مجله علمی- پژوهشی
دوره ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸

بهینه‌سازی سیستم فازی توسط الگوریتم ژنتیک و کاربرد آن در برآورد میزان هوادهی بعد از دریچه‌های مجاری تخلیه‌کننده تحتانی

محمدرضا کاویان‌پور[۱*]، محمدرضا نجفی[۲]

۱- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

*** تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶ - ۱۵۸۷۵**

kavianpour@kntu.ac.ir

چکیده- یکی از مهم‌ترین سازه‌های جانبی سدها، مجاری تخلیه‌کننده تحتانی است که برای کنترل حجم آب مخزن سد، تنظیم حقابه پایین‌دست و تخلیه رسوبهای پشت سد به‌کار می‌رود. کاویتاسیون یکی از مهم‌ترین مشکلات این سازه‌ها به‌ویژه پس از دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی است. تزریق هوا به جریان توسط هواده‌های مستقر بعد از دریچه‌ها یکی از بهترین روشهای شناخته شده برای کنترل کاویتاسیون است. به‌دلیل پیچیدگی‌های شرایط جریان در ناحیه تبدیل جریان تحت فشار به سطح آزاد، تخمین میزان هوادهی، مگر با ساخت مدل مقیاس شده، معمولاً با خطای زیادی همراه است. در دهه‌های اخیر نتایج کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسائل مختلف که سیستم فازی یکی از مهم‌ترین آنها است، نشان‌دهنده قابلیت بالای آنها در مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی بوده است. کاربرد سیستم فازی و اصلاح آن به‌کمک الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی براساس داده‌های آزمایشگاهی، یکی از روشهای مؤثر در مسائل غیرخطی شناخته شده است. در مقاله حاضر از مدل طراحی شده بر مبنای الگوریتم ژنتیک- فازی در پیش‌بینی فرایند هوادهی در پایین‌دست دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. در ساخت مدل، حدود ۲۴۳ داده شامل اطلاعات هوادهی جمع‌آوری شده از مدل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدهای ایران و مجرای تحتانی سد فولسوم استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از قابلیت بالای این سیستم در تخمین هوادهی در مجاری تخلیه‌کننده در مقایسه با روابط تجربی معمول است.

کلید واژگان: سیستم فازی، ژنتیک- فازی، عصبی- فازی، تخلیه‌کننده تحتانی، هوادهی، کاویتاسیون.

۱- مقدمه

در سطوح مختلف بازشدگی دریچه‌های مستقر در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها، به‌علت سرعت بالای جریان، فشار در پشت دریچه افت کرده و پدیده مخرب کاویتاسیون را به وجود می‌آورد. در این شرایط، هوادهی جریان نسبت به سایر روش‌های کنترل کاویتاسیون مؤثرتر و از نظر اجرایی و طراحی آسانتر است. برای تعیین هوای

مورد نیاز، روابط تجربی متعددی ارائه شده که معمولاً به مدل‌های خاص محدود بوده و همچنین تمامی عوامل مؤثر بر هوادهی را در نظر نگرفته‌اند.

برای تعیین میزان هوادهی در پایین‌دست دریچه‌ها، روشهای مختلفی به‌کار رفته است. روشهای تحلیلی به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی پدیدهٔ هوادهی قابل اتکا نبوده و لذا استفاده از روشهای تجربی مبتنی بر اندازه‌گیری در مدل آزمایشگاهی یا در واقعیت، مورد توجه قرار گرفته است. Kalinske and Robertson (1943) اولین محققانی بودند که در زمینه هواگیری جریان در مجاری بسته تحقیقاتی را انجام دادند. ایشان جریان با پرش هیدرولیکی را بررسی کرده و از نتایج آزمایشها در مجراهایی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر رابطه (۱) را برای β ضریب هوادهی جریان (نسبت دبی هوا به دبی آب) بر اساس عدد فرود جریان بالادست Fr پیشنهاد کردند:

$$\beta = 0.0066(Fr-1)^{1.4} \qquad (۱)$$

نتایج به‌دست آمده از مدل‌های بزرگتر و واقعی نشان داد که ظرفیت هواگیری پرش در مجاری بسته، با افزایش ابعاد مجرا، افزایش یافته و بر این اساس، برای پوش بالایی نتایج واقعی ضریب ۰/۰۰۶۶ در رابطه (۱) به حدود ۰/۰۱۵ تغییر می‌یابد (Novak, 1984). محققان USACE نیز بر اساس نتایج اندازه‌گیری میزان هوای ورودی از هواده در چند تخلیه‌کننده، تأثیر هندسه تونل را بررسی کردند (USACE, 1964). نمودار دبی هوا در هواده (Q_{av}) بر حسب بازشدگی نسبی دریچه ترسیم شده توسط آنها، دو بیشینه دارد که اولی به جریان پودری در بازشدگی‌های کم و دومی به جریان با سطح آزاد یا جریان با پرش هیدرولیکی در بازشدگی‌های بالاتر مربوط می‌شود. آنان با اندازه‌گیری میزان هوا در تخلیه‌کننده چند سد و تحلیل داده‌ها، پوش بالای آنها را با رابطه (۲) بر اساس عدد فرود در محل فشردگی جریان Fr_c توصیف کردند.

$$\beta = 0.03(Fr_c-1)^{1.06} \qquad (۲)$$

Sharma (1976) برای تعیین هوای مورد نیاز در جریان پودری، جریان با سطح آزاد (با پرش هیدرولیکی)، آزمایشهایی را در مجرای مستطیلی با ابعاد ۱۰۰mm در ۱۵۰mm انجام داده و از داده‌های مدل واقعی نیز استفاده کرد. وی به‌عنوان پوش داده‌ها در دو حالت مختلف، روابط خطی زیر را پیشنهاد کرد:

$$\beta = 0.09Fr_c \qquad \text{سطح آزاد} \qquad (۳)$$

$$\beta = 0.2Fr_c \qquad \text{پودری} \qquad (۴)$$

کاویان‌پور (۱۳۸۰) با بررسی نتایج آزمایشگاهی میزان هوای ورودی هواده مدل‌های چند تخلیه‌کننده، حدبالا و پایین هوادهی جریان توسط هواده جریان با سطح آزاد را به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$\beta = 0.18(Fr_c-1)^{0.75} \qquad \text{حد بالا} \qquad (۵)$$

$$\beta = 0.0012(Fr_c-1)^{1.39} \qquad \text{حد پایین} \qquad (۶)$$

وی با بررسی جت خروجی دریچه در مدل‌های مختلف، نتیجه‌گیری کرد که به‌علت شرایط هندسی مختلف در مجرای پایین‌دست دریچه، در برخی مدل‌ها جت فقط از یک طرف (سطح بالای آب) و در برخی دیگر از چهار طرف هواگیری کرده که این باید در مدل‌سازی مورد توجه باشد. کاویان‌پور و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی میزان دقت روابط ارائه شده در تعیین میزان هوای مورد نیاز بعد از دریچه‌های تحتانی سدها پرداختند. مقایسه بین نتایج روابط تجربی محققان مختلف با نتایج مدل‌های فیزیکی تخلیه‌کننده‌های گوناگون نشان داد که خطا در محدوده وسیعی از ۱۱۰٪ تا ۵۵۰٪ قرار دارد. کاویان‌پور و نجفی (۱۳۸۶) کاربرد مدل فازی ساده و در تحقیقی دیگر کاویان‌پور و همکاران (۲۰۰۷) کاربرد مدل فازی همراه با روش خوشه‌سازی و عصبی را در تعیین تقاضای هوا در

مجرای تخلیه‌کننده تحتانی بررسی کردند که نتایج، نشان‌دهنده دقت بالای سیستم عصبی-فازی به کمک خوشه‌سازی در پیش‌بینی هوادهی و لزوم بهینه‌سازی پارامترهای سیستم فازی ساده بوده است.

مطالعات انجام شده در راستای توسعه این روابط، بیشتر بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی با شرایط خاص هر مدل بوده و نتایج آنها قابل تعمیم به شرایط دیگر نبوده و در صورت کاربرد، با خطای قابل توجهی همراه است. بنابراین در تحقیق حاضر با رویکرد توجه به شرایط مختلف، شبیه‌سازی پدیده توسط الگوریتم های هوشمند انجام شده است.

منطق فازی با کاربردهای وسیعی در طبقه‌بندی، مدل‌سازی و کنترل سیستم‌ها، توانایی خود را در زمینه‌های مختلف به اثبات رسانده است. در بیشتر موارد، ایجاد مدل فازی کارامد، نیازمند استفاده از دانش انسان خبره است. علی‌رغم این موضوع در دهه ۱۹۹۰، نبود قابلیت یادگیری در سیستم‌های فازی باعث شد که محققان به اضافه کردن توانایی یادگیری به این سیستم‌ها بپردازند. یکی از این مدل‌ها سیستم ژنتیک-فازی است که در این تحقیق در تخمین میزان هوادهی در مجاری تخلیه‌کننده تحتانی استفاده شده و نتایج آن با نتایج مطالعات قبلی مبتنی بر سیستم ترکیبی عصبی-فازی مقایسه شده است.

در ساخت مدل‌های حاضر، حدود ۲۴۳ داده شامل اطلاعات هوادهی در مدل تخلیه‌کننده تحتانی سدهای البرز، جگین، جره، گاوشان، سیمره، کوثر، تهم، کرخه و تونل انتقال دشت عباس که توسط کاویانپور در طی چند سال در مؤسسه تحقیقات آب تهیه شده و همچنین نتایج آزمایشهای مجرای تحتانی سد فولسوم استفاده شده است (Speerl et al. 1997).

۲- منطق فازی و الگوریتم‌های ژنتیک

نظریه مجموعه‌های فازی نخستین‌بار توسط لطفی‌زاده (۱۹۶۵) ارائه شد. مجموعه فازی شامل اعضایی با درجه عضویت پیوسته بین صفر تا یک است. لذا، هر عضو ممکن است با درجه‌های متفاوتی به مجموعه‌های مختلف تعلق داشته باشد.

قواعد اگر-آنگاه فازی، هسته سیستم استنتاج فازی را تشکیل می‌دهد (Jang et al. 1997). قاعده اگر-آنگاه ممکن است به شکل زیر بیان شود که در آن x و y متغیرهایی هستند که مقادیر را بترتیب در مجموعه‌های مرجع[1] U و V دریافت می‌کنند. A و B به‌ترتیب مجموعه‌های فازی در U و V هستند:

IF x is A THEN y is B

به‌عنوان مثال در هوادهی مجاری، با ملاحظه بازشدگی دریچه به‌عنوان متغیر، قاعده اگر-آنگاه به شکل اگر بازشدگی دریچه زیاد باشد، آنگاه میزان هوای ورودی به مجرا کم است، ممکن است به‌کار رود. در این قاعده، زیاد و کم نمایانگر مجموعه‌های فازی هستند که در مجموعه مرجع تعریف شده و شرایط هوادهی را با توجه به بازشدگی دریچه توصیف می‌کنند.

سیستم ژنتیک-فازی، سیستمی فازی است که در نوعی روند یادگیری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌هایی جستجوگر هستند که ایده آنها از فرایندهای طبیعی ژنتیکی گرفته شده و قابلیت خوب جستجو را در فضاهای پیچیده داشته و لذا در حل مسائلی که نیازمند جستجوهای مؤثر هستند، مناسبند. با اعمال بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک، حل مسائلی با درجات مختلف پیچیدگی از ساده‌ترین شکل بهینه‌سازی پارامتر تا بالاترین درجه پیچیدگی در

1. Universal of Discourse

یادگیری مجموعه قواعد در سیستم مبتنی بر قواعد فازی امکان‌پذیر است. در سیستم‌های ژنتیک-فازی مبتنی بر قواعد، اجزای مختلف سیستم فازی شامل قواعد و پارامترهای توابع عضویت توسط الگوریتم‌ژنتیک تنظیم می‌شود (Cordon et al. 2004). طراحی فرایندهای ژنتیکی برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم فازی ساده، در سیستم ژنتیک- فازی دنبال می‌شود. ایده اصلی الگوریتم‌های ژنتیک، ایجاد جمعیتی از کروموزوم‌ها (نمایانگر جواب‌های احتمالی مسأله) است که به مرور در روندی رقابتی همراه با تغییرات کنترل شده، بهبود می‌یابد. علی‌رغم وجود انواع مختلف الگوریتم‌ژنتیک، سازوکار اصلی مشتمل بر سه عملکرد ارزیابی تک‌تک جوابها (مقادیر برازندگی‌ها)، ایجاد مجموعهٔ ژن‌ها (جمعیت میانی) توسط سازوکار انتخاب و ایجاد کروموزوم‌های جدید توسط عملگرهای ترکیب و جهش است. در حالت یادگیری در سیستم مبتنی بر قواعد، احتمالات وسیعتری وجود داشته و فضای جستجو بزرگتر و دارای پیچیدگی‌های بیشتری است.

پر کاربردترین سیستم ژنتیک-فازی، سیستم مبتنی بر قواعد[1] است که در آن الگوریتم ژنتیک برای یادگیری یا تنظیم مؤلفه‌های مختلف سیستم فازی مبتنی بر قواعد به‌کار می‌رود. نکته اصلی در این‌گونه مسائل، به‌کار بردن نوعی برنامه یادگیری تکاملی در ایجاد پایگاه دانش[2] به‌صورت خودکار است که می‌تواند مسأله جستجو یا بهینه‌سازی قلمداد شود. از دیدگاه بهینه‌سازی، هدف، پیدا کردن پایگاه دانش متناسب با مسأله خاص است که با پارامتری کردن پایگاه دانش فازی، شامل قواعد و توابع عضویت و پیدا کردن مقادیری برای آن پارامترها انجام می‌شود. پارامترهای پایگاه دانش، فضای بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند. در این فضا این پارامترها به کروموزوم‌های ژنتیکی مناسبی تبدیل شده و سپس این کروموزوم‌ها تحت فرایند جستجو قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که فضای جستجوی با ابعاد کوچک‌تر، روند یادگیری را سریع‌تر و ساده‌تر می‌کند، اما ممکن است موجب شود که جوابهای به‌دست آمده، بهینه محلی[3] باشند. از طرف دیگر، فضای جستجوی کامل و بزرگ که کل پایگاه دانش را پوشش دهد و همچنین تمام پارامترها را جزء به جزء در نظر گرفته باشد، به احتمال زیاد حاوی جواب‌های بهینه خواهد بود، اما ممکن است جستجو بسیار آهسته و ناکارامد شود. با در نظر گرفتن این ملاحظات این نتیجه حاصل می‌شود که باید تعادلی خاصی بین کامل بودن و دربرداشتن جزئیات فضای جستجو از یک طرف و کارایی جستجو از طرف دیگر برقرار باشد.

۳- مدل‌سازی هوادهی با سیستم استنتاج ژنتیک-فازی

در سیستم ژنتیک-فازی، متغیرهای بازشدگی دریچه، سطح مقطع مجرا در محل دریچه، بلندای[4] بالادست مجرا و شاخص نحوه هوادهی به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شد. شاخص نحوه هوادهی به‌صورت نسبت سطح مقطع مجرا در پایین‌دست دریچه به سطح مقطع بالادست تعریف شده است. این شاخص نشان‌دهنده آنست که هوادهی به شکل سطحی یا از چهار طرف صورت می‌گیرد. مدل فازی مورد استفاده از نوع میدانی است. در این سیستم تعداد قواعد فازی برابر ۲۰ در نظر گرفته شد. تعداد بیشتر قواعد باعث افزایش تعداد

1. Rule Based Systems
2. Knowledge Base
3. Suboptimal
4. Head

پارامترهای مجهول و همچنین کاهش سرعت جستجو می‌شود. پس از اتمام جستجو، از ۲۰ قاعده، دو قاعده حذف شد و سرانجام تعداد قواعد فازی برابر ۱۸ حاصل شد. در مدل فازی پارامتری، هر متغیر ورودی، ناحیه را به چهار قسمت و متغیر خروجی را به نه قسمت تقسیم کرده است.

تمامی توابع عضویت خروجی شامل توابع گوسی و توابع عضویت ورودی شامل توابع Z شکل، S شکل و دو تابع گوسی است. با توجه به این پیش‌فرض‌ها، پایگاه دانش توسط الگوریتم ژنتیک شامل تنظیم پارامترهای توابع عضویت، استخراج قواعد فازی و تعیین درجه درستی هر قاعده، بهینه‌سازی شد. زیاد شدن تعداد پارامترهای مجهول سبب کاهش کارایی الگوریتم ژنتیک شده و لذا با انتخاب پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر هوادهی (کاویان‌پور و همکاران، ۲۰۰۷) سعی در کاهش تعداد متغیرهای مجهول تا حد امکان بود. ضمن بررسی روشهای بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ساده‌ای برای حل شرایط پیچیده بهبود داده شد.

رویکرد مورد استفاده در سیستم ترکیبی، رویکرد پیتسبورگ است که در آن نخست تمامی پارامترهای توابع عضویت ورودی–خروجی و کل پایگاه قواعد به‌صورت پارامتری در نظر گرفته شده و تمامی آنها در داخل یک کروموزوم قرار می‌گیرند. سپس جمعیت اولیه کروموزوم‌ها به شکل تصادفی ایجاد و مدل اجرا شد. چنانچه در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، تعداد ۱۷۰ پارامتر مجهول، شامل پارامترهای توابع عضویت ورودی و خروجی، لیست قواعد و درجه درستی هر قاعده وجود دارد. استفاده از الگوریتم ژنتیک باینری باعث ایجاد کروموزوم‌هایی با طول بسیار زیاد می‌شود. به‌عنوان مثال اگر به هر پارامتر مجهول به‌طور متوسط ۱۰ بیت اختصاص یابد، طول هر کروموزوم برابر ۱۷۰۰ بیت می‌شود که پیاده‌سازی عملگرهای جهش یا ترکیب را بر روی این کروموزوم‌ها با مشکلات جدی مواجه می‌سازد. به این دلیل و با توجه به سایر تحقیقاتی که کارایی بالای الگوریتم ژنتیکی حقیقی را نشان داده‌اند، در این تحقیق از این نوع الگوریتم استفاده شد که در آن هر بیت نشان دهنده یک پارامتر مجهول است.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای مختلف الگوریتم ژنتیک

تعداد سعی	۲۴۶۲
تعداد جمعیت	۱۰۰
طول کروموزوم (در روش حقیقی)	۱۷۰
احتمال ترکیب (P_c)	۰/۹
احتمال جهش (P_m)	۰/۰۰۲

در انتخاب کروموزوم‌ها از نسلی به نسل بعد، از انتخاب رقابتی با اندازه رقابت سه کروموزوم استفاده شده است. عمل انتخاب در فضای نمونه‌گیری توسعه‌یافته صورت گرفت. بدین ترتیب که نوزادان تولید شده به جمعیت اضافه شد و از بین جمعیت کروموزوم‌های برتر، تعدادی برای انتقال به نسل بعدی انتخاب شد. در ترکیب کروموزوم‌ها از عملگر ترکیب حسابی استفاده شدند. به خلاف الگوریتم ژنتیک باینری که در آن با جابه‌جا شدن بیت‌ها، مقادیر جدیدی تولید می‌شوند، در ترکیب کروموزوم‌های حقیقی در صورت استفاده از عملگرهای تک‌نقطه‌ای یا چندنقطه‌ای، هیچگونه عدد جدیدی تولید نمی‌شود و فقط مکان آنها در کروموزوم جابه‌جا میشود. در این‌صورت روش اصلی برای جلوگیری از توقف در بهینه‌های محلی، تکیه بر اعداد تصادفی تولید شده در ابتدای کار بوده و پس از آن فقط از طریق عملگر جهش می‌توان فضای حل را گسترش داد. لذا در این حالت با

توجه به طول زیاد کروموزوم‌ها احتمال همگرایی مدل در بهینه‌های محلی زیاد است. در این تحقیق با برنامه‌ریزی مشخصی در حین اجرای مدل، علاوه بر جهش، جوابهایی تصادفی به مدل اعمال شده تا مدل از بهینه‌های محلی دور شود.

عمل ترکیب بدین صورت انجام شد که در ابتدا عددی بین ۱ تا ۱۷۰ به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده بیت‌هایی از دو کروموزوم والد است که با هم ترکیب شده و بیت جدیدی را تولید می‌کنند (رابطه ۸). همچنین از آن بیت به سمت چپ یا راست برای سایر بیت‌ها عمل تکرار می‌شود. بدین صورت که فرض کنید دو کروموزوم والد به شکل زیر باشند:

$$Mather = Parent_1 = [P_{m1}, P_{m2} \ldots P_{ma} \ldots P_{mNvar}]$$
$$Father = Parent_2 = [P_{d1}, P_{d2} \ldots P_{da} \ldots P_{dNvar}] \qquad (۷)$$

پس از آن متغیرهای انتخاب شده برای ایجاد متغیرهای جدید یا کروموزوم‌های جدید در نوزادان به شکل زیر با هم ترکیب می‌شوند که در آن r عددی تصادفی بین صفر و یک است:

$$Pnew_1 = P_{ma} - r\,[P_{ma} - P_{da}]$$
$$Pnew_2 = P_{da} + r\,[P_{ma} - P_{da}] \qquad (۸)$$

در این روابط P_{ma} و P_{da} به‌ترتیب کروموزوم مادر و پدر و P_{mi} و P_{di} نیز به‌ترتیب ژن‌های حامل این کروموزوم‌های والد مادر و پدر می‌باشند. در این روش تا زمانی‌که $r<1$ باشد، مقادیر متغیرهای جدید از مرزهای تعریف شده در والدین فراتر نمی‌رود.

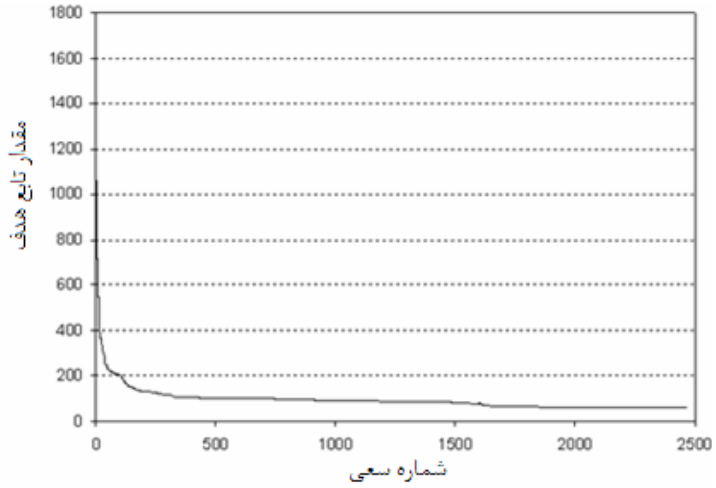
هم‌چنانچه گفته شد برای افزایش قابلیت الگوریتم ژنتیک از روشهایی استفاده شد. از جمله طی هر نسل، تعداد فرزندان و والدین تقریبا سه برابر تعداد کل جمعیت شد و نسل بعد از میان این جمعیت انتخاب شد. افزایش جمعیت با تولید نوزادان به سه شکل مختلف از طریق عملگر ترکیب و اضافه کردن آن به جمعیت والدین و در نتیجه ایجاد فضای نمونه‌گیری توسعه یافته صورت گرفت. در ترکیب اول به روش بالا پس از انتخاب نقطه ترکیب، سایر بیت‌های واقع در سمت چپ با هم ترکیب شدند. در روش دوم عمل قبل تکرار شد، اما بیت‌های واقع در سمت راست ترکیب شدند. در روش سوم که توسط Haupt و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده، پس از انتخاب نقطه ترکیب و ایجاد بیت جدید در آن نقطه، تمامی بیت‌های واقع در سمت راست مانند روش ترکیب تک‌نقطه‌ای جابه‌جا شدند (Haupt et al., 2004). شرط همگرایی به صورت وقوع تغییرات جزئی در چند نسل متوالی تعریف شد. پوشش توابع عضویت یکی از نکاتی است که در ساخت سیستم ژنتیک–فازی باید مدنظر قرار گیرد، بدین معنا که در بازه هیچ متغیر نقطه‌ای یافت نشود که درجه عضویت آن در تمامی توابع برابر صفر باشد.

۴- ارائه نتایج الگوریتم ژنتیک-فازی

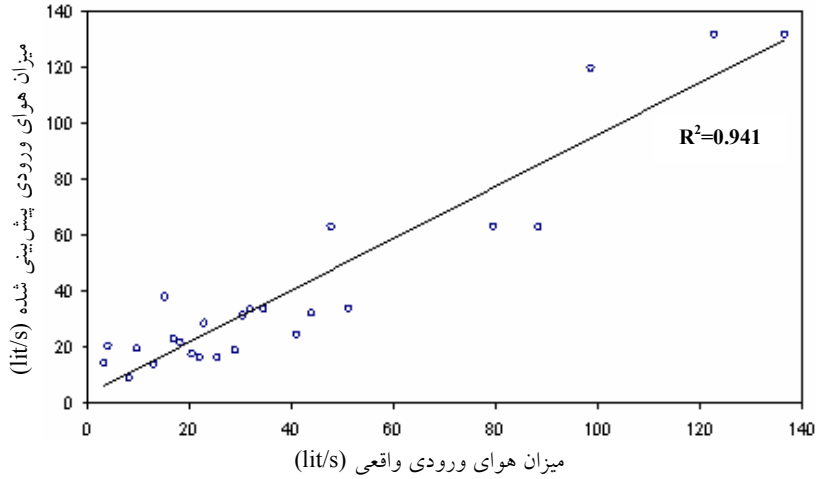
شکل ۱ تغییرات تابع هدف به شکل $MSE = \left(\sum_{i=1}^{N}(y_i^m - y_i^R)^2 / N\right)$ را در طی نسل‌های الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف به شکلی تعریف شده که هدف پیدا کردن نقطه کمینهٔ آن باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود، تابع هدف میانگین مربعات خطا یا MSE است که توسط الگوریتم ژنتیک کمینه می‌شود. در این تحقیق مدل فازی هوادهی جریان را بر اساس پارامترهای به‌دست آمده درالگوریم ژنتیک و ورودی‌های مدل شبیه‌سازی می‌کند. سپس MSE بر مبنای مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده محاسبه شده و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهتر پارامترهای فازی برای نسل بعدی بار دیگر شروع به‌کار می‌کند. آنگاه دوباره مدل فازی، هوادهی را شبیه‌سازی می‌کند و لذا انتظار می‌رود

نتایج بهتری حاصل شود. میانگین مربعات خطا در هر مرحله کاهش می‌یابد تا هنگامی که این مقدار بسیار کوچک و همگرایی در الگوریتم ژنتیک حاصل شود.

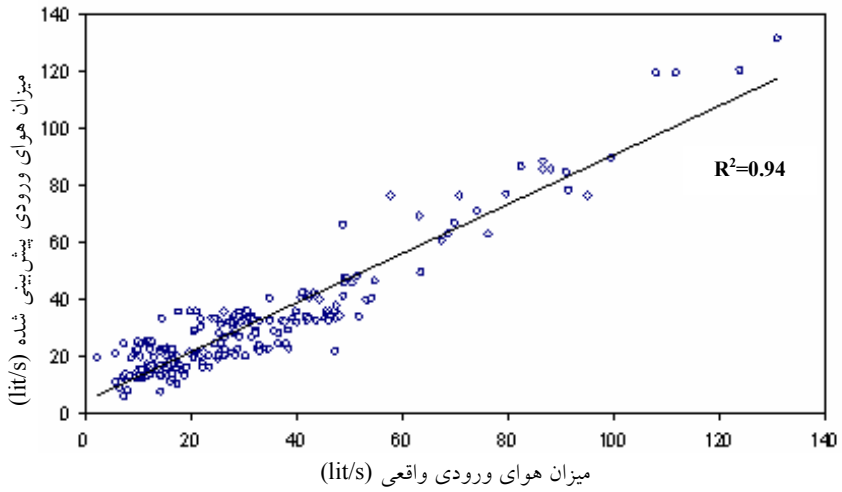
مطابق شکل ۱، در طی نسل‌های اولیه، تغییرات تابع هدف بسیار زیاد بوده و سپس کند می‌شود که از نسل ۲۰۰۰ به بعد تغییرات بسیار جزیی است. در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج به‌دست آمده از سیستم استنتاج ژنتیک–فازی آموزش یافته با نتایج حاصل از آزمایشهای صورت گرفته، مقایسه شده است. با توجه به شکل ۲، مدل پیشنهادی سیستم استنتاج ژنتیک- فازی با برازش $R^2=۰/۹۴$، دقت مناسبی را در پیش‌بینی هوادهی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه داده است. در شکل ۳ مقایسه نتایج پیش‌بینی دبی هوا توسط سیستم استنتاج ژنتیک–فازی با نمونه واقعی برای داده‌های کنترل ارائه شده که برازش مشابه داده‌های آموزش یعنی $R^2=۰/۹۴۱$ داشته، که حائز اهمیت است.



شکل ۱ تغییرات تابع هدف در حین یادگیری سیستم ژنتیک- فازی



شکل ۲ مقایسه نتایج پیش بینی دبی هوا توسط سیستم استنتاج ژنتیک- فازی با واقعیت برای داده‌های آموزش



شکل ۳ مقایسه نتایج پیش‌بینی دبی هوا توسط سیستم استنتاج ژنتیک- فازی با واقعیت برای داده‌های کنترل

پارامترهای مقدم و تالی شبکه پس از آموزش به‌ترتیب در جدولهای ۲ و ۳ نشان داده شده است. هم‌چنان‌که مشاهده می‌شود، متغیرهای ورودی به چهار ناحیه توسط توابع عضویت *(Low, Medium, High, Very High)* و متغیر خروجی به نه ناحیه توسط توابع عضویت *(Extremely Low, Very Very Low...Extremely High)* تقسیم‌بندی شده‌اند. درجه درستی هر قاعده نشان‌دهنده میزان تأثیر آن قاعده است که توسط الگوریتم ژنتیک تعیین شده است.

بر اساس نتایج حاصل، درصد خطای میانگین کل برابر ۲۰/۳۶٪ بوده که در آن حدود ۲۹٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۱۰٪، حدود ۵۱٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۲۰٪ و حدود ۸۵٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۵۰٪ می‌باشد که قدرت، دقت و سرعت و کم هزینه بودن روش ژنتیک- فازی را در مقایسه با سایر روشهای موجود و به‌ویژه نسبت به روابط تجربی در مدل‌سازی هوادهی مجاری تخلیه‌کننده تحتانی سدها اثبات می‌کند. همچنین با افزایش داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های نمونهٔ آزمایشگاهی و اعمال آنها به مدل می‌توان خطای سیستم فازی موجود را به حداقل رساند.

لازم است ذکر شود که آموزش سیستم فازی به روش حاضر، بسیار زمانبر بوده و لذا توصیه می‌شود از روشهای جدید ارائه شده برای افزایش کارایی الگوریتم ژنتیک در سیستم‌های ترکیبی استفاده شود.

هم‌چنان‌که اشاره شد مطالعه‌ای توسط کاویان‌پور و همکاران (۲۰۰۷) بر اساس مدل فازی-عصبی در این زمینه انجام شده است. در تحقیق فوق برای ساخت مدل فازی اولیه در ابتدا یک مدل فازی سوگنو تشکیل شد که در آن هر متغیر توسط مجموعه‌های فازی به چند ناحیه مساوی تقسیم‌بندی شده است. سیستم فازی اولیه با تعیین تعداد توابع عضویت مربوط به هر متغیر ساخته شده و سپس مدل اولیه توسط سیستم عصبی فازی آموزش داده شده است. ضریب همبستگی با در نظر گرفتن بازشدگی دریچه، بلندای آب بالادست دریچه، سطح مقطع مجرا در محل دریچه و دبی آب عبوری به‌عنوان متغیرهای ورودی برابر ۰/۹۸۶، ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۴ به‌ترتیب برای داده‌های آموزش، کنترل و آزمون به‌دست آمده است. نتایج حاصل، قابلیت بالای مدل‌های حاضر را در پیش‌بینی میزان هوادهی در مجاری تحتانی سدها در دو حالت فوق نشان می‌دهد.

جدول ۲ پارامترهای نهایی توابع عضویت ورودی (پارامترهای مقدم)

پارامترهای توابع عضویت	بازشدگی دریچه				هد آب بالادست دریچه			
	مجموعه فازی ۱	مجموعه فازی ۲	مجموعه فازی ۳	مجموعه فازی ٤	مجموعه فازی ۱	مجموعه فازی ۲	مجموعه فازی ۳	مجموعه فازی ٤
Σ		۲٦/۳۱۲	۱۳/۱۷۸			۱/٥۲٥٥	۲/٤۳۰۷	
C		٥۰/۸۰۳	۹۱/۰۱۲			۳/۲۳۹۸	۱۰/۱۹۳٦	
A	۱٦/٦۷۲			٦۹/۹٤۷	٦/٤٦٥۸			٦/۸۳٦٦
B	۲۱/۳٦٤			۸٦/۱۱۲	۷/۸۲۲۸			۸/٦۸٥۲
پارامترهای توابع عضویت	سطح مقطع مجرا در محل دریچه				اندیس هوادهی			
	مجموعه فازی ۱	مجموعه فازی ۲	مجموعه فازی ۳	مجموعه فازی ٤	مجموعه فازی ۱	مجموعه فازی ۲	مجموعه فازی ۳	مجموعه فازی ٤
Σ		۰/۰۰۹۳	۰/۰۱٤			۰/۹۰٦٦	۱/۳۱۰۸	
C		۰/۰٦۷۸	۰/۱۰۳۱			۱/۹۰۸۳	۲/۰۸۱٥	
A	۰/۰۰۷٥			۰/۰۷۲۹	۱/۰۰۹۷			۲/۰۱۱۸
B	۰/۰۳۸٥			۰/۰۸۹٤	۱/۰۰۹۷			۳/۸۲۷۸

جدول ۳ پارامترهای شبکه برای لایه چهار (پارامترهای تالی)

پارامترهای توابع	دبی هوای ورودی به جریان داخل مجرا (لیتر بر ثانیه)								
	set 1	set ۲	set ۳	set ٤	set ٥	set ٦	set ۷	set ۸	set ۹
σ	۱۲/۹٤۹	۸/۲۳۷۹	۱۳/۲٥٥	۲۲/۷۸۱	۱۸/۰۷۸	۱۲/٤۰٦	۱٤/٦۸۲	۱۸/٤۷۷	٤۷/۲۲۹
C	٤/٥۹٥۲	۱۲/۹٦۰٤	۳۳/۱۱۷٤	۸۹/٦۲٦٤	۱۲۹/۸۰۸٤	۱۷۲/۸٤۷٤	۱۸۷/٦٤۸٤	۲۲۹/۸٤٤٤	۲٥۹/۸۹۳٤

با توجه به نتایج، برازش به‌دست آمده از سیستم استنتاج عصبی–فازی برابر R^2=۰/۹۸۶ است که این نتایج، در مقایسه با سیستم استنتاج ژنتیک–فازی ارائه شده (رگرسیون R^2=۰/۹۴) دقت بالاتری دارد. بر اساس نتایج این قسمت همچنین حدود ۳۷٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۵٪ و در حدود ۶۱٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۱۰٪ و در حدود ۸۸٪ پیش‌بینی مدل دارای میانگین خطای کمتر از ۲۰٪ می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت و دقت ترکیب منطق‌فازی و الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی هوای مورد نیاز در پایین‌دست دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی سد ارزیابی شده است. در این راستا کاربرد سیستم فازی ساده، امکان پیش‌بینی هوادهی با برازش ۰/۷۸۹ را فراهم آورده بود (کاویان‌پور و همکاران، ۱۳۸٦) که استفاده از سیستم استنتاج ژنتیک–فازی به میزان قابل توجهی بر ارتقای نتایج تاثیرگذار بوده است. مدل پیشنهادی مبتنی بر سیستم استنتاج ژنتیک–فازی با برازش ۰/۹۴ دقت مناسبی را در پیش‌بینی هوادهی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. مقایسه نتایج پیش‌بینی دبی هوا توسط سیستم استنتاج ژنتیک– فازی با واقعیت برای داده‌های کنترل ارائه شد که

برازش مشابه داده‌های آموزش یعنی ۰/۹۴۱ را در پی داشته که حائز اهمیت است.

نتایج حاصل، قابلیت خوب مدل ژنتیک- فازی و به‌ویژه دقت بسیار بالاتر مدل ترکیبی فازی- عصبی را در مقایسه با سایر روابط معمول در پیش‌بینی میزان هوای مورد نیاز در پایین‌دست دریچه‌های تحتانی سدها تأیید می‌کند. دقت نسبتا بالای این روشها، مبنای ارجحیت منطقی برای استفاده در طراحی هواده‌ها در تخلیه‌کننده تحتانی نسبت به روابط معمول می‌باشد.

۶- تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله تشکر و قدردانی خود را از مؤسسه تحقیقات آب ایران و کارشناسان و همکاران محترم آن که در انجام آزمایشها و تهیه اطلاعات آزمایشگاهی در سالیان متمادی از طریق مساعدت در انجام پایان‌نامه دانشجویان کارشناسی ارشد مرتبط با موضوع، همکاری ارزشمندی نموده‌اند، اعلام می‌دارند.

۸- فهرست علائم

ضریب هوادهی	β
عدد فرود مقطع تنگ شدگی	F_{rc}
دبی هوا	Q_{av}
کروموزوم مادر	P_{ma}
کروموزوم پدر	P_{da}
ژن حامل کروموزوم مادر	P_{mi}
ژن حامل کروموزوم پدر	P_{di}
کروموزوم جدید	P_{new}
عدد تصادفی بین صفر و یک	r
میانگین مربعات خطا	MSE
رگرسیون	R

۹- منابع

Speerli J. and Volkart P.U. (1997). "Air entrainment in bottom outlet tailrace tunnels", Proceedings of 27th IAHR Congress, San Francisco, pp. 613-618.

Kalinske A.A. and Robertson J.M. (1943). "Closed conduit flow", Transactions of Symposium on Entrainment of Air in Flowing Water, ASCE, USA, pp. 1435-1447.

Novak P. (1984). "Developments in hydraulic engineering-2", Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA.

United States Army Corps of Engineers (1964). "Hydraulic design criteria: air demand-regulated outlet works", USACE, USA.

Sharma H.R. (1976). "Air-Entrainment in high head gated conduits", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 102 (HY 11), pp. 1629-1646.

کاویانپور م.ر. (۱۳۸۰). "ارزیابی روابط تجربی ضریب هوادهی دریچه‌ها"، کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، کرمان، ایران.

Kavianpour, M. R. Rajabi, E. and Forsatkar, E. (2005). "Air demand downstream of bottom outlet leaf gates", 73rd Annual Meeting of ICOLD, Tehran, Iran.

کاویانپور م.ر.، نجفی م.ر (۱۳۸۶). بهینه سازی هوادهی در مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها با استفاده از سیستم فازی و ساخت مدل فازی بر اساس روش Wang-Mendel، ششمین کنفرانس هیدرولیک، شهرکرد.

Kavianpour M.R., Najafi M.R. and Kavianpour Z, (2007). "A fuzzy clustering method to predict air demand downstream of bottom outlet leaf gates", 32nd IAHR Congress.

LotfiZadeh (1965). "Fuzzy sets" Information and Control, 8:338-353.

Jang, J.S.R. and C.T. Sun (1997). "Neuro- fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence", Prentice Hall.

Cordon, O. Herrera, F. Gomide, F. Hoffmann, F. and Magdalena, L. (2004). "Ten years of genetic fuzzy systems: current framework and new trends", Fuzzy Sets and Systems 141.

Haupt, R.L. and Haupt,. S.E. (2004). "Practical genetic algorithms", Second edition, Wiley, USA.