مدل پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از سیستم فازی FIS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO

محمود محمد رضاپور طبری[1] جابر سلطانی[2]

(دریافت ۸۹/۲/۸ آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۱۲/۲۰ پذیرش ۹۰/۱۲/۲٤)

چکیده

هدف از این مطالعه پیش‌بینی رواناب به‌صورت مکانی با استفاده از اطلاعات ایستگاههای هیدرومتری و هواشناسی بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که معمولاً ارتباطات مشخصی بین داده‌های هواشناسی و هیدرومتری بالادست حوضه با میزان رواناب تولیدی در خروجی حوضه وجود دارد و چنانچه بتوان قوانین نهفته در سابقه تاریخی داده‌های ثبت شده در این ایستگاهها را استخراج نمود، می‌توان به آسانی بر پایه اطلاعات اندازه‌گیری شده به پیش‌بینی میزان رواناب پرداخت. بر این اساس از بین ابزارهای موجود، تئوری فازی می‌تواند با انعطاف‌پذیری خود در تدوین قوانین فازی، دانش نهفته در داده‌های مشاهده‌ای را به‌نحوه مطلوبی به‌منظور پیش‌بینی پارامترها در زمان واقعی ارائه نماید. لذا در این تحقیق سیستم استنتاج فازی به‌منظور برآورد میزان رواناب در ایستگاهی واقع در پایین‌دست رودخانه طالقان‌رود با استفاده از آمار ایستگاههای باران‌سنجی و هیدرومتری بالادست رودخانه به‌کار گرفته شد. اجرای سیستم فازی معمولی نشان‌دهنده عدم کارایی مناسب این ابزار در ارائه مقادیر صحیح پیش‌بینی است که علت آن را می‌توان در نامناسب بودن مقادیر بازه‌ای مرتبط با توابع عضویت هر یک از پارامترهای مؤثر در فرایند مدل‌سازی جستجو نمود. با توجه به زمان‌بر بودن ساخت تابع عضویت متناسب با هر یک از پارامترها به‌دلیل تعدد حالات مختلف توابع عضویت، اقدام به استفاده ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی به‌منظور تسریع و بهبود وضعیت مدل‌سازی گردید. با اجرای مدل ترکیبی، مقادیر بهینه مرتبط با هر یک از توابع عضویت متغیرهای وابسته و مستقل، استخراج شده و بر پایه آن و با استفاده از سیستم فازی اقدام به پیش‌بینی رواناب در ایستگاه پایین‌دست رودخانه گردید. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روشهای کاربرد منفرد استنتاج فازی است به‌طوری که با استفاده از این مدل پیشنهادی می‌توان میزان دقیق‌تری از رواناب را برای شرایط آینده برآورد نمود.

واژه‌های کلیدی: سیستم استنتاج فازی، بهینه‌سازی، الگوریتم مبتنی بر هوش جمعی، رواناب، رودخانه طالقان

The Stream Flow Prediction Model Using Fuzzy Inference System and Particle Swarm Optimization

Mahmoud Mohammad RezapourTabari [1] *Jaber Soltani [2]*

(Received Apr. 28, 2010 Revised March 10, 2012 Accepted March. 14, 2012

Abstract

The aim of this study is the spatial prediction runoff using hydrometric and meteorological stations data. The research shows that usually there is a certain communication between the meteorological and hydrometric data of upstream basin and runoff rates in output basin. So, if can be extracted the rules related to historical data that recorded at stations, can be easily predicted runoff amount based on data measured. Accordingly, among the tools available, the fuzzy theory (with flexibility in developing fuzzy rules) can be provide the knowledge lies in the observed data to parameters prediction in real time. So, in this research the fuzzy inference system has been used for estimating runoff rates at stations located in the Taleghan river downstream using rain gage stations and hydrometric stations upstream. Because the inappropriate values associated with membership functions, the

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، (نویسنده مسئول) ۵۵۳۹۱۴۹ (۰۲۱) mrtabari@eng.sku.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی و آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

1. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Shahrekord University, Shahrekord (Corrspnding Author) (+98 021) 55391429 mrtabari@eng.sku.ac.ir
2. Assist. Prof. of Irrigation and Drainage, Pardis Abu Rayhan, Tehran University, Tehran

fuzzy system model can not provide correct value for the prediction. In this study, a combination of intelligence-based optimization algorithm and fuzzy theory developed to accelerate and improve modeling. The result of proposed model, optimum values to each membership function that related to dependent and independent variable extracted and based on it's the runoff rates in rivers downstream predicted. The results of this study were shown that the high accuracy of proposed model compared with fuzzy inference system. Also based on proposed model can be more accurately the rate of runoff estimated for future conditions.

Keywords: Fuzzy Inference System, Optimization, Particle Swarm Optimization, Runoff, Taleghan River.

۱- مقدمه

به‌طور کلی انتخاب یک روش مناسب به‌منظور مدل‌سازی یک سیستم، کاملاً بستگی به میزان پیچیدگی آن داشته و پیچیدگی نیز ارتباط معکوس با میزان شناخت از سیستم دارد. منطق فازی در برابر منطق کلاسیک به‌عنوان ابزاری توانمند برای حل مسائل ارائه شده است. منطق فازی یک راه‌حل مناسب برای ارتباط دادن فضای ورودی‌ها به فضای خروجی‌ها است. لذا سیستم‌های فازی را می‌توان به‌خوبی برای مدل‌سازی دو نوع اصلی عدم قطعیت در پدیده‌های موجود در طبیعت به‌کار برد: نوع اول، عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری در شناخت پیچیدگی‌های یک پدیده است، نوع دوم عدم قطعیت مربوط به عدم صراحت و عدم شفافیت مرتبط با یک پدیده یا ویژگی خاص است. از طرفی علی‌رغم اینکه منطق فازی بر پایه ریاضیات پیشرفته و پیچیده قرار دارد اما روشی است که از لحاظ فهم، پیاده‌سازی و هزینه بسیار ساده و مناسب است[۱-۳].

تحقیقات صورت گرفته در زمینه استفاده از تئوری فازی نشان از پتانسیل بالای مدل‌های مبتنی بر قوانین فازی[1] به‌منظور تصمیم‌گیری در سیستم‌های منابع آب دارد. اولین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه کارهای زاده است که در سال ۱۹۶۵ ارائه گردیده است. این محقق مقادیر میانه‌ای را در بین مقادیر کاملاً درست و کاملاً غلط در نظر گرفته است. با استفاده از این روش می‌توان مسائل کمّی را به‌نحوه مطلوبی مدل‌سازی نموده و به تصمیم‌گیران برای حل مسائلی که دارای عدم صراحت و عدم قطعیت هستند، کمک نمود[۴].

بردوسی و همکاران[2] در سال ۱۹۹۵ حرکت آب در محیط‌های غیراشباع را با استفاده از روش قوانین فازی مدل‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق از خروجی مدل عددی ریچارد به‌عنوان داده‌های آموزشی به‌منظور ساخت قوانین فازی استفاده شده است[۵]. بردوسی و دوکستین[3] در سال ۱۹۹۵با استفاده از سیستم فازی تطبیقی، سری زمانی نیاز آبی روزانه را در یکی از حوضه‌های آلمان مدل نموده‌اند. آنها با استفاده از قوانین فازی نیاز آبی آینده را پیش‌بینی نموده‌اند. در این تحقیق از سه متغیر ورودی یعنی روزهای هفته، حداکثر درجه حرارات روزانه و شرایط عمومی آب و هوا در روزهای قبل، به‌منظور پیش‌بینی نیاز آبی آینده استفاده گردیده است[۶]. فونتان و همکاران[4] در سال ۱۹۹۷ از قوانین فازی به‌منظور حل مسائل چندهدفه با تابع هدف غیر صریح استفاده نموده‌اند. در این تحقیق اهداف بهره‌برداری به‌صورت شفاهی و محدودیتهای مرتبط با تابع هدف به‌صورت توابع عضویت فازی در نظر گرفته شده است[۷]. آببه و همکاران[5] در سال ۲۰۰۰ از منطق فازی برای تخمین مقادیر بارش در ایستگاههایی که آمار بارش آنها مفقود شده است، استفاده نموده‌اند. در این تحقیق قوانین فازی با استفاده از داده‌های مشاهده شده قبلی به‌دست آمده‌اند. به‌منظور ارزیابی روش ارائه شده در این تحقیق، نتایج حاصل از منطق فازی با روشهایی همچون شبکه‌های عصبی و رگرسیون مصنوعی مقایسه گردیده است. نتایج این روش در مقایسه با سایر روشها دارای مجذور متوسط خطاهای کمتری بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده است[۸].

زینگ و همکاران[6] در سال ۲۰۰۱ اقدام به توسعه مدل مرتبه اول سیستم فازی سوگنو- تاکاجی به‌منظور تهیه مدل پیش‌بینی بارش- رواناب نموده‌اند. بررسی‌های صورت گرفته نشان از سادگی و عملکرد بالای این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها همچون شبکه عصبی دارد[۹].

کوپیولا و همکاران[7] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از منطق فازی، میزان تغذیه آبخوان را با در نظر گرفتن پارامترهای بارش، رواناب و درجه حرارت پیش‌بینی نموده‌اند. در این مطالعه نتایج مدل فازی با مدل رگرسیون معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل فازی به‌دلیل در نظر گرفتن رفتار سیستم در مدل‌سازی در پیش‌بینی تغذیه آبخوان است[۱۰]. پیش‌بینی مقادیر نادر پارامترهای هیدرولوژیکی که در ایستگاههای هیدرومتری ثبت می‌شود، با استفاده از خوشه‌بندی فازی توسط لوچیتا[8] و ماناتی[9] در

[1] Fuzzy Rule Based Models (FRBM)
[2] Bárdossy et al
[3] Duckstein
[4] Fontane et al.
[5] ABEBE et al.
[6] Xiong et al.
[7] Coppola et al.
[8] Luchetta
[9] Manetti

سال ۲۰۰۳ صورت پذیرفته است. نتایج این تحقیق مشابه کارهای قبل نشان از کارایی مناسب ابزار فازی به‌منظور پیش‌بینی نسبت به مدل شبکه عصبی دارد[۱۱].

سینگ[1] در سال ۲۰۰۷ مدلی به‌منظور پیش‌بینی سری زمانی به‌صورت فازی ارائه نموده است. در این مدل پارامترهای مختلفی برای بالا بردن دقت پیش‌بینی سری زمانی در نظر گرفته شده است. نتایج مدل ارائه شده در مقایسه با سایر مدل‌های پیش‌بینی سری زمانی نشان دهنده کارایی بالای این روش در پیش‌بینی فازی سری زمانی است[۱۲].

وو[2] و چاو[3] در سال ۲۰۰۶ دو الگوریتم که عبارت از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی و سیستم فازی مبتنی بر شبکه عصبی هستند را به‌منظور پیش‌بینی رواناب رودخانه یانگ‌تسه مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های تلفیقی می‌تواند باعث افزایش دقت در پیش‌بینی گردد[۱۳-۱۴].

تارقیان و کاشفی‌پور در سال ۲۰۰۷ کاربرد سیستم‌های فازی و شبکه عصبی را در پیش‌بینی سیلاب ورودی به مخزن سد مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این محققان نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم‌های فازی می‌توان سیلابهایی با دوره بیش از ۳ روز را پیش‌بینی نمود. در حالی که برای دوره‌های کوتاه‌تر لازم است از شبکه‌های عصبی استفاده شود[۱۵].

کوک و همکاران[4] در سال ۲۰۱۰ به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی رواناب از شبکه‌های عصبی مصنوعی[5] استفاده نموده‌اند. در این تحقیق برای بالابردن دقت آموزش و نتایج پیش‌بینی رواناب اقدام به استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی[6] برای بهینه نمودن بردارهای وزن شبکه عصبی گردیده است. نتایج نشان‌دهنده مطلوبیت بالای ساختار پیشنهاد شده در آموزش شبکه‌های عصبی برگشت به عقب به‌منظور پیش‌بینی رابطه بین بارش- رواناب است[۱۶]. مشابه این کار در سال ۲۰۰۶ توسط چاوو نیز انجام شده است[۱۷].

مطالعات صورت گرفته قبلی نشان از کارایی مناسب تئوری فازی در زمینه‌های مختلف منابع آب به‌خصوص پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی دارد. نکته قابل توجه در تمامی مطالعات، عدم استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی به‌منظور بهبود وضعیت کارکرد سیستم‌های فازی و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نرم برای بالا بردن کارایی سیستم‌های فازی است که در این تحقیق سعی شد این مسئله به نحوه مطلوبی مورد بررسی قرار گیرد. به‌عبارت دیگر در این تحقیق با هدف پیش‌بینی درست میزان رواناب در پایین‌دست حوضه با توجه به داده‌های بالادست، مدلی پیشنهاد شد که در آن با استفاده از الگوریتم فراکاوشی، سیستم شبیه‌سازی فازی بهبود یافته و بهترین قوانینی که می‌تواند نمایشگر ارتباط درست ورودی و خروجی سیستم هیدرولوژیکی باشد، استخراج شود.

۲- تئوری و ساختار مدل

در این تحقیق یک روش جدید برای پیش‌بینی هر چه دقیق‌تر رواناب با تلفیق مزایای تئوری فازی و الگوریتم PSO ارائه شد. مزایای استفاده از تئوری فازی در مقایسه با سایر مدل‌های پیش‌بینی‌کننده را می‌توان در پایین بودن زمان اجرا، آسان بودن استفاده از آن و قابلیت ارائه پیش‌بینی‌های مناسب دانست. در سیستم‌های فازی مهم‌ترین مسئله، تدوین قوانین فازی است. این قوانین در سیستم‌های ساده می‌توانند با استفاده از نظرات کارشناسان خبره تعیین شوند. در صورتی که در سیستم‌های پیچیده، تمامی قوانین را نمی‌توان به‌صورت مشخص فرموله کرد. این امر به‌دلیل عدم قطعیتهای موجود در پارامترهای ورودی است. لذا در این سیستم‌ها نیاز به ابزارهای هوشمند است تا با استفاده از آن بتوان قوانین فازی نهفته در پارامترها را مشخص نمود. به‌منظور بهبود وضعیت مدل‌سازی ارائه شده و تعیین مقادیر بهینه مؤلفه‌های مرتبط با تابع عضویت متغیرهای مسئله، مدل بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی مدنظر قرار گرفت.

ساختار مدل فازی - بهینه‌سازی استفاده شده در این مطالعه را می‌توان به‌صورت شکل ۱ نشان داد. همان‌طور که در این شکل مشخص است ابتدا متغیرهای تصمیم مسئله که مقادیر شکل‌دهنده توابع عضویت پارامترهای مستقل و وابسته هستند به‌صورت تصادفی و با توجه به تعداد جمعیت در نظر گرفته شده برای مجموعه پرندگان، تولید می‌شوند. همچنین در این مرحله پارامترهای مورد نیاز مدل بهینه‌سازی که شامل ضرایب ثابت و حداکثر سرعت حرکت ذرات است به مدل معرفی می‌گردد. بر اساس توابع عضویت و قوانین مورد نظر که از داده‌های جمع‌آوری شده به‌دست می‌آید، سیستم استنتاج فازی[7]، ساخته شده و با توجه به آن، مقدار پارامتر خروجی (رواناب) برای هر ذره از مجموعه جمعیت اولیه تولید شده مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در صورت مشخص شدن مقدار پارامتر شبیه‌سازی شده خروجی برای تمامی جمعیت اولیه تولید شده، بهترین مقادیر متغیرهای تصمیم که منجر به کمترین میزان خطای شبیه‌سازی گردیده‌اند ذخیره شده و پارامترهای الگوریتم PSO در این بخش که به‌عنوان تکرار اول مطرح هستند، مجدد

[1] Singh
[2] Wu
[3] Chau
[4] Kuok et al.
[5] Artificial Neural Networks (ANNs)
[6] Particle Swarm Optimization (PSO)
[7] Fuzzy Inference System (FIS)

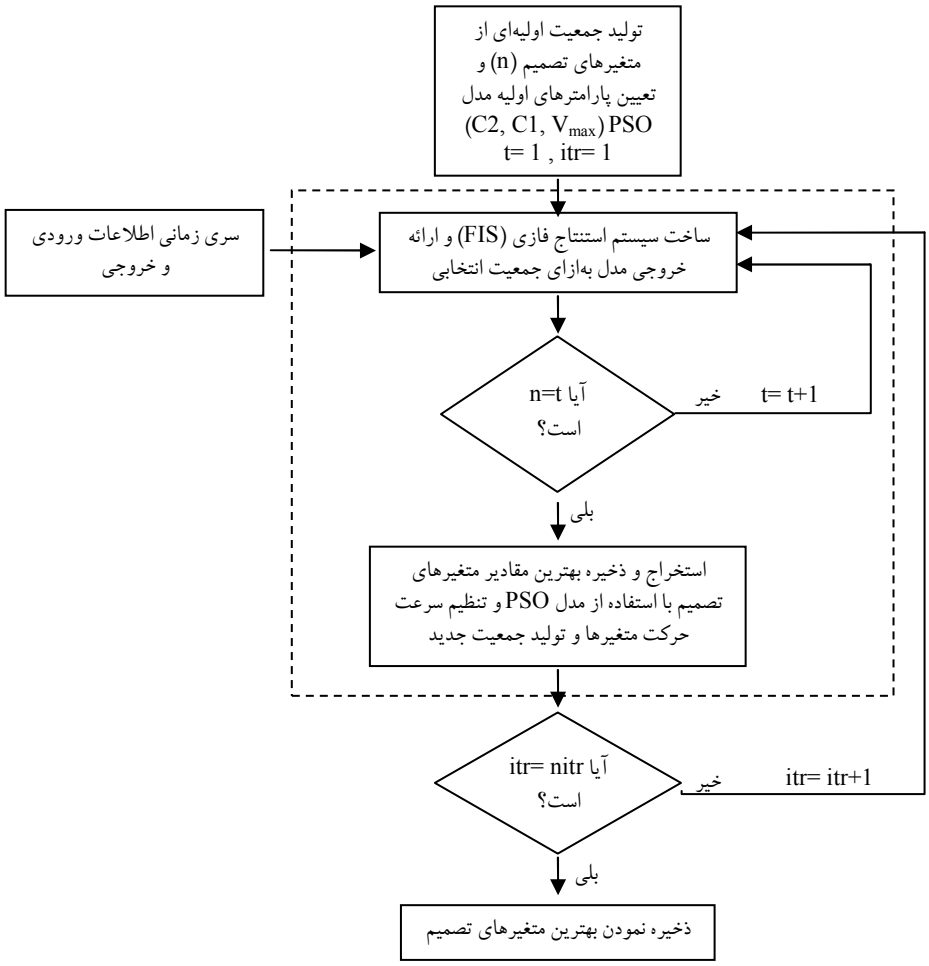
تنظیم می‌شود. سپس بر اساس پارامترهای تنظیم شده این الگوریتم، جمعیت جدید تولید شده و مشابه قبل با استفاده از سیستم استنتاج فازی، مقادیر پارامتر خروجی برای جمعیت جدید، مجدداً شبیه‌سازی می‌گردد. این روند تا دستیابی به مقادیر نزدیک به بهینه محلی ادامه می‌یابد. شرط توقف الگوریتم، عدم تغییر در بهترین جواب مشخص شده طی تکرارهای متوالی است. نمونه‌ای از کارایی این الگوریتم را می‌توان در ارائه دستورالعمل بهره‌برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ که توسط رجب‌پور و افشار ارائه شده است، یافت[۱۸].

۳- روش تحقیق و منطقه مورد مطالعه

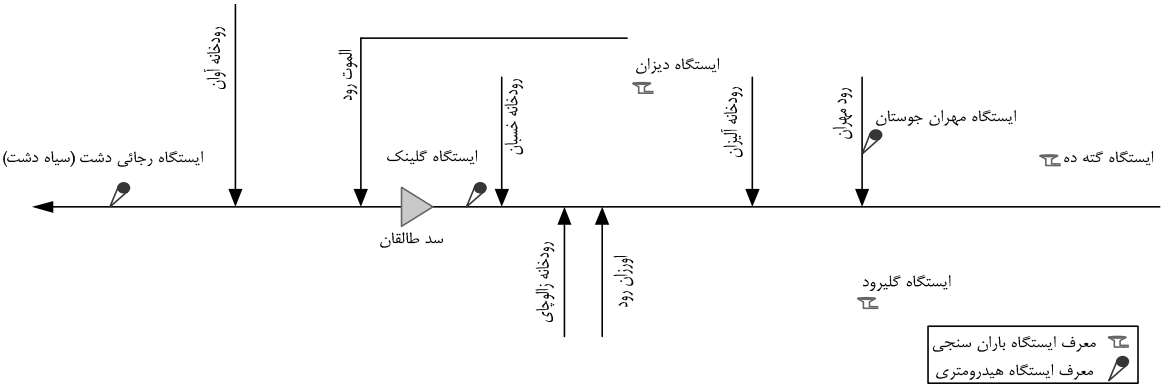
۳-۱- سیستم استنتاج فازی استفاده شده

در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی به‌منظور برآورد میزان رواناب رودخانه در ایستگاه هیدرومتری سیاه‌دشت، واقع در پایین‌دست رودخانه طالقان‌رود با استفاده از آمار اندازه‌گیری شده روزانه (۶ سال از ۷۶ تا ۸۱) ایستگاههای باران‌سنجی گتـه‌ده، گلیرود و دیزان و هیدرومتری گلینگ و مهران جوستان که در بالادست رودخانه واقع شده‌اند، استفاده شد (شکل ۲). نکته قابل توجه این است که اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق مرتبط با سالهای قبل از بهره‌برداری از سد طالقان بوده و نمایش شماتیک موقعیت سد صرفاً به‌منظور شناخت بهتر منطقه است و لذا رواناب تولیدی در پایین‌دست کاملاً به‌صورت طبیعی بوده و متأثر از تنظیمات سد نیست.

در این مطالعه مشخصات سیستم فازی مورد استفاده عبارت بود از: نوع استلزام: ممدانی، تعداد ورودی مدل: ۵ عدد شامل اطلاعات ۳ ایستگاه باران‌سنجی و ۲ ایستگاه هیدرومتری، تعداد خروجی مدل: ۱ عدد شامل اطلاعات ایستگاه هیدرومتری سیاه‌دشت، تعداد توابع عضویت: ۵ عدد برای هر متغیر ورودی و خروجی، نوع توابع عضویت: ذوزنقه‌ای و تعداد قوانین: ۵ عدد. به‌منظور مشخص شدن میزان وابستگی ۵ داده ورودی به میزان



شکل ۱- ساختار مدل فازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی مورد استفاده در مدل فازی

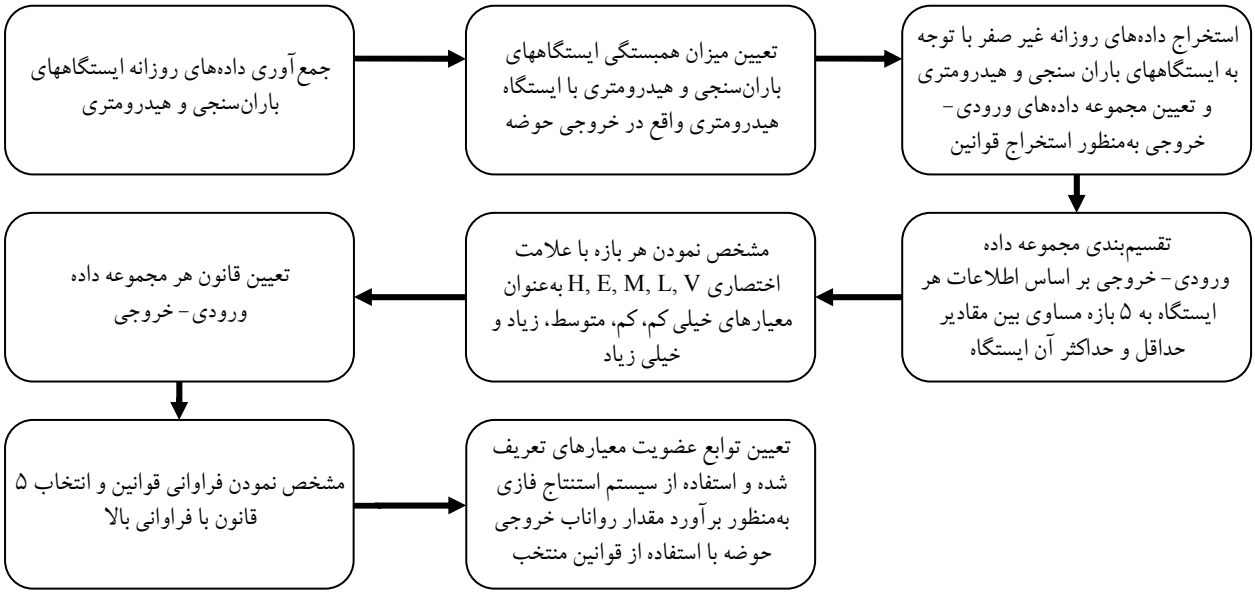
رواناب خروجی (ایستگاه سیاه‌دشت) از ضریب همبستگی[1] بین هر یک از متغیرهای ورودی با متغیر خروجی استفاده شد. همچنین به‌منظور استخراج قوانین حاکم بر داده‌های بالا، تأخیرهای در نظر گرفته شده برای ایستگاههای هیدرومتری و باران‌سنجی به‌ترتیب برابر با صفر و سه روز بود (جدول ۱).

با توجه به داده‌های جمع‌آوری و در نظر گرفتن تأخیرهای بالا، تعداد داده‌هایی که به‌منظور استخراج قوانین مدنظر قرار گرفتند برابر با ۷۶ جفت اطلاعات ورودی - خروجی بود. با توجه به متوسط هر سری و تعیین محدوده‌های مورد نظر برای توابع عضویت، قانونی برای هر سری از داده‌ها (۷۶ سری) مشخص می‌شود. سپس قوانینی که بیشترین فراوانی را در بین سری دارا هستند، انتخاب می‌شوند. در این تحقیق به‌دلیل اینکه تعداد متغیرهای ورودی برابر با ۵ بود و همچنین به‌منظور حفظ بهتر مشخصات سری داده شده و اعمال آن در سیستم استنتاج فازی تهیه شده، ۵ قانون از بین قوانینی که دارای تکرار بیشتری بودند، انتخاب گردید. روند استخراج قوانین برتر در این تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- میزان همبستگی متغیرهای ورودی با خروجی

نام ایستگاه / درجه تأخیر	دیزان	گته‌ده	گلیرود	گلینک	مهران جوستان
۰	۰/۰۸۹	۰/۰۸۰۵	۰/۰۵۳	۰/۸۷	۰/۷۳
۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	۰/۸۴	۰/۷۲
۲	۰/۱۵۸	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۸۱	۰/۷
۳	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۷۸	۰/۶۷

[1] Correlation Coefficient



شکل ۳- روند پیش‌بینی رواناب خروجی حوضه با استفاده از سیستم استنتاج فازی

قوانین استخراج شده با استفاده از داده‌های اولیه به‌صورت زیر است

ELLVLV (And)
LMELLV (And)
VVELLM (And)
MVMLVL (And)
EMLHHH (And)

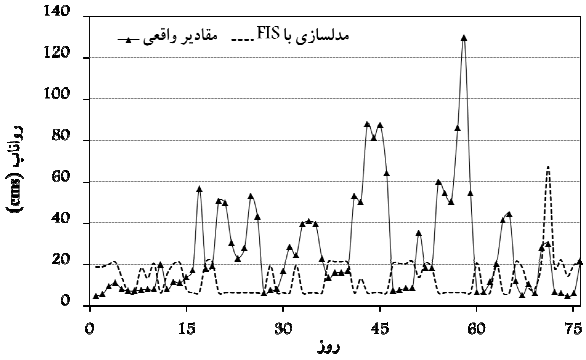
در این بخش با توجه به قوانین استخراج شده و توابع عضویت تعریف شده می‌توان با استفاده از سیستم استنتاج فازی، مقدار رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت را با استفاده از اطلاعات ایستگاههای باران‌سنجی و هیدرومتری بالادست به‌دست آورد و سپس مطابق شکل ۴ این مقادیر محاسبه شده توسط مدل فازی را با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده، مقایسه نمود. به‌منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل فازی با سایر روشهای متداول موجود، اقدام به بررسی نتایج با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی [1]، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم شبکه عصبی- فازی [2] گردید. به‌منظور آشنایی با مدل‌های استفاده شده می‌توان به راهنمای نرم‌افزار مطلب نسخه R2010a مراجعه نمود. از مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مختلف می‌توان دریافت که تنها مدل رگرسیون غیرخطی با رابطه زیر نسبت به سایر روشها از دقت نسبتاً بالاتری برخودار است

$$y = 0.49\ x_1^{0.78} + 3.81\ x_2^{0.22} - 53.9\ x_3^{0.0015} + 35.88\ x_4^{0.29} + 0.00046\ x_5^{4.9} \qquad (۱)$$

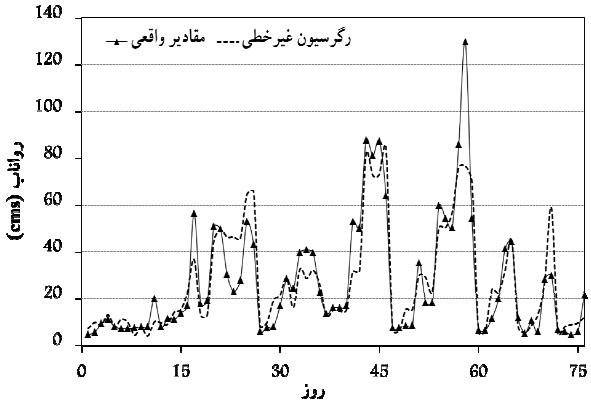
که در این رابطه

y معرف میزان رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت و X_1 تا X_5 بیانگر اطلاعات ایستگاههای هیدرومتری و باران‌سنجی دیزان، گلینک، گته‌ده، گلیرورد و مهران جوستان هستند.

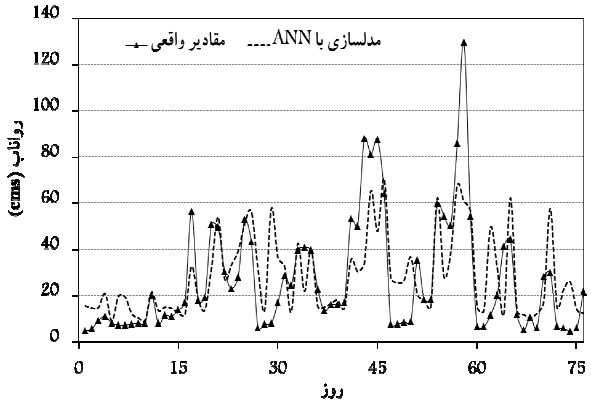
همان‌طور که در شکل ۵ تا ۷ نشان داده شده است مدل‌های تهیه شده نمی‌توانند به‌خوبی بیانگر رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت باشند و این عدم دقت را می‌توان در نامناسب بودن قوانین تدوین شده و توابع عضویت در نظر گرفته شده برای متغیرهای ورودی و خروجی برای مدل‌های فازی و ناکافی بودن اطلاعات موجود به‌منظور آموزش، عدم تنظیم صحیح بردارهای وزن و بایس در مدل شبکه عصبی دانست. لذا در این تحقیق روشی به‌منظور بهبود عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی موجود ارائه شد که به‌عنوان نمونه در این بخش ساختار روش پیشنهادی که بر روی مدل فازی اعمال شده است تشریح گردید. در واقع بر اساس ساختار پیشنهادی می‌توان کارایی مدل فازی را با تدوین قوانینی که بیانگر رفتار سیستم مورد نظر باشد، افزایش داد. این روند برای سایر مدل‌های شبیه‌سازی نیز قابل اعمال است.



شکل ۴- مقایسه مقادیر مدل‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی با مقادیر واقعی

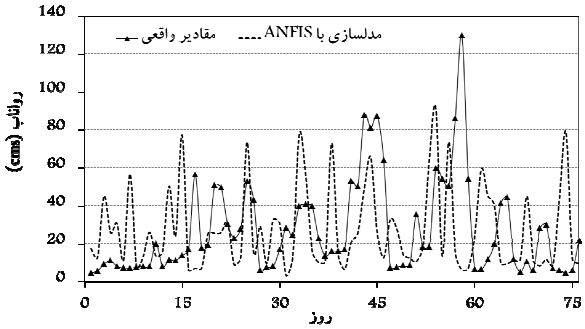


شکل۵- مقایسه مقادیر مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون غیرخطی با مقادیر واقعی



شکل ۶- مقایسه مقادیر مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با مقادیر واقعی

[1] Non-Liner Regression (NLR)
[2] Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)



شکل ۷- مقایسه مقادیر مدل‌سازی با استفاده از سیستم شبکه عصبی- فازی با مقادیر واقعی

نکته‌ای که در این بخش باید به آن توجه شود این است که روش ارائه شده در این تحقیق به‌عنوان یک متدولوژی کارا قابلیت استفاده در سایر مدل‌های شبیه‌سازی را دارد و با توجه به اینکه هر یک از این مدل‌های شبیه‌سازی دارای زیرساخت پارامتری متفاوتی از هم هستند، لذا امکان تغییر نمودن مقادیر پارامترها و جوابهای بهینه وجود دارد. بنابراین لازم است در استفاده از این روش ابتدا مدل شبیه‌سازی مناسب با مطالعه مورد نظر انتخاب و سپس به‌منظور بهبود عملکرد آن از الگوریتم پیشنهادی استفاده شود.

۳-۲- ساختار مدل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم PSO

همان‌طور که گفته شد و از ملاحظه شکل ۵ قابل استنباط است، مدل استنتاج فازی نتوانسته رفتار واقعی سیستم را نشان دهد. برای افزایش کارایی مدل فازی و تدوین قوانینی که بیانگر رفتار سیستم مورد نظر باشد، از الگوریتم PSO استفاده شد. در این تحقیق با توجه به اینکه بازه تغییرات توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و همچنین قوانین حاکم بر این سری‌های زمانی به‌طور دقیق مشخص نبودند، لذا لازم بود مقدار بهینه آنها به‌گونه‌ای تعیین شود تا مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل فازی تطابق مناسبی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده داشته باشند. بنابراین متغیرهای تصمیم این مسئله عبارت بودند از: مقدار کران‌های بالا، میان و پایین توابع عضویت مرتبط با هر متغیر، نوع قوانین حاکم بر سری زمانی و نحوه ترکیب توابع عضویت در قانون. لذا تعداد کل متغیرهای تصمیم (مجهولات) در نظر گرفته شده در این مدل برابر بود با: ۲۴ عدد برای توابع عضویت که با توجه به ۵ متغیر ورودی و ۱ متغیر خروجی، در مجموع ۶ متغیر بود که هر یک شامل یک تابع عضویت با ۴ پارامتر بود، ۳۰ عدد برای مشخص نمودن نحوه ترکیب ۵ تابع عضویت به‌کار گرفته شده برای متغیرها (۶ متغیر) در هر قانون و ۵ عدد برای نشان دادن نوع ارتباط AND و یا OR در هر قانون. به‌عبارت دیگر هر ذره مرتبط با الگوریتم PSO که حاوی متغیرهای تصمیم است از بخشهای زیر تشکیل شده است:

پارامترهای مرتبط با هر تابع عضویت به‌صورت اعداد بین صفر تا یک، پارامتر نشان‌دهنده نحوه ترکیب توابع عضویت هر قانون به‌صورت اعداد ۱ تا ۵ یعنی با توجه به تعریف هر قانون، هر متغیر می‌تواند یکی از ۵ تابع عضویت را اختیار نماید و پارامتر نشانگر نحوه ارتباط توابع عضویت مرتبط با هر قانون به‌صورت اعداد ۱ و ۲ که ۱ نشان‌دهنده ارتباط And و ۲ نمایشگر ارتباط Or است.

بنابراین مقادیری که برای متغیرهای تصمیم (در قالب ذره) در الگوریتم بهینه‌سازی تولید می‌شوند باید حاوی ۲۴ عدد اعشاری بین صفر تا یک، ۳۰ عدد صحیح با مقادیر ۱ یا۲ یا ۳ یا ۴ یا ۵ و ۵ عدد صحیح با مقادیر ۱ یا ۲ باشند.

تابع هدف در این مدل بهینه‌سازی، حداقل نمودن مجذور متوسط مربعات خطای[1] داده‌های مشاهده‌ای با مقادیر شبیه‌سازی شده است. لازم به‌ذکر است معیار خطای انتخاب شده می‌تواند متفاوت باشد که تأثیر زیادی در جوابهای بهینه نخواهد داشت.

تابع هدف:

$$Z = \text{Minimize}\left(\sqrt{(y_s - y_r)^2/n}\right) \qquad (۲)$$

محدودیتها:

$$y_r = I_6 \qquad (۳)$$

$$y_s = \frac{\int \mu_{B^r}(z)\ dz}{\int \mu_{B^r}(z)\ dz} \qquad (۴)$$

$$\mu_{B^r} = \max_r \left[R^r \begin{bmatrix} \mu_{A^r_{1S_{r1}}}(I_1), \mu_{A^r_{2S_{r2}}}(I_2), \mu_{A^r_{3S_{r3}}}(I_3), \\ \mu_{A^r_{4S_{r4}}}(I_4), \mu_{A^r_{5S_{r5}}}(I_5) \end{bmatrix} \right] \qquad (۵)$$

$$\mu_{A^r_{is}}(I_i) = \left(a_{A^r_{is}}, b_{A^r_{is}}, c_{A^r_{is}}, d_{A^r_{is}}\right), \quad i = 1,2,3,4,5,6 \ ,\ r = 1,2,3,4,5 \ ,\ s = 1,2,3,4,5 \qquad (۶)$$

$$a_{A^r_{is}} = \begin{cases} \min(I_i) \ , & \text{if } s = 1 \\ d_{A^r_{i(s-1)}} \ , & \text{otherwise} \end{cases} \ , \ s = 1,2,3,4,5 \qquad (۷)$$

$$d_{A^r_{is}} = \left\{ \begin{cases} \max\ (I_i), & \text{if } s = 5 \\ x^{MF}_{is} \times (\max\ (I_i) - \min\ (I_i)) + a_{A^r_{is}}, & \\ \text{otherwise} & \end{cases} \right\} \qquad (۸)$$

$$b_{A^r_{is}} = \left(d_{A^r_{is}} - a_{A^r_{is}}\right)/3 + a_{A^r_{is}} \qquad (۹)$$

[1] Root Mean Square Error (RMSE)

$$c_{A_{is}^r} = 2 \times \left(d_{A_{is}^r} - a_{A_{is}^r}\right)/3 + a_{A_{is}^r} \quad (۱۰)$$

$$x_{is}^{MF} = \begin{bmatrix} X(1,2,3,4) \\ X(5,6,7,8) \\ X(9,10,11,12) \\ X(13,14,15,16) \\ X(17,18,19,20) \\ X(21,22,23,24) \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$$S_{ri} = \begin{bmatrix} X(25,...,30) \\ X(31,...,36) \\ X(37,...,42) \\ X(43,...,48) \\ X(49,...,54) \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$R^r = \begin{cases} \min & , \text{ if } x_i^{Con} = 0 \\ \max & , \text{ if } x_i^{Con} = 1 \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$x_i^{Con} = X(55,56,...,59) \quad (۱۴)$$

که در این روابط

y_s مقدار متغیر خروجی پیش‌بینی شده با استفاده از سیستم استنتاج فازی، y_r مقدار متغیر خروجی اندازه‌گیری شده، $\mu_{B^r}(z)$ مقادیر درجه عضویت متغیر خروجی برای قانون r ام که با استفاده از استلزام ممدانی به‌دست آمده است، R^r مشخص‌کننده نوع عملگر ارتباطی بین ورودی‌ها (نوع عملگر ارتباطی می‌تواند "یا" و "و" باشد)، $\mu_{A_{iS_{ri}}}(I_i)$ مقدار درجه عضویت به‌ازای ورود متغیر I_iام در تابع عضویت S_{ri}ام متغیر i از قانون r ام، $a_{A_{is}^r}, b_{A_{is}^r}, c_{A_{is}^r}, d_{A_{is}^r}$ کران‌های بالا، میان و پایین s امین توابع عضویت مرتبط با متغیر i ام در قانون r ام، i تعداد متغیرهای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده در سیستم استنتاج فازی، r تعداد قوانین مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی، s تعداد تابع عضویت برای هر متغیر ورودی و خروجی، x_{is}^{MF} مقدار متغیر تصمیم بیان کننده s امین تابع عضویت مرتبط با متغیر i ام، S_{ri} مشخص‌کننده تابع عضویت متغیر i ام در قانون r ام، n تعداد مجموعه ورودی- خروجی اندازه‌گیری شده مورد استفاده، s تعداد تابع عضویت برای هر متغیر، اعم از ورودی و خروجی، x_i^{Con} مقدار متغیر تصمیم بیان‌کننده نوع ارتباط متغیرهای ورودی و خروجی، X ماتریسی شامل متغیرهای تصمیم، اعم از قوانین فازی، مقادیر توابع عضویت و نوع ارتباط بین تابع عضویت متغیرها، I_i ماتریسی مشتمل بر سری زمانی متغیر i ام اندازه‌گیری شده، i تعداد متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی (۵ متغیر ورودی و ۱ متغیر خروجی به‌منظور پیش‌بینی رواناب مورد توجه قرار گرفته است) و r تعداد تابع عضویت برای هر متغیر ورودی و خروجی است.

به‌منظور شناخت بهتر توابع ارائه شده در مدل بالا، توضیحات مرتبط با هر رابطه ارائه می‌گردد. تابع هدف مدل تدوین شده، حداقل نمودن میزان خطای RMSE مقادیر شبیه‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی و مقادیر واقعی است (رابطه ۶).

با استفاده از ماتریس مقادیر ورودی- خروجی اندازه‌گیری شده (رابطه ۷) و مؤلفه‌های سیستم استنتاج فازی اقدام به توسعه مدل فازی- بهینه‌سازی گردید.

رابطه ۸ مقدار خروجی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل FIS را که بر اساس استلزام ممدانی عمل می‌نماید، نشان می‌دهد که به‌منظور تبدیل آن به حالت غیرفازی از روش مرکز سطح که رایج‌ترین روش تبدیل کمّیت فازی به کمّیت کلاسیک است، استفاده شده است.

رابطه ۹ نشان‌دهنده استلزام ممدانی بوده که بر اساس توابع عضویت متغیرهای ورودی و نوع عملگر مورد استفاده، می‌توان تابع عضویت پارامتر خروجی را بر پایه قوانین مشخص شده به‌دست آورد.

با توجه به متغیرهای تصمیم معرفی شده در این مطالعه، مقادیر مرتبط با تابع عضویت ذوزنقه‌ای هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی توسط روابط ۱۰ تا ۱۴ به مدل معرفی شد. در رابطه ۱۰ مقدار تابع عضویت ذوزنقه‌ای هر متغیر که با استفاده از ۴ عدد نمایش داده می‌شود، مشخص می‌شود که بر پایه آن می‌توان به‌ازای هر مقدار ورودی به این تابع عضویت، درجه تعلق آن را تعیین نمود. از آنجا که برای هر متغیر ۵ تابع عضویت در نظر گرفته شد لذا لازم است با توجه به متغیرهای تصمیم مسئله، مقادیر متناسب با توابع عضویت هر متغیر به‌منظور استفاده در مدل FIS تعیین گردد (روابط ۱۱ تا ۱۴).

همان‌طور که در رابطه ۱۵ نشان داده شده است یکی از متغیرهای تصمیم، کران‌های توابع عضویت متغیرهاست که به‌صورت ماتریس ۶ سطر برای ۶ متغیر و ۴ ستون برای ۴ کران تابع عضویت ذوزنقه‌ای ارائه شده است. متغیر دیگر، نحوه ترکیب تابع عضویت متغیرها است که با توجه به ۶ قانون در نظر گرفته شده برای این مطالعه، ماتریس رابطه ۱۶ دارای ۶ سطر برای ۶ قانون و ۶ ستون برای ۶ متغیر است. منظور از نحوه ترکیب تابع عضویت این است که برای هر متغیر ۵ نوع تابع عضویت شامل مقدار متغیر (دبی یا بارش) در صورتی که خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد باشد، در نظر گرفته شد. از آنجا که در سیستم استنتاج فازی لازم است متغیرهای ورودی با عملگری به هم مرتبط شوند لذا نوع

عملگر که "Or" و "and" است توسط متغیر تصمیم رابطه ۱۶ تعیین می‌شود. اگر عملگر "Or" باشد در استلزام ممدانی از روش min و در غیر این صورت از روش max به‌منظور ارتباط دادن بین متغیرهای ورودی استفاده می‌شود (رابطه ۱۷).

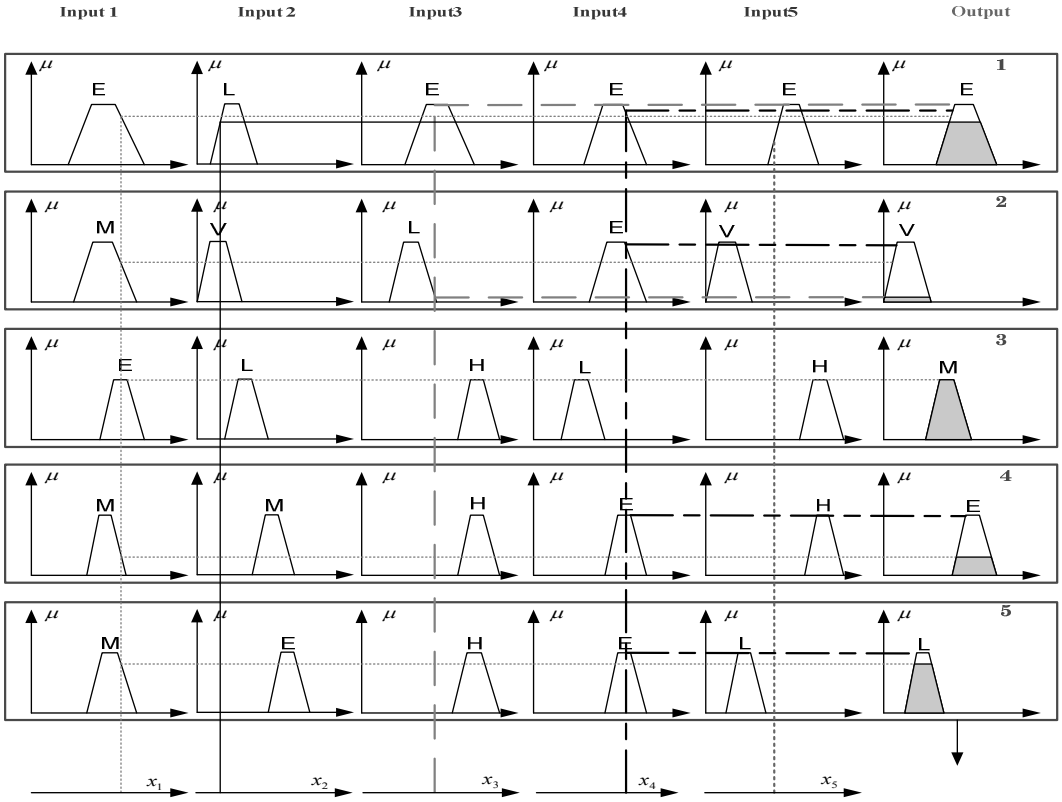
همچنین به‌منظور استخراج مقدار خروجی سیستم لازم است نحوه ارتباط بین قوانین تعریف گردد که در قالب متغیرهای تصمیم رابطه ۱۸ است.

با اجرای ساختار پیشنهادی توسط مدل بهینه‌سازی PSO می‌توان مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم را به‌دست آورد. بر اساس نتایج حاصل از مدل پیشنهادی می‌توان رواناب در پایین‌دست رودخانه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمود. مقادیر قوانین بهینه شده با استفاده از مدل PSO به‌صورت زیر است. در این قوانین کلمات اختصاری V، L، M، E، H در توابع عضویت نشان‌دهنده معیار خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند:

ELEEEE (And)
MVLEVV (Or)
ELHLHM (Or)
MMHEHE (Or)
MEHELL (And)

مفهوم قوانین به‌دست آمده بالا به این صورت است که به‌عنوان نمونه برای قانون اول: اگر بارش در ایستگاه دیزان زیاد، رواناب در ایستگاه گلینگ خیلی کم، بارش در ایستگاه گتـه‌ده زیاد، بارش در ایستگاه گلیرود زیاد و رواناب در ایستگاه مهران جوستان زیاد باشد، رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت زیاد خواهد بود. پارامتر داخل پرانتز برای هر قانون ارائه شده نشان‌دهنده نوع ارتباط منطقی بین متغیرهای ورودی است. شکل ۸ نحوه تعیین میزان رواناب خروجی را در ایستگاه سیاه‌دشت نشان می‌دهد. مطابق این شکل به‌منظور تعیین مقدار رواناب لازم است ابتدا آمار مرتبط با ایستگاههای هیدرومتری و باران‌سنجی بالادست رودخانه ثبت گردد. سپس مقادیر اندازه‌گیری شده (ورودی‌های سیستم) وارد توابع عضویت هر یک از قوانین می‌شود. در این حالت ممکن است یک ورودی وارد تابع عضویت بخشی از قوانین شده و به‌ازای تابع عضویت برخی از قوانین نتوان درجه تعلق خاصی را برای آن در نظر گرفت. این وضعیت را می‌توان در ورودی سوم شکل ۸ مشاهده نمود که این ورودی تنها در قواعد اول و دوم دارای درجه تعلق است.

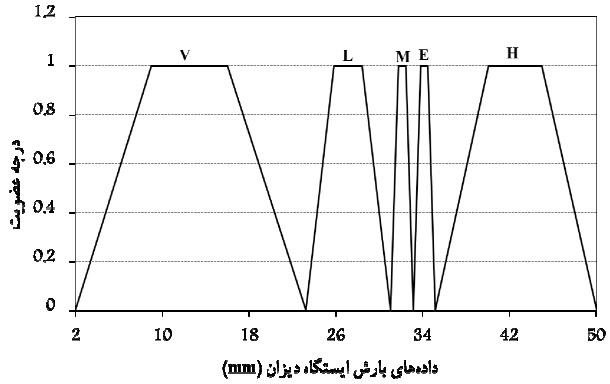
به‌عبارت دیگر مقدار این ورودی تأثیری در خروجی قواعد ۳، ۴ و ۵ نخواهد داشت. در مرحله دیگری از این مدل، درجه تعلقهای استخراج شده مرتبط با هر متغیر، در هر قانون بر اساس نوع عملگر پیشنهاد شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی با هم ترکیب شده و خروجی هر قانون را مشخص می‌نمایند. سپس بر اساس استلزام ممدانی، خروجی قوانین با هم ترکیب می‌شود. نحوه ترکیب به این



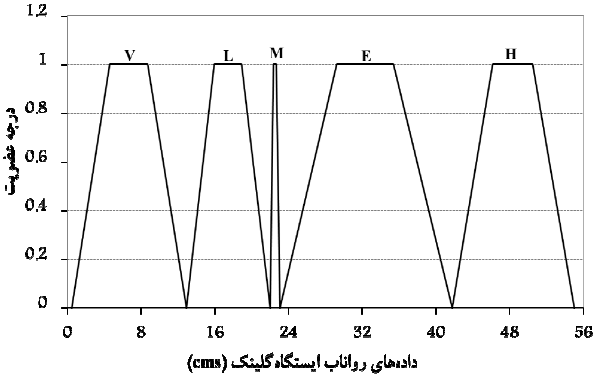
شکل ۸- نحوه تعیین میزان رواناب ایستگاه سیاه‌دشت از روی داده‌های ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری

صورت است که بیشینه مقدار تابع عضویت مرتبط با خروجی هر قانون، برای هر بازه مورد نظر محاسبه شده و به‌عنوان درجه تعلق خروجی سیستم برای آن بازه منظور می‌شود. این روند تا تکمیل تابع عضویت خروجی سیستم با توجه به بازه تغییرات خروجی هر یک از قوانین ادامه می‌یابد. پس از این مرحله، خروجی نهایی سیستم که همان مقدار رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت است، به‌صورت فازی به‌دست می‌آید. به‌منظور ارائه این مقدار به‌صورت عدد کلاسیک لازم است از روشهای غیرفازی‌ساز مانند مرکز سطح استفاده نمود. به‌منظور آگاهی از پارامترهای مرتبط با توابع عضویت بهینه متغیرهای ورودی و خروجی که توسط مدل بهینه‌سازی PSO به‌دست آمده است شکلهای ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مطابق این شکلها بازه بهینه تغییرات هر یک از توابع عضویت مرتبط با هر پارامتر که منجر به شبیه‌سازی با دقت بالاتر می‌شود، مشخص شده است. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان دریافت که مدل فازی به‌تنهایی قادر به شناسایی قوانین و رفتار سیستم نبوده و نیاز به بهبود پارامترهای آن با استفاده از مدل بهینه‌سازی است. همچنین از قوانین بهینه به‌دست آمده مشخص می‌شود که داده‌های ایستگاه هیدرومتری مهران جوستان تأثیر بسیار زیادی در پیش‌بینی میزان رواناب روزانه ایستگاه سیاه‌دشت دارد.

مطابق توضیح ارائه شده برای شکل ۸ می‌توان بر اساس توابع عضویت بهینه به‌دست آمده (شکلهای ۹ و ۱۰) اقدام به استخراج مقدار خروجی (رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت) نمود. به‌عنوان نمونه اگر میزان بارش در ایستگاههای دیزان، گلیرود و گته‌ده به‌ترتیب برابر با ۱۵، ۴/۳ و ۱۱ میلی‌متر و همچنین میزان رواناب اندازه‌گیری شده در ایستگاههای مهران جوستان و گلینک به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۱ مترمکعب در ثانیه در نظر گرفته شود، بر اساس قوانین بهینه پیشنهادی توسط مدل می‌توان مقدار خروجی (رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت) را برای هر قانون مورد محاسبه قرار داد. برای این منظور مطابق قانون اول "اگر بارش در ایستگاه دیزان



شکل ۹- تابع عضویت بهینه شده با استفاده از مدل PSO مرتبط با داده‌های بارش ایستگاه دیزان



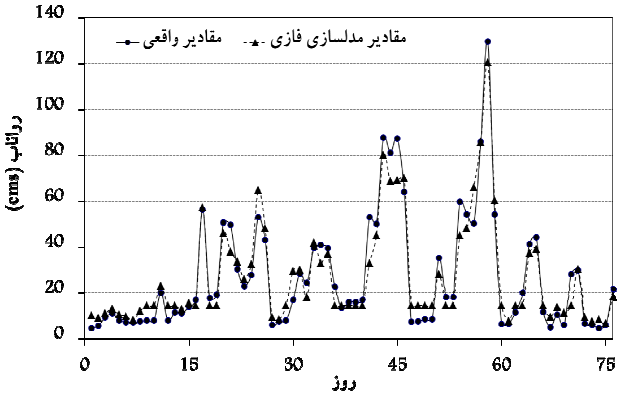
شکل ۱۰- تابع عضویت بهینه شده با استفاده از مدل PSO مرتبط با داده‌های رواناب ایستگاه گلینک

زیاد، رواناب در ایستگاه گلینگ خیلی کم، بارش در ایستگاه گته‌ده زیاد، بارش در ایستگاه گلیرود زیاد و رواناب در ایستگاه مهران جوستان زیاد باشد رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت زیاد خواهد بود"، لازم است از توابع عضویت E ، L ، E ، E و E به‌ترتیب برای ایستگاههای دیزان، گلینک، گته‌ده، گلیرود و مهران جوستان استفاده شود. بنابراین اگر مقدار ۱۵ میلی‌متر بارش در ایستگاه دیزان وارد تابع عضویت بهینه E شود، مقدار خروجی تابع عضویت برابر با صفر خواهد شد. به‌همین ترتیب این کار برای سایر ورودی‌ها انجام می‌شود. سپس با توجه به نوع ارتباط بین ورودی‌ها در قانون اول (که And است)، کمترین و یا بیشترین میزان خروجی از توابع عضویت ورودی‌ها به‌دست می‌آید. به‌دلیل اینکه در قانون اول نحوه ارتباط ورودی‌ها با And مشخص شده است لذا کمترین میزان مرتبط با خروجی توابع عضویت ورودی‌ها، وارد تابع عضویت بهینه خروجی قانون اول (E) می‌شود.

به‌همین ترتیب مقادیر عددی مورد اشاره وارد قانون دوم، سوم، چهارم و پنجم شده و بر اساس نوع ارتباطی که برای هر قانون تعریف شده است، مقادیر خروجی متناظر با آن به‌دست می‌آید. در مرحله آخر به‌ازای مقادیر مختلف رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت با توجه به بازه تغییرات رواناب در این ایستگاه، بیشترین مقدار خروجی از بین خروجی‌های حاصل شده از هر قانون، انتخاب و به‌عنوان تکمیل‌کننده تابع عضویت نهایی سیستم در نظر گرفته می‌شود. این کار برای تمامی مقادیر خروجی انجام و تابع عضویت متناظر با آن که ممکن است از اشکال منظم تابع عضویت (مثلثی و ذوزنقه‌ای و غیره) باشد، حاصل می‌شود. این عدد فازی به‌دست آمده که به‌صورت تابع عضویت نامنظم است بیانگر خروجی سیستم در نتیجه ورودی‌های داده شده است. حال اگر عدد کلاسیک این

خروجی مدنظر باشد لازم است با استفاده از یکی از روشهای غیرفازی‌ساز مانند روش مرکز سطح، مقدار معادل عدد فازی به‌دست آمده را به‌صورت عدد کلاسیک استخراج نمود. این عمل برای تمامی داده‌های مشاهده‌ای تکرار شده و خروجی سیستم، قابل مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است.

با اعمال مقادیر بهینه توابع عضویت و استفاده از مدل FIS، مقدار رواناب شبیه‌سازی در ایستگاه سیاه‌دشت به‌دست آمده که با ترسیم آن در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری می‌توان دقت روش ارائه شده در این تحقیق را مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۱۱). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است مدل بهینه‌سازی به‌خوبی توانسته جوابهایی را ارائه نماید که به‌ازای آنها، مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل فازی از دقت قابل قبولی برخوردار باشد.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده با مقادیر مدل‌سازی شده با استفاده از FIS (با استفاده از مدل بهینه‌سازی PSO)

به‌منظور ارزیابی کارایی و برتری ساختار تدوین شده از ۴ شاخص خطا که عمومیت بیشتری داشته، استفاده گردید که عبارت‌اند از: شاخص توافق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی[1]، شاخص متوسط قدرمطلق خطاها[2]، شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها[3] و شاخص کارایی سیستم[4].

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - x_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(|x_{mi} - \overline{x}_m| + |x_{ci} - \overline{x}_m|\right)^2} \quad (۱۵)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_{mi} - x_{ci}|}{n} \quad (۱۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - x_{ci})^2}{n}} \quad (۱۷)$$

$$EFF = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{ci} - \overline{x}_m)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{mi} - \overline{x}_m)^2}}\right)^2 \quad (۱۸)$$

که در این روابط x_{mi} و X_{ci} به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و $\overline{x}_m$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است. نحوه ارزیابی مدل‌ها بر اساس این شاخصها به این صورت است که هر چه شاخصهای IOA و EFF به ۱ و سایر شاخصها به صفر نزدیک‌تر باشند آن مدل از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. با استفاده از شاخصهای خطا و محاسبه آن برای ۴ مدل شبیه‌سازی و مدل پیشنهادی، می‌توان مقادیر این شاخصها را در قالب جدول ۲ ارائه نمود. بررسی این جدول برتری مدل پیشنهادی با توجه به شاخصهای محاسبه شده را نشان می‌دهد.

[1] Index of Agreement (IOA)
[2] Mean Absolute Error (MAE)
[3] Root Mean Square Error (RMSE)
[4] Efficiency (EFF)

جدول ۲- مقایسه شاخصهای خطای مرتبط با مدل‌سازی با روشهای مختلف

نام مدل / شاخص خطا	MSE	RMSE	MAE	IOA	EFF
FIS	۱۰۵۳/۷	۳۲/۴۶	۱۳/۴۸	۰/۲۹۴	۰/۴۲۷
ANFIS	۱۰۴۸/۲	۳۲/۳۸	۰/۲۷۴۴	۰/۴۲۲۳	۰/۷۹۴۴
ANN	۳۲۳/۵۴	۱۷/۹۸	۰/۹۴۱۸	۰/۷۹۵۱	۰/۴۶۹۲
NLR	۱۲۲/۸۲	۱۱/۰۸	$۵/۹۵\times۱۰^{-۶}$	۰/۹۴۱۶	۰/۸
مدل پیشنهادی (PSOFIS)	۴۴/۴۳	۶/۶۷	۰/۰۴۱۴	۰/۹۷۹۷	۰/۸۱

۴- بحث

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، داده‌های ایستگاههای هیدرومتری با تأخیر صفر و داده‌های ایستگاههای باران‌سنجی با تأخیر ۳ روز میزان همبستگی خود را با رواناب خروجی نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است مدل فازی تهیه شده نمی‌تواند به‌خوبی بیانگر رواناب در ایستگاه سیاه‌دشت باشد و این عدم دقت ناشی از نامناسب بودن قوانین تدوین شده و توابع عضویت در نظر گرفته شده برای متغیرهای ورودی و خروجی است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که مدل فازی به‌تنهایی قادر به شناسایی قوانین و رفتار سیستم نبوده و نیاز به بهبود پارامترهای آن با استفاده از مدل بهینه‌سازی است.

همان‌طور که از شکل ۱۱ قابل استنباط است، مدل تلفیق استنباط فازی و بهینه‌سازی PSO به‌خوبی توانسته‌اند جوابهایی را ارائه نمایند که به‌ازای آنها مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل فازی از دقت قابل قبولی برخوردار باشد. پارامترهای بهینه شده مرتبط با توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی که توسط مدل بهینه‌سازی PSO به‌دست آمده است نشان از تغییرات نامنظم هر یک از توابع عضویت در تنظیم مناسب‌ترین حالت برای پیش‌بینی رواناب دارد.

بررسی قوانین بهینه به‌دست آمده نشان می‌دهد که داده‌های ایستگاه هیدرومتری مهران جوستان تأثیر بسیار زیادی در پیش‌بینی میزان رواناب روزانه ایستگاه سیاه‌دشت دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر پایه آمار و اطلاعات موجود تعدادی از ایستگاههای باران‌سنجی و هیدرومتری بالادست رودخانه طالقان اقدام به تدوین مدل ترکیبی با استفاده از سیستم استنتاج فازی و الگوریتم PSO گردید. با اجرای مدل پیشنهادی و پیش‌بینی مقدار رواناب در پایین‌دست این رودخانه و همچنین مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، کارایی مدل مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج حاصل شده از این تحقیق چنانچه تنها سیستم فازی به‌منظور برآورد مقدار رواناب با استفاده از قوانینی که فراوانی وقوع بیشتری در طول دوره برداشت آمار دارا هستند، مورد توجه قرار گیرد منجر به نتایج نامناسبی از پیش‌بینی رواناب خواهد شد که مهم‌ترین اشکال در بروز چنین عدم دقتی، نامتناسب بودن توابع عضویت مورد استفاده در سیستم فازی است. به‌منظور حل این مسئله می‌توان با استفاده از الگوریتم PSO این توابع عضویت را به‌نحوی تخمین زد که مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی اختلاف اندکی داشته باشند. رویکرد ارائه شده در این مقاله می‌تواند برای هر منطقه که دارای اطلاعات ایستگاهی مناسبی باشد به‌منظور پیش‌بینی میزان رواناب در قسمتهای مختلف رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از قابلیت بالایی در پیش‌بینی مکانی رواناب برخوردار است. نکته قابل توجه در استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق این است که این روش برای جریان‌های طبیعی رودخانه قابل استفاده بوده و در جایی که جریان توسط سازه‌ای تنظیم شود نمی‌تواند کاربرد داشته باشد زیرا رواناب تولیدی در بالادست سازه و آب رها شده در پایین‌دست آن به‌دلیل متأثر بودن از سیاست‌های بهره‌برداری اعمالی در زمان‌های مختلف، کنترل شده بوده و نمی‌توان بر پایه داده‌های به‌دست آمده از چنین شرایطی اقدام به استخراج قوانین نهفته موجود در این آمار نمود.

۶- مراجع

1- Korepazan, A. (2005). *Fuzzy sets theory foundation and application in water engineering problem modeling*, Amirkabir Pub., Tehran. (In Persian)

2- Shaebanynia, F., and Saeidnia, F. (2006). *Fuzzy theory using MATLAB*, Khaniran Pub., Tehran. (In Persian)

3- Zahidi, R. (2001). *The application of nero-fuzzy in industry*, Eziran Publisher, Tehran. (In Persian)

4- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." *J. of Information and Control*, 8(3), 338-353.

5- Bárdossy, A., Bronstert, A., and Merz, B. (1995). "1-, 2- and 3-dimensional modeling of water movement in the unsaturated soil matrix using a fuzzy approach." *J. of Advances in Water Resources*, 18(4), 237-251.

6- Bárdossy, A., and Duckstein, L. (1995). *Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems*, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA.

7- Fontane, D.G., Timothy, K.G., and Moncado, E. (1997). "Planning reservoir operations with imprecise objectives." *J. of Water Resources Planning and Management*, 123(3), 154-162.

8- ABEBE, A.J., Solomatine, D.P., and Venneker, R.G.W. (2000). "Application of adaptive fuzzy rule-based models for reconstruction of missing precipitation events." *J. of Hydrological Sciences*, 45(3), 425-436.
9- Xiong, L., Shamseldin, A.V., and O'Connor, K.M. (2001). "A nonlinear combination of the forecasts of rainfall-runoff models by the first-order takagi-sugeno fuzzy systems." *J. of Hydrology*, 245(1), 196-217.
10- Coppola, E.A., Duckstein, L., and Davis, D. (2002). "Fuzzy rule-based methodology for estimating monthly groundwater recharge in a temperate watershed." *J. of Hydrologic Engineering*, 7(4), 326-335.
11- Luchetta, A., and Manetti, S. (2003). "A real time hydrological forecasting system using a fuzzy clustering approach." *J. of Computers and Geosciences*, 29(9), 1111-1117.
12- Singh, S.R. (2007). "A simple method of forecasting based on fuzzy time series." *J. of Applied Mathematics and Computation*, 186(1), 330-339.
13- Wu, C.L., and Chau, K.W. (2006). "Evaluation of several algorithms in forecasting flood." *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 4031, 111-116.
14- Wu, C.L., and Chau, K.W. (2006). "A flood forecasting neural network model with genetic algorithm." *Int. J. of Environment and Pollution*, 28(3/4), 261-273.
15- Tareghian, R., and Kashefipour, S.M. (2007). "Application of fuzzy systems and artificial neural networks for flood forecasting." *J. of Applied Sciences*, 7(22), 3451-3459.
16- Kuok, K.K., Harun, S., and Shamsuddin, S.M. (2010). "Particle swarm optimization feedforward neural network for modeling runoff." *Int. J. of Environ. Sci. Tech*., 7(1), 67-78.
17- Chau, K.W. (2006). "Particle swarm optimization training algorithm for ANNs in stage prediction of shing Mun river." *J. of Hydrology*, 329(3-4), 363-367.
18- Rajabpur, R., and Afshar, M.H. (2008). "Optimized operation of serial pump stations using the PSO algorithm." *J. of Water and Environment*, 66(2), 56-66.