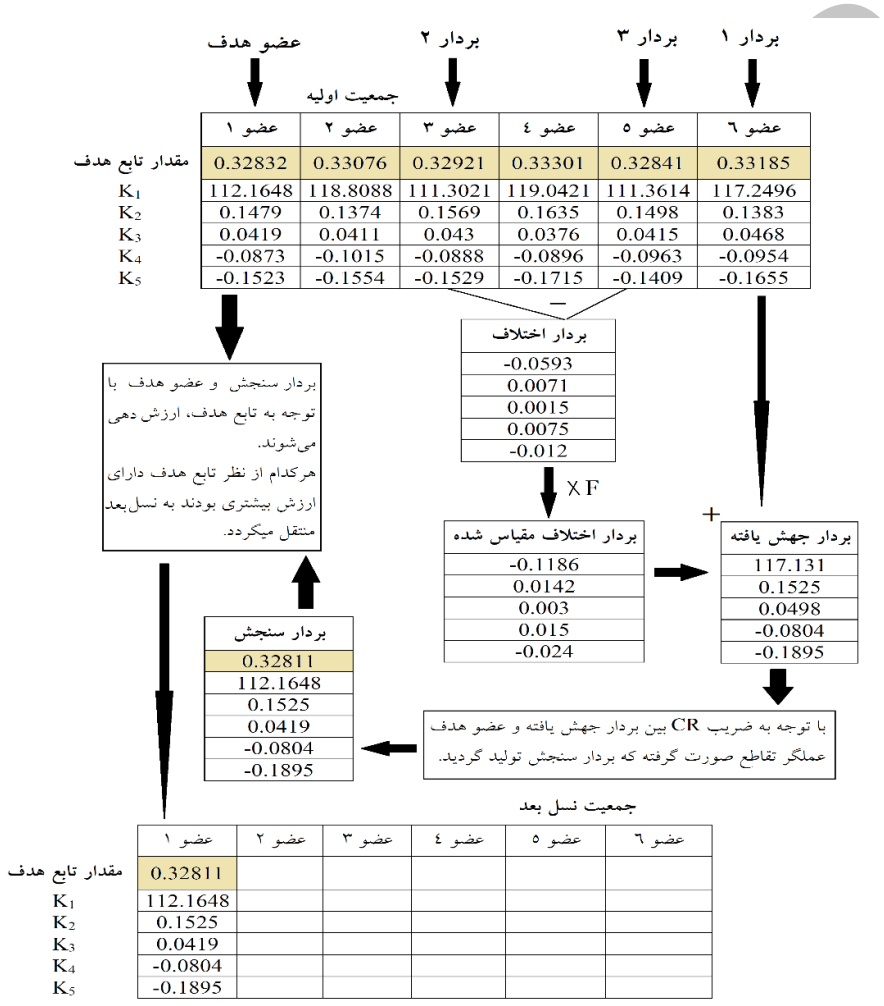
www.SID.ir

آن ضریب یکنواختی را به پارامترهای ذکر شده ربط داد باید از تابع هدف مجموع مربعات خطا به صورت زیر استفاده کرد:

$$\phi(s) = \sum_{i=1}^{n} \left(CU_i(m) - CU_i(s) \right)^2 \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، m و s به ترتیب اندیسی برای مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشند. در این تحقیق، از کل داده‌ها، با ۷۰٪ برآورد مدل صورت گرفته و ۳۰٪ باقیمانده برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به تحقیقات هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰)، معادله (٦) به منظور تخمین ضریب یکنواختی کریستیانسن 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.

$$CU = k_1 P^{k_2} RH^{k_3} S_l^{k_4} S_m^{k_5} \qquad (٦)$$



شکل۱- مدل عددی الگوریتم تکامل تفاضلی

که در آن:

P فشار بر حسب اتمسفر، RH ارتفاع پایه آبپاش بر حسب سانتی‌متر، Sl و Sm به ترتیب ضریب فاصله آب-پاش‌ها 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 تکامل تفاضلی بهینه خواهند شد. در این پژوهش برنامه ای در محیط برنامه نویسی نرم‌افزار Matlab برای شبیه‌سازی روش الگوریتم تکامل تفاضلی

www.SID.ir

تهیه شد و رابطه غیر خطی برای مقادیر مختلف ضریب F، ضریب CR، جمعیت متفاوت (NP) و تعداد نسل متفاوت (NG) مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت سنجی مدل‌های برازش شده بر نتایج آزمایشگاهی از سنجه‌های آماری خطای نسبی، خطای مطلق ، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تعیین (R^2) و در نهایت پارمتر d (ویلموت، ۱۹۸۱) 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 لوله-های جانبی از یکدیگر تعیین می‌گردد. هرچه مقدار R^2 و پارامتر آماری d ویلموت (۱۹۸۱) به عدد یک ، مقادیر RMSE نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی به صفر و میانگین نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه گیری شده به عدد یک نزدیک‌تر باشند، دقت تخمین رابطه بالاتر خواهد بود.

در مرحله نخست، برای به‌دست آوردن بهترین شرایط الگوریتم که بهینه‌ترین حالت ممکن را ارائه کند و در دام بهینه‌های موضعی گیر نکند.۱۰ ترکیب مختلف برای ضرایب F و CR مورد بررسی قرار گرفت جدول(۲). در هر ترکیب حالت، الگوریتم پنج مرتبه اجرا گردید که میانگین این پنج مرتبه برای مقایسه با دیگر حالات قرار داده شد. پس از بهترین ترکیب، مقادیر ضرایب F و CR الگوریتم برای استقلال حل از جمعیت مورد بررسی قرار گرفت در این بررسی جمعیت‌هایی برابر ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰عضو مورد بررسی قرار گرفتند، و در ادامه بهترین شرایط برای جمعیت که از نظر زمان اجرا منطقی باشد و نیز از دقت خوبی برخوردار باشد، انتخاب گردید.

در این حالت نیز برای هر جمعیت، الگوریتم پنج مرتبه اجرا گردید که میانگین این پنج مرتبه برای مقایسه با دیگر حالات قرار داده شد. در نهایت، بهترین ترکیب ضرایب و جمعیت برای بررسی اثر تعداد نسل مورد استفاده قرار گرفت که در این بررسی سه تعداد نسل ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت نیز برای هر تعداد نسل، الگوریتم پنج بار اجرا و متوسط آن برای مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۹۰ بار برای شرایط مختلف، الگوریتم اجرا گردید و بهترین حالت به‌دست آمد.

در مرحله اول، برای یافتن بهترین ترکیب ضرایب F و CR، ۱۰ حالت مختلف از ترکیب این ضرایب انتخاب شد، نحوه تست به این صورت بود که برای جمعیتی با ۱۰۰ عضو و تعداد نسل ۱۰۰۰، مرزهای پایین و بالا برای هر یک از ضرایب تست گردید و در هر تست جواب با جواب‌های قبلی مقایسه گردید و برای ترکیب بعدی تصمیم گیری شد. برای بررسی نتایج و مشخص کردن بهتر یا بدتر بودن جواب‌ها از پارامتر میانگین مجذور مجموع مربعات اختلاف داده‌ها($\eta(s)=\frac{\sqrt{\phi(s)}}{n}$) استفاده شده است.

نتایج و بحث

بررسی ضرایب مقیاس و احتمال تقاطع(F و CR)

جدول (۲) نشان دهنده ترکیبات و نتایج می-باشد. با توجه به این جدول مشخص است که برای مقادیر بالای ضریب F، میانگین مطلق اختلاف داده‌ها کمتر می‌باشد، که این خود نشان می‌دهد مشکل بهینه‌های محلی رفع گردیده است. زیرا طول گام جهش بیشترین مقدار خود را دارد. از طرف دیگر زمان اجرا نسبت به مقادیر پایین این ضریب کمتر است که خود یک مزیت اجرای این الگوریتم برای تابع مورد نظر می‌باشد.

در حالی‌که برای ضریب CR مرزهای بالا و پایین و مقادیر مابین بررسی گردید و مشخص است که عدد میانی که ۰/۵ می‌باشد بهترین جواب را دارد. مقدار میانی این ضریب نشان می‌دهد زمانی‌که سهم بردار جهش یافته و عضو هدف در تولید بردار سنجش یکسان باشد الگوریتم بهترین عملکرد در تولید بهتر عضوهای جدید را

Archive of SID

www.SID.ir

دارد. در نهایت، بهترین ترکیب ضرایب F و CR برای انجام مراحل بعد به‌ترتیب ۲ و ۰/۵ به‌دست آمد.

جدول۲- نتایج ترکیب ضرایب مقیاس و احتمال تقاطع (F و CR)

زمان اجرا (ثانیه)	میانگین مطلق اختلاف داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی	ترکیب ضرایب CR و F
۱۴	۰/۳۲۹۱	F=۰/۱ CR=۰/۱
۱۵	۰/۳۲۹۲	F=۰/۱ CR=۱
۱۰	۰/۳۳۰۷	F=۲ CR=۱
۱۰	۰/۳۲۹۶	F=۲ CR=۰/۱
۱۱	۰/۳۲۸۶	F=۲ CR=۰/۵
۱۱	۰/۳۲۹۳	F=۲ CR=۰/۳
۱۱	۰/۳۲۹۸	F=۱ CR=۰/۵
۱۲	۰/۳۲۹۰	F=۰/۹ CR=۰/۹
۱۳	۰/۳۳۰۱	F=۰/۶ CR=۰/۳

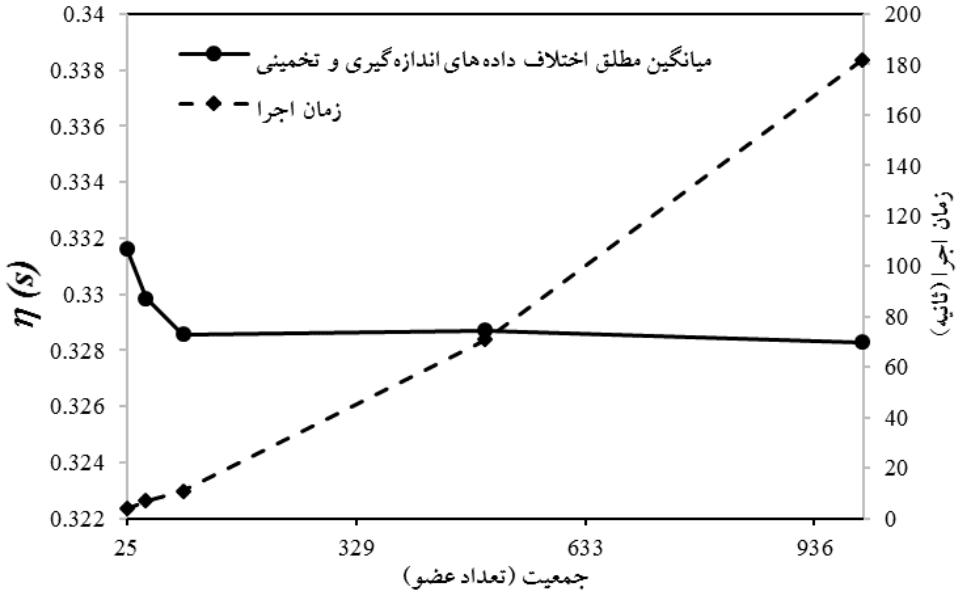
بررسی تعداد عضوهای جمعیت اولیه (NP)

پس از مشخص شدن بهترین ترکیب ضرایب، اثر تعداد عضو جمعیت بر دقت الگوریتم برای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی، جمعیت‌هایی برابر ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و۱۰۰۰ عضو مورد بررسی قرار گرفتند، که نتایج این بررسی در شکل (۲) مشخص می‌باشد. شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش تعداد اعضای جمعیت اولیه زمان اجرای الگوریتم را افزایش می‌دهد. این افزایش نسبتاً خطی می‌باشد.

دقت بهینه‌سازی از ۱۰۰ عضوی به بعد تغییرات ناچیزی را نشان می‌دهد، که این نشان می‌دهد الگوریتم در جمعیت ۱۰۰ عضوی می‌تواند به بهینه تابع غیرخطی مورد نظر برسد. این تحقیق نشان داد که برای صرفه‌جویی در وقت، جمعیت ۱۰۰ تایی برای بهینه سازی چنین توابع غیرخطی مناسب می‌باشد.

بررسی تعداد نسل تولید شده (NG)

در این الگوریتم، شرایط خاتمه بر اساس تعداد نسل تولید شده می‌باشد پس یکی از متغیرهای مورد بررسی در این مقاله بهترین تعداد نسل می‌باشد که در زمان کمتری جواب‌های بهینه مناسبی را ارائه می‌دهد. برای بررسی این متغیر در بهترین ضرایب F و CR و تعداد جمعیت ۱۰۰۰ عضوی سه تعداد نسل ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ برای شرایط خاتمه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳) نشان‌دهنده این بررسی می‌باشد.



شکل۲- اثر جمعیت بر زمان اجرا و دقت الگوریتم در تخمین ضرایب

Archive of SID

www.SID.ir

شکل۳- اثر تعداد نسل بر زمان اجرا و دقت الگوریتم در تخمین ضرایب

همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش تعداد نسل، زمان اجرا نیز افزایش پیدا کرده و می‌توان گفت یک رابطه خطی بین زمان اجرا و تعداد نسل می‌باشد. در حالی که رابطه بین دقت بهینه‌سازی الگوریتم با تعداد نسل یک رابطه غیر خطی از نوع نمایی می‌باشد. به اینصورت که از یک تعداد نسل به بعد تغییرات دقت بهینه‌سازی ناچیز می‌گردد.

شکل (۳) نشان می‌دهد در مرحله اول با دوبرابر کردن تعداد نسل زمان اجرا نیز تقریبا ۲/۱ برابر شده و دقت بهینه سازی ۲۱ درصد افزایش یافته، ولی در مرحله دوم با ۱۰ برابر کردن تعداد نسل، زمان اجرا ۱۰/۲ برابر شده، اما دقت بهینه‌سازی پنج درصد افزایش پیدا کرده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت برای این حالت تعداد نسل ۱۰۰۰ بار با توجه به زمان اجرا مناسب بهترین گزینه می‌باشد.

رابطه بهینه پیشنهادی برای ضریب یکنواختی(CU)

پس از ۹۰ اجرا در مدل الگوریتم تکاملی تفاضلی برای رسیدن به کمترین مقدار معادله (۵) مقدار تکرار برابر ۱۰۰۰، تعداد جمعیت اولیه برابر ۱۰۰۰، پارامتر F برابر دو و پارامتر CR برابر ۰/۵ در نظر گرفته شدند.

بر اساس رابطه (٦)، روی ۷۰٪ از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط الگوریتم تکامل تفاضلی بهینه‌ترین ضرایب به صورت رابطه (۷) به‌دست آمد. ضریب یکنواختی حاصل از این رابطه بهینه در جدول (۳) مشخص می‌باشد.

$$CU = 111.61P^{0.1483}RH^{0.0411}S_l^{-0.0925}S_m^{-0.1443} \quad (۷)$$

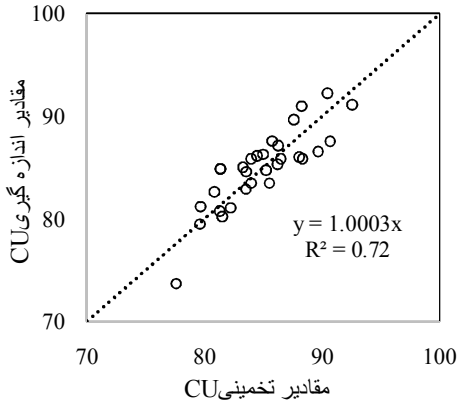
شکل (٤) نتایج مقایسه ضریب یک نواختی تخمین زده شده از رابطه (۷) و ضریب یک نواختی اندازه گیری شده در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (٤) پارامترهای آماری محاسبه شده برای این ۷۰٪ داده مشخص می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

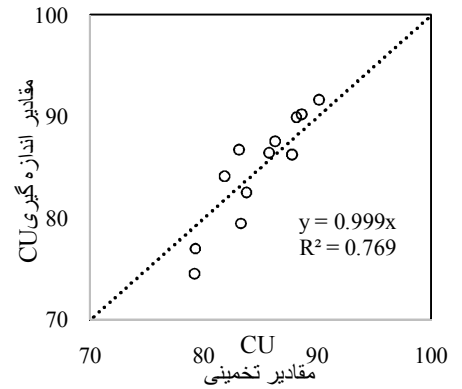
جدول ۳- ضریب یکنواختی توزیع آب تخمینی در تیمارهای مختلف فشار، ارتفاع پایه آبپاش و فواصل آبپاش

فشار (P) (اتمسفر)	ارتفاع پایه آبپاش (RH)(سانتیمتر)	فواصل آبپاش بر حسب متر ($S_m \times S_l$)						
		۱۵×۱۸	۱۵×۱۵	۱۲×۱۸	۱۵×۱۲	۱۲×۱۲	۹×۱۵	۹×۱۲
۳/۵	۶۰	۸۱/۵۷	۸۳/۷۴	۸۳/۲۷	۸۶/۴۸	۸۸/۲۹	۸۷/۷۹	۹۰/۶۷
	۱۰۰	۸۳/۳۰	۸۵/۵۲	۸۵/۰۴	۸۸/۳۲	۹۰/۱۶	۸۹/۶۶	۹۲/۵۹
۳	۶۰	۷۹/۷۳	۸۱/۸۵	۸۱/۳۹	۸۴/۵۳	۸۶/۲۹	۸۵/۸۱	۸۸/۶۲
	۱۰۰	۸۱/۴۲	۸۳/۵۹	۸۳/۱۱	۸۶/۳۲	۸۸/۱۲	۸۷/۶۳	۹۰/۵۰
۲/۵	۶۰	۷۷/۶۰	۷۹/۶۷	۷۹/۲۲	۸۲/۲۸	۸۳/۹۹	۸۳/۵۲	۸۶/۲۵
	۱۰۰	۷۹/۲۵	۸۱/۳۶	۸۰/۹۰	۸۴/۰۲	۸۵/۷۷	۸۵/۲۹	۸۸/۰۸



شکل۴- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج تخمین زده شده برای داده‌های واسنجی

در ادامه، مدل به‌دست آمده از ۷۰٪ داده ها با ۳۰٪ باقیمانده داده‌های اندازه‌گیری شده صحت‌سنجی گردید (جداسازی ۳۰٪ داده‌ها به صورت تصادفی صورت گرفت). شکل (۵) نتایج مقایسه ضریب یکنواختی تخمین زده شده از رابطه (۷) و ضریب یکنواختی اندازه‌گیری شده در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. خلاصه تحلیل‌های آماری صورت گرفته در جدول (٤) برای آزمون واسنجی، آزمون صحت‌سنجی و کل داده‌ها نشان داده شده است.



شکل۵- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج تخمین زده شده برای داده‌های صحت‌سنجی

Archive of SID

www.SID.ir

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

آزمون‌ها	RMSE	MAE	R^2	خطای مطلق	خطای نسبی	d (Willmot)
واسنجی(۷۰٪ داده‌ها)	۱/۹۷۰	۰/۰۴۵	۰/۷۲۰	٪۲/۰۲	٪۰/۰۲	۰/۹۲۲
صحت‌سنجی(۳۰٪ داده‌ها)	۲/۴۷۲	۰/۰۹۴	۰/۷۶۹	٪۲/۶۳	٪۰/۲۶	۰/۹۱۵
کل داده‌ها	۲/۱۲۶	۰/۰۰۵	۰/۷۴۱	٪۲/۲	٪۰/۰۶	۰/۹۱۹

با توجه به پارامترهای آماری در جدول (٤) مشخص است که رابطه با ضرایب بهینه شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است. بطوریکه خطای مطلق کل داده‌ها ٪۲/۲ می‌باشد. مقادیر RMSE و MAE نسبت به محدوده داده‌ها بسیار خوب است و همچنین پارامتر آماری ویلموت (d) هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نشان-دهنده تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری و داده‌های تخمین زده شده می‌باشد، که مقدار ۰/۹۱۹ برای کل داده‌ها نشانه از این دارد که ضرایب بهینه به‌دست آمده بسیار مناسب می‌باشند.

هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) ضرایبی را توسط الگوریتم ژنتیک برای این داده‌ها برآورد کردند. R^2 به‌دست آمده برای آزمون واسنجی آنها برابر ۰/۵۷۱ می-باشد و همچنین آنها مقدار ۳/۵۷ را برای پارامتر RMSE در آزمون صحت‌سنجی به‌دست آوردند و مقدار تابع $\phi(s)$ را برابر ۱۹۱/۰۳۸ برای کل داده‌ها به‌دست آوردند.در حالی که پارامترهای به‌دست آمده فوق در این تحقیق به‌ترتیب برابر ۰/۷۲۰ و ۲/٤۷۲ و ۱۸۹/۷٦٦ می-باشد.مقایسه این عداد نشان می‌دهد که ضرایب بهینه به-دست آمده از الگوریتم تکامل تفاضلی نسبت به الگوریتم ژنتیک بهتر می‌باشد. زیرا تابع $\phi(s)$ با ضریب‌های به-دست آمده از این تحقیق مقدار کمتری را نشان می‌دهد.

همچنین می‌توان گفت با توجه به حداکثر بودن توان P در رابطه (۷)، نتایج این پژوهش، نتایج پژوهش مونترو و همکاران (۲۰۰۳) مبنی بر این که فشار کارکرد، اصلی‌ترین عامل سیستمی مؤثر بر توزیع آب در آبیاری بارانی است را تأیید می‌کند. نمای کوچک ارتفاع پایه آبپاش (k_3)، بیانگر عدم تأثیر محسوس افزایش ارتفاع پایه آب‌پاش (از ٦۰ به ۱۰۰ سانتی‌متر)، بر یکنواختی توزیع آب است. این نتیجه با نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی کاملا تطابق دارد. اضافه بر این که در عمل، حداقل ارتفاع پایه آبپاش به ارتفاع گیاه نیز بستگی دارد. به طورکلی در ارتفاع پایه آب‌پاش ۱۰۰ سانتی‌متر آب به شکل یکنواخت‌تری توزیع گردید. ضمن اینکه حداکثر یکنواختی توزیع آب در آرایش مربعی ۱۲×۱۲ 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 سه اتمسفر، آب با یکنواختی بیشتری توزیع می‌گردد. 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 سه اتمسفر در پایه آب‌پاش ۱۰۰ سانتی‌متری یک فشار پیشنهادی برای حصول حداکثر یکنواختی توزیع آب می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، ضرایب رابطه غیرخطی یکنواختی پخش در آبیاری بارانی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهینه گردید. ضرایب F و CR برای بهینه کردن این تابع غیرخطی برابر ۲ و ۰/۵ بهترین جواب را ارائه می‌کنند. همچنین بررسی تعداد اعضای جمعیت اولیه نشان داد که جمعیت ۱۰۰ عضوی با توجه به زمان اجرا بسیار مناسب می‌باشد. بررسی تعداد نسل (تکرار) نشان داد تعداد ۱۰۰۰ تکرار برای تولید نسل جواب‌های خوبی را ارائه داده است.

یکی دیگر از نتایج این تحقیق این است که الگوریتم تکامل تفاضلی سرعت همگرایی بسیار بالایی در پیدا کردن نقطه بهینه روابط غیرخطی را دارد.

Archive of SID

www.SID.ir

الگوریتم تکامل تفاضلی 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 تخمین زده شده برابر ۲/۲ درصد بود. همچنین میانگین مجذور مجموع مربعات اختلاف داده‌ها($\eta(s)=\frac{\sqrt{\phi(s)}}{n}$) توسط این الگوریتم برابر ۰/۳۲۸ به‌دست آمد.

به‌طورکلی میتوان بیان کرد که الگوریتم بهینه-سازی تکامل تفاضلی برای بهینه کردن توابع غیرخطی بسیار خوب می‌باشد و نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دارای سرعت همگرایی به مراتب بالاتری می‌باشد و در عین در حال مشکل بهینه‌های محلی را نیز ندارد.

فهرست منابع

۱. علیزاده، ا. ۱۳۸۱. طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ٦٥٦ صفحه.

۲. هزارجریبی، ا.، دهقانی، ا.ا.، حسام، م.، شریفان، ح. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸(٤): ١٤٤-١٢٩.

3. Babu, B. V. and Angira, R. 2003 Optimization of water pumping system using differential evolution strategies. In: Proceedings of the Second International Conference on Computational Intelligence, Robotics, and Autonomous Systems (CIRAS- 2003), Singapore, pp. 25–30.
4. 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.
5. Carrion, P., J.M. Tarjuelo and J. Montero. 2001. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation: I. Description of model. Irrig. Sci. 20(2): 73-84.
6. Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by Sprinkling. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670, University of California, Berkeley, CA.
7. Dabbous, B. 1962. A study of sprinkler uniformity evaluation method. M.Sc.Thesis, Utah State University at Logan, Utah.
8. Hart, W.E., and Reynolds, W.N., 1965. Analytical design-sprinkler system.Transactions, Am. So. Agric. Eng., 1: 83-89.
9. Heerman, D.F. 1983. Design and operation of farm irrigation systems. ASAE. 591-600.
10. Janga Reddy, M. and Nagesh Kumar, D., 2007, Multi-objective differential evolution with application to reservoir system optimization. J. Comput. Civil Eng., 21(2): 136–146.
11. Karmeli., D. 1997. Estimating sprinkler distribution pattern using linear regression. Trans. Ame. Soc. Agric. Eng., 21(4): 682-685.
12. Keller, J. and Bliesner, R.D. 1990, Sprinkler and Trickle Irrigation. Van Nostrand Reinhold, NewYork, USA. 652 p.
13. Montero, J., Tarjuelo, J.M. and Carrion, P. 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer. Irrig. Sci. 22: 47-56.
14. Storn, R. and Price, K. 1995, Differential Evolution- A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces. Technical report, International Computer Science Institute, Berkeley, CA.

Archive of SID

www.SID.ir

15. Osei, F.K.B. 2009. Evaluation of sprinkler irrigation system for improved maize seed production for farmers in Ghana. A Thesis for M.sc. March: http:// dspace.knust.edu.gh/dspace/bitstream/123456789/1939/1/fulltxt.pdf
16. Storn, R. and Price, K. 1997, Differential evolution - A simple and effcient heuristic for global optimization over continuous spaces. J. Global Optimization, 11: 341 -359.
17. Vasan, A. and Raju, K. 2007, Application of differential evolution for irrigation planning: An Indian case study. Water Resour. Manage. 21(8): 1393–1407.
18. Vories, E.D., and Von Bernuth, R.D., 1986, Single nozzle sprinkler performance in wind. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 29: 1325-1330.
19. Willmott, C. J. 1981 On the validation of models. Phys. Geog. 2: 184-194.

Archive of SID

www.SID.ir