



بهینه سازی هوادهی در مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها با استفاده از سیستم فازی و ساخت مدل فازی بر اساس روش Wang-Mendel

محمد رضا کاویانپور

(استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، تقاطع میرداماد)

پست الکترونیکی: Kavianpour@yahoo.com

محمد رضا نجفی

(دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، تقاطع میرداماد)

پست الکترونیکی: Reza.najafi61@gmail.com

چکیده

پدیده کاویتاسیون در مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها و مقابله با آن مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته و جنبه‌های مختلف این پدیده و روشهای مقابله و کنترل و کاهش صدمات آن بعنوان موضوعی جذاب در هیدرولیک سدها و سازه‌های متعلقه تبدیل گشته است. یکی از روشهای مناسب و اقتصادی جهت کنترل کاویتاسیون، وارد نمودن هوا به جریان می‌باشد. آزمایشهای تجربی بسیاری جهت ارائه روابطی در تعیین میزان هوای ورودی لازم ارائه گردیده است که به دلیل محدود بودن روابط به مدلهای خاص، روابط ارائه شده دارای خطاهای بالایی می باشد. در این تحقیق سعی گردیده کاربرد یک سیستم فازی ساده با روش Wang-Mendel که فاقد قابلیت آموزش می باشد در تعیین میزان هوادهی بعد از دریاچه های مجاری تخلیه کننده سدها بررسی گردد. دقت این سیستم به تعداد سعی و خطا و اطلاعات شخص خبره در ساخت سیستم محدود است. در ساخت مدل فازی بالغ بر ۲۴۳ داده شامل اطلاعات هوادهی در مدل تخلیه کننده تحتانی سدهای البرز، جگین، جره، گاوشان و دشت عباس در مؤسسه تحقیقات آب و مجرای تحتانی سد فولسوم استفاده شده است. پارامترهای ورودی نهایی شامل میزان بازشدگی دریاچه، سطح مقطع مجرا در محل دریاچه، هد آب بالادست دریاچه و نحوه هوادهی بعد از دریاچه می باشد. برای بیان نحوه هوادهی از پارامتر جدیدی استفاده شده که در سایر تحقیقات مدنظر قرار نگرفته است.

واژه های کلیدی: تخلیه کننده تحتانی سد، هواده، هوادهی، پایین دست یک دریاچه، ضریب هوادهی، منطق فازی، روش Wang-Mendel

مقدمه



هنگامیکه تونلهای تخلیه‌کننده تحتانی سدها با باز شدن دریچه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، بعلت سرعت بالای جریان، فشار در ناحیه پشت دریچه افت نموده و از فشار اتمسفر کمتر می‌گردد. در اثر این افت فشار و بعبارتی بروز فشار منفی در پایین‌دست دریچه، پیامدهای مخربی همچون وقوع کاویتاسیون باید مد نظر قرار گیرد. تحت شرایطی که امکان بروز فشارهای منفی در جریان وجود دارد، هوادهی جریان در مقایسه با سایر روشهای کنترل کاویتاسیون موثرتر، اقتصادی‌تر و نسبتاً از نظر اجرایی و طراحی آسانتر می‌باشد. Peterka در سال ۱۹۵۳ با انجام آزمایشاتی بر روی بتن در ونتوری با پریودهای ۲ ساعت و سرعتهایی تا حد ۳۵ متر بر ثانیه به این نتیجه رسید که غلظت هوای حدود ۱٪ تا ۲٪ باعث کاهش قابل ملاحظه تخریب کاویتاسیون می‌شود و برای غلظت هوای ۶٪ تا ۸٪ در نزدیکی کف جریان، تخریب متوقف می‌گردد [۱]. هوادهی جریان بر میدان فشار تاثیر می‌گذارد و از بروز فشارهای منفی در جریان و نوسانات شدید آن می‌کاهد [۲]. جهت تضمین هوادهی جریان در پایین‌دست دریچه‌ها باید مجرای هوای مناسب به نام هواده تعبیه و با ارتباط آن به اتمسفر، هوای مورد نیاز سیستم تامین گردد. برای تعیین میزان هوای مورد نیاز روابط تجربی بسیاری ارائه شده اند که از یک طرف به دلیل محدود بودن آنها به مدلهای خاص و از طرف دیگر در نظر نگرفتن تمامی عوامل مؤثر در هوادهی دارای خطاهای بسیاری می‌باشند.

مروری بر تحقیقات پیشین

محققان برای تعیین میزان هوادهی توسط هواده‌ها در پایین‌دست دریچه روشهای مختلفی را مورد استفاده قرار داده‌اند. روشهای تحلیلی به دلیل پیچیدگیهای زیاد هوادهی قابل اتکا نمی‌باشند و لذا استفاده از روشهای تجربی با اندازه‌گیری در مدل‌های آزمایشگاهی یا در پروتوتیپ مورد توجه محققان قرار گرفته است. در سال ۱۹۴۳، Kalinske و Robertson اولین محققانی بودند که در زمینه هواگیری جریان در مجاری بسته تحقیقاتی انجام دادند. ایشان جریان آب با پرش هیدرولیکی را که منجر به بسته شدن مجرا می‌گردد، بررسی نموده و از نتایج آزمایشات انجام داده در مجراهایی به قطر ۱۵۰ میلیمتر رابطه زیر را پیشنهاد نمودند [۳]:

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

که در آن β ضریب هوادهی جریان که نسبت دبی هوا به دبی آب است و Fr عدد فرود جریان بالادست پرش هیدرولیکی می‌باشند. نتایج بدست آمده از مدل‌های بزرگتر و پروتوتیپ نشان می‌دهند که ظرفیت هواگیری پرش در مجاری بسته با افزایش ابعاد مجرا، افزایش می‌یابد و بر این اساس برای پوش بالایی نتایج پروتوتیپ ضریب 0.0066 در رابطه (۱) به حدود 0.015 تغییر می‌یابد [۴].

محققان USACE نیز با استفاده از نتایج اندازه‌گیری میزان هوای ورودی از هواده در چند تخلیه‌کننده، تاثیر هندسه تونل را مورد بررسی قرار دادند [۵]. منحنی نمودار دبی هوا در هواده (Q_{av}) بر حسب بازشدگی نسبی دریچه رسم شده توسط آنها دارای دو ماکزیمم که اولی مربوط به جریان پودری در بازشدگیهای کم و دومی مربوط به جریان با سطح آزاد یا جریان با پرش هیدرولیکی در بازشدگیهای بالاتر می‌باشد. آنان با اندازه‌گیری میزان تقاضای هوای تخلیه‌کننده



چند سد مختلف و تحلیل داده‌ها، پوش بالای آنها را با رابطه (۲) مشخص نمودند. که در این رابطه Fr_c عدد فرود در محل فشردگی جریان می‌باشد.

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

در سال ۱۹۵۳، Guyton و Campbel برای تعیین میزان تقاضای هوای جریان از روش تحلیلی بر اساس اصول جریان آشفته استفاده نمودند و به نتایج تحلیلی نسبتاً مفیدی رسیدند. ولی در نهایت ایشان رابطه زیر را برای تعیین β ارائه نمودند [۶]:

$$\beta = 0.04(Fr_c - 1)^{0.85} \dots\dots\dots (۳)$$

در سال ۱۹۷۶، Sharma برای تعیین میزان هوای مورد نیاز در جریان پودری، جریان با سطح آزاد و همچنین همراه با پرش هیدرولیکی، آزمایشاتی را در مجرای مستطیلی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر انجام داد و از داده‌های پروتوتیپ نیز استفاده نمود. وی داده‌های بدست آمده برای جریان با سطح آزاد و حالت پودری را در نمودار β بر حسب عدد فرود در محل فشردگی جریان رسم نمود و متوجه شد که داده‌های جریان با سطح آزاد و جریان پودری از پراکندگی جداگانه‌ای پیروی می‌کنند. Sharma بعنوان پوش بالای داده‌ها در دو حالت مختلف روابط خطی زیر را پیشنهاد نمود [۷]:

$$\beta = 0.09Fr_c \dots\dots\dots (۴) \text{ جریان با سطح آزاد}$$

$$\beta = 0.2Fr_c \dots\dots\dots (۵) \text{ جریان پودری}$$

کاوایانپور در سال ۱۳۸۰ با بررسی نتایج آزمایشگاهی میزان هوای ورودی از هواده در مدل‌های چند تونل تخلیه‌کننده حدود بالایی و پایینی هوادهی جریان توسط هواده را بصورت زیر ارائه نمود [۸]:

$$\beta = 0.18(Fr_c - 1)^{0.75} \dots\dots\dots (۶) \text{ حد بالا}$$

$$\beta = 0.0012(Fr_c - 1)^{1.39} \dots\dots\dots (۷) \text{ حد پایین}$$

وی با بررسی جت خروجی از دریچه در مدل‌های مختلف نتیجه‌گیری نمود که بعلت شرایط هندسی مختلف مجرای پایین‌دست دریچه، در برخی مدل‌ها جت فقط از یک طرف (سطح بالایی آب) و در برخی از چهار طرف هواگیری می‌نماید. در سال ۲۰۰۵ کاویانپور و همکارانش به بررسی می‌زان دقت روابط ارائه شده در تعیی‌ن می‌زان هوای مورد نیاز بعد از دریچه‌های مجاری تخلیه‌کننده تحتانی سدها پرداختند [۹]. مقالی‌سه صورت گرفته بی‌ن نتای‌ج حاصل از این روابط و نتای‌ج مدل‌های فی‌زی‌کی ساخته شده نشان داد که خطا در محدوده وسیعی از ۱۱۰٪ تا ۵۵۰٪ قرار دارد.



منطق فازی

تئوری مجموعه فازی ابزاری است قدرتمند جهت ارتباط با متغیرهای زبانی و همچنین متغیرهایی با ماهیت تقریبی. این تئوری اولین بار توسط لطفی زاده ارائه گردید [۱۰]. بر خلاف مجموعه کلاسیک، مجموعه فازی شامل مجموعه ای از اعضا بدون مرزهای شفاف و در نتیجه امکان عضویت نسبی هر عضو وجود دارد. از اینرو مجموعه فازی، مجموعه ای شامل اعضایی با درجات عضویت پیوسته بین صفر تا یک است. این به معنای امکان تغییرات تدریجی از یک مجموعه به مجموعه دیگر است. با این رویکرد، یک عضو ممکن است با درجات و عضویت‌های متفاوتی به مجموعه های مختلف تعلق داشته باشد.

قواعد اگر- آنگاه فازی هسته یک سیستم استنتاج فازی را تشکیل می دهد. معمولا این قواعد جهت نشان دادن استنتاج های غیر دقیق بکار می روند که کاربرد مهمی در قابلیت انسان برای تصمیم گیری در یک محیط غیر دقیق و غیر قطعی دارد [۱۱]. یک قاعده اگر- آنگاه ممکن است به شکل زیر بیان شود:

IF x is A THEN y is B

x و y متغیرهایی هستند که مقادیر را به ترتیب در مجموعه های مرجع U و V (Universal of discourse) دریافت می کنند. A و B به ترتیب مجموعه های فازی در U و V می باشند. به عنوان مثال در مورد هوادهی در مجاری، با در نظر گرفتن بازشدگی دریچه به عنوان متغیر، قاعده اگر- آنگاه زیر ممکن است بکار رود:

اگر بازشدگی دریچه زیاد باشد، آنگاه میزان هوای ورودی به مجرا کم است.

که در آن زیاد و کم نمایانگر مجموعه های فازی هستند که در مجموعه مرجع تعریف می گردند و شرایط هوادهی را با توجه به بازشدگی دریچه بیان می دارند. بخش اول، بخش مقدمه (Premise part) و بخش آخر، بخش تالی یا نتیجه (Consequent part) خوانده می شود. عموما یک قاعده فازی شامل چند بخش مقدمه، A_i و یک بخش تالی (B) است:

IF A1, A2, A3...An THEN B

ساخت مدل فازی بر اساس روش Wang-Mendel

از آنجایی که اساس مدلسازی توسط سیستمهای هوشمند بر داده می باشد، سیستم فازی نیز از این قاعده مستثنی نیست. بنابراین گام اول در مدلسازی فازی جمع آوری اطلاعات ثبت شده است. در ساخت مدل فازی بالغ بر ۲۴۳ داده شامل اطلاعات هوادهی در مدل تخلیه کننده تحتانی سد های البرز، جگین، جره، تهام، سیمره، گاوشان و دشت عباس در مؤسسه تحقیقات آب و مجرای تحتانی سد فولسوم استفاده شده است. اما پارامترهای متعددی در پدیده هوادهی تأثیرگذار هستند که از مهم ترین آنها می توان به هد بالادست مجرا، ابعاد مجرا در محل دریچه، درصد بازشدگی دریچه، دبی آب عبوری و نحوه هوادهی جریان پس از عبور از زیر دیچه اشاره کرد. منظور از نحوه هوادهی جریان آنست که این امکان وجود دارد که با تغییرات هندسی سازه مجرا، جریان پس از دریچه به خصوص دریچه سرویس به صورت جت



خارج و هوادهی از اطراف صورت گیرد. ضمن آنکه در بعضی حالات نیز این تغییرات وجود نداشته و صرفا هوادهی سطحی صورت می گیرد. برای بیان نحوه هوادهی از پارامتر a استفاده شده است. که منظور از آن نسبت سطح مقطع مجرا در پایین دست دریچه است به سطح مقطع در بالادست دریچه. هر چه این نسبت بزرگتر باشد بیانگر آنست که مجرا در پایین دست بزرگتر شده و امکان هوادهی از اطراف بیشتر است.

پس از در نظر گرفتن متغیرهای ورودی محدوده حداکثر و حداقل هر متغیر تعیین گردید. این محدوده ها بر حسب مقیاس مدل آزمایشگاهی هستند. درصد بازشدگی دریچه در محدوده $[0, 100]$ ، هد بالادست مجرا بر حسب متر در محدوده $[1, 13]$ ، سطح مقطع مجرا در محل دریچه بر حسب متر مربع در محدوده $[0.015, 0.075]$ ، دبی آب عبوری بر حسب لیتر بر ثانیه در محدوده $[7, 370]$ ، پارامتر نحوه هوادهی در محدوده $[0.2, 0.5]$ همچنین متغیر خروجی دبی هوای وارد شده به جریان نیز در محدوده $[0, 140]$ بر حسب لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با تعیین محدوده هر پارامتر نوبت به تقسیم بندی هر بازه به چند مجموعه فازی می رسد. در این مورد در روش Wang-Mendel پیشنهاد خاصی ارائه نشده است. بنابراین با توجه به محدوده پراکندگی داده ها و با چندین سعی و خطا هر پارامتر ورودی به ۴ ناحیه فازی تقسیم گردید. توابع عضویت به شکل یکسان با فواصل مساوی به طوری که تمام محدوده هر متغیر را پوشش دهند در فضای هر متغیر پراکنده شده اند.

در مورد خروجی مدل ملاحظه گردید که با افزایش تعداد توابع عضویت تا تعداد مشخصی نتایج بهتری حاصل می گردد. از طرفی با مرتب کردن داده های خروجی مشاهده گردید که بیش از ۸۵٪ داده ها در محدوده $[0, 50]$ قرار دارند و تنها ۶٪ داده ها در بازه $[80, 140]$ می باشند. از اینرو توابع عضویت خروجی به شکل یکنواخت در کل بازه پخش نشده است. بلکه در محدوده اول یعنی تا میزان هوای ۵۰ لیتر بر ثانیه توابع عضویت بیشتر با پهنای کمتر و با تراکم نسبتا بالا ایجاد گردید و پس آن تا انتهای کل بازه به مرور تراکم کاهش یافت. با توجه به نکته ذکر شده حالت بهینه تقسیم بندی متغیر خروجی توسط ۱۴ مجموعه فازی در نظر گرفته شد.

ارائه نتایج و جمع بندی

علیرغم کابردهای وسیع سیستم فازی و قابلیت های قدرتمند آن در مدلسازی یکی از محدودیتهای این روش در حالت فازی ساده، عدم توانایی یادگیری بر اساس داده های موجود است. بنابراین در ساخت سیستم علاوه بر تکیه بر روش Wang-Mendel با چندین سعی و خطا و اجراهای مختلف مدل به بررسی اثرات متغیرهای مختلف و تعداد توابع عضویت متفاوت پرداخته شده است. بدین صورت که در ساده ترین شکل ممکن با سه متغیر ورودی و سه تابع عضویت یکسان برای هر متغیر سیستم اجرا و نتایج بررسی گردید. در این روند با افزایش تعداد متغیرها و تقسیم بندی نواحی سعی در پیدا کردن بهترین صورت گرفت. پروسه استنتاج فازی شامل ۵ قسمت می باشد: فازی سازی متغیرهای ورودی، اعمال عملگرهای فازی که در اینجا تنها از عملگر "AND" استفاده گردیده است، implication (استلزام) از بخش



مقدمه به تالی و تعیین نتیجه فازی هر قاعده، aggregation (تجمیع) برای تعیین خروجی نهایی به شکل فازی با تجمیع نتایج تمامی قواعد، و در پایان غیرفازی سازی.

در طی روند مدلسازی برای هر بخش چند حالت با هم مقایسه شده و بهترین حالت در نظر گرفته شده است. در مورد عملگر "AND" مینیمم (min) و ضرب (prod)، در استلزام از استلزام ممدانی (مینیمم و ضرب) و در تجمیع از ماکزیمم (max)، جمع (sum) که همان جمع ساده خروجی هر قاعده است و جمع جبری (probor) که قبلاً توضیح داده شد و در غیرفازی سازی از روشهای میانگین مراکز، نقطه وسط (bisector)، میانگین ماکزیمم، بزرگترین و کوچکترین ماکزیمم استفاده شده است. انتخاب بهترین ترکیب عملگرها با کمترین میزان خطا در بین حالات گوناگون به شکل رابطه زیر صورت گرفت که در آن y_i^R خروجی مدل و y_i^m خروجی ثبت شده واقعی است:

$$e = \sum_{i=1}^N abs(y_i^m - y_i^R) / \sum_{i=1}^N abs(y_i^m) \dots\dots\dots (8)$$

بر اساس نتایج ملاحظه گردید که بهترین روش غیر فازی سازی روش میانگین مراکز و بهترین عملگر "AND" و بهترین استلزام، ضرب می باشد. نکته دیگر آنست که با در نظر گرفتن ۳ متغیر ورودی اصولاً سیستم دارای خطای بالایی است. و با افزایش تعداد متغیرها خطا کاهش و رگرسیون افزایش می یابد. همچنین نکته بارز تأثیر قابل توجه هد بالادست مجرا بر نتایج مدل است به طوری که در حالت ۳ متغیر با در نظر گرفتن هد بالادست بجای دبی آب عبوری و همچنین پارامتر نحوه هوادهی، خطای مدل در حدود ۲۵٪ کاهش یافت. از آنجا که بازشدگی دریاچه و سطح مقطع مجرا در محل دریاچه دو پارامتر بسیار اساسی در هوادهی هستند در حالت ۴ متغیر مشاهده گردید که با افزایش تعداد توابع عضویت متغیر خروجی به ۱۷ عدد، میزان خطا افزایش اما رگرسیون بهبود یافته است.

بهترین مدل با کمترین خطا در حالت چهار متغیر مربوط به پارامترهای ورودی بازشدگی دریاچه، سطح مقطع مجرا، هد بالادست و نحوه هوادهی با در نظر گرفتن ۴ مجموعه فازی برای هر کدام، با خطای متوسط ۰/۲۹۸۷ بدست آمد. در حالت ۵ متغیره با اضافه نمودن پارامتر دبی آب بالادست خطا تنها به میزان ۰/۰۰۰۱ نسبت به حالت قبل کاهش یافت و رگرسیون در حدود ۰/۱۴ بهبود پیدا کرد. بنابراین به دلیل عدم تأثیر قابل توجه دبی آب عبوری در سیستم فازی ممدانی، مدل اصلی بر اساس ۴ متغیر ذکر شده ساخته شد. در این مدل متغیرهای ورودی به چهار ناحیه توسط توابع عضویت (Low, Medium, High, Very High) و متغیر خروجی به ۱۴ ناحیه توسط توابع عضویت (MF1...MF14) تقسیم بندی و در مجموع ۵۶ قاعده از مجموعه داده ها استخراج شد. جدول ۱ قواعد فازی ساخته شده با استفاده از روش Wang-Mendel را به صورت خلاصه نشان می دهد. به عنوان مثال قاعده اول بدین شکل می باشد:

IF Gate Opening is Low and Head is Low and Ag is Low and a is Low THEN Qa is MF2

در شکل 1 نتایج حاصل از مدل فازی حاضر با نتایج واقعی مقایسه شده است. محور X نشانگر دبی هوای ورودی ثبت شده، و محور Y بیانگر دبی هوای ورودی بدست آمده توسط مدل فازی می باشد. همانطور که در شکل ملاحظه می

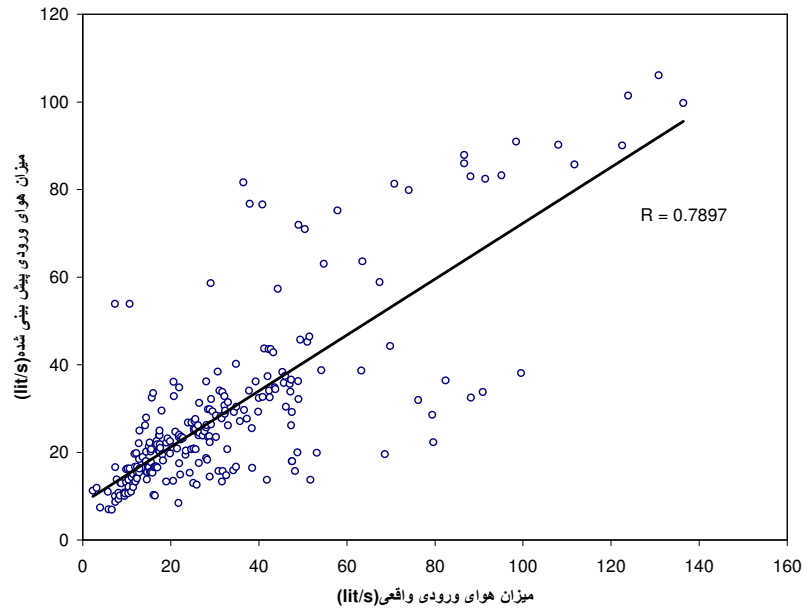


شود، رگرسیون حدود 0.79 حاصل این تحقیق است که در مقایسه با نتایج روابط تحلیلی سایر محققان، خطا افت محسوسی دارد. بر اساس نتایج حاصل، درصد خطای میانگین کل حدود 30% می باشد. در حدود 27% پیش بینی مدل میانگین خطای کمتر از 10% ، در حدود 48% پیش بینی مدل میانگین خطای کمتر از 20% و در حدود 77% پیش بینی مدل میانگین خطای کمتر از 50% را دارا می باشد.

نتایج حاصل نشاندهنده آنست که سیستمهای فازی در مدلسازی هوادهی مجاری تخلیه کننده تحتانی سدها قابلیت بالاتری را نسبت به روابط تجربی ارائه شده دارا می باشند. و این در حالیست که مدل فازی ارائه شده تنها بر اساس داده های موجود آزمایشگاهی ساخته شده و فاقد قابلیت یادگیری می باشد. از طرفی با افزایش داده های آزمایشگاهی و داده های پروتوتیپ و اعمال آنها به مدل می توان خطای سیستم فازی موجود را به حداقل رساند.

مراجع:

- 1) Peterka A.J. (1953), "The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR/ASCE, Minneapolis, USA, pp. 507-518.
- 2) Kavianpour M.R. (1997), "The Reattaching Flow Downstream of Deflectors Including the Effect of Air Injection", A Thesis Submitted to the University of Manchester Institute of Science and Technology For The Dergree of PHD, Manchester, UK.
- 3) 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.
- 4) Novak P. (1984), "Developments in Hydraulic Engineering-2", Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA.
- 5) United States Army Corps of Engineers (1964), "Hydraulic Design Criteria: Air Demand-regulated Outlet Works", USACE, USA.
- 6) Campbel F.B. and Guyton B. (1953), "Air Demand in Gated Outlet Works", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR/ASCE, Minneapolis, USA, pp. 529-533.
- 7) Sharma H.R. (1976), "Air-Entrainment in High Head Gated Conduits", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 102(HY 11), pp. 1629-1646.
- 8) کاویانپور م.ر. (۱۳۸۰)، "ارزیابی روابط تجربی ضریب هوادهی دریچه‌ها"، مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، کرمان، ایران.
- 9) Kavianpour, M. R. Rajabi, E. & Forsatkar, E. "Air demand downstream of bottom outlet leaf gates", 73rd Annual Meeting Of ICOLD, Tehran, Iran, May 2005
- 10) LotfiZadeh, "Fuzzy sets. Information and Control", 1965; 8:338-53.
- 11) Jang, J.-S. R. and C.-T. Sun, Neuro- Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice Hall, 1997



شکل ۱: مقایسه نتایج پیش بینی دبی هوا توسط مدل فازی با نتایج آزمایشگاهی

جدول ۱: پایگاه قواعد فازی برای چهار متغیر ورودی

(بازشدگی دریچه، هد آب بالادست، سطح مقطع مجرا در محل دریچه و پارامتر نحوه هوادهی)

IF	Opening	and	H	and	A_g	and	a	THEN	Q_a
	L		L		L		L		MF2
	L		L		L		H		MF2
	L		L		M		L		MF3
	L		M		VH		L		MF7
	L		H		L		L		MF5
	L		H		L		H		MF6
	L		H		M		L		MF4
	M		L		M		L		MF5
	M		L		M		VH		MF3



ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران
دانشگاه شهرکرد، ۱۵-۱۳ شهریور ۱۳۸۶



M	L	VH	L	MF4
M	M	L	L	MF3
M	M	L	H	MF6
M	M	VH	L	MF6
M	H	L	L	MF4
M	H	L	H	MF7
M	H	M	L	MF10
H	M	L	L	MF3
H	M	L	H	MF6
H	M	M	L	MF9
H	M	M	VH	MF6
H	M	H	M	MF8
H	M	VH	L	MF4
H	H	L	L	MF4
H	H	L	H	MF9
H	H	M	L	MF12
H	VH	M	L	MF12
VH	L	L	H	MF4
VH	L	M	VH	MF4
VH	M	L	L	MF2
VH	M	L	H	MF9
VH	M	M	L	MF10