

تخمین کانتورهای سرعت در کانال مثلی با توزیع زبری غیر یکنواخت با استفاده از سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی

سارا بردستانی^۱، محمد گیوه‌چی^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
(نویسنده مسئول) Sa.bardestani@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

پذیرش ۹۵/۳/۱۲

(دریافت ۹۴/۵/۱۳)

چکیده

کانال‌های مثلی در مهندسی آب و فاضلاب کاربردهای متنوعی دارند؛ از این رو مشخصات هیدرولیکی جریان در این مقاطع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهشگران روش‌های مختلفی برای تخمین کانتورهای سرعت در مقاطع منشوری ارائه کرده‌اند. اکثر روش‌های ارائه شده اثر زبری جداره‌ها، نحوه توزیع زبری و جریان‌های ثانویه را بررسی نمی‌کنند. با این حال به‌علت پیچیدگی و غیرخطی بودن کانتورهای سرعت در مجاری روباز، هیچ رابطه ساده‌ای وجود ندارد که بتواند به‌طور دقیق کانتورهای سرعت را تخمین بزند. در این پژوهش رهیافتی کارآمد به‌منظور مدل‌سازی کانتورهای سرعت در کانال‌های مثلی روباز با توزیع زبری غیر یکنواخت، با استفاده از سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی ارائه شد. برای آموزش و ارزیابی مدل از اطلاعات آزمایشگاهی شامل ۱۷۰۳ داده در مجاری مثلی با تقارن هندسی و توزیع زبری غیر یکنواخت استفاده شد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر تخمینی توسط مدل نشان می‌دهد که مدل ANFIS، قابلیت کاربرد در شبیه‌سازی سرعت موضعی و تعیین کانتورهای سرعت را به خوبی داراست و ارزیابی مستقل نشان می‌دهد که مقادیر دبی و سرعت متوسط عمقی محاسبه شده از اطلاعات مدل، با دقت زیادی منطبق بر مقادیر آزمایشگاهی است.

واژه‌های کلیدی: کانال مثلی، کانتور سرعت، سرعت متوسط عمقی، سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی

۱- مقدمه

نتایج پژوهش دیگری در تخمین دبی نشان داده است که توزیع سرعت، متأثر از عوامل زیادی از جمله جریان‌های ثانویه، هندسه مقطع، خصوصیات هیدرولیکی و شیمیایی سیال است (Wark et al. 1990). تأثیر تغییرات غلظت رسوب معلق بر روی ویژگی‌های پروفیل سرعت در پژوهش دیگری بررسی شده است (Coleman 1986). در پژوهش ارائه شده توسط سارما و همکاران مدلی نیمه تجربی برای مدل‌سازی پروفیل سرعت در مجاری مستطیلی ارائه شده است (Sarma et al. 1983). معادله توزیع سرعت می‌تواند توسط مفاهیم آنتروپی با تابع چگالی احتمال مناسب به‌دست آید (Chiu & Tung 2002). در پژوهش دیگری مدلی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ایجاد شده و کانتورهای سرعت در کانال‌های مستطیلی باز، شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داده که شبکه‌های عصبی مصنوعی به خوبی می‌تواند پروفیل‌های سرعت را مدل‌سازی نماید (Yang & Chang 2005). کانال‌های مثلی شکل غالباً به‌عنوان مقاطع متعارف در مجاری هدایت آب‌های سطحی با دبی کم مطرح می‌شوند. در دره‌های عمیق

با توجه به اهمیت توزیع سرعت جریان در برآورد بسیاری از مشخصات هیدرولیکی، شناخت بهتر و استفاده از روش‌های فراگیر، دقیق و آسان در تخمین آن ضروری است. آگاهی از وضعیت جریان و نحوه توزیع قائم و عرضی سرعت به‌عنوان اطلاعات پایه، در بازه وسیعی از تحقیقات از جمله مدیریت و مدل‌سازی آلودگی، مطالعات زیست‌محیطی و تخمین دبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bogle 1997; Knight et al. 2007). توزیع سرعت جریان در مجاری باز، پیچیده و سه بعدی است و به‌دست آوردن رابطه‌ای کلی که بیانگر توزیع سرعت جریان در کانال‌هایی با خصوصیات متفاوت باشد، به سادگی میسر نیست (Waldon 2004). تاکنون یک تعریف و مدل‌سازی کامل برای پروفیل‌های سرعت در جریان آشفته ارائه نشده است. در راستای بررسی جریان در مجاری باز و بسته، روش‌های عددی و همچنین نتایج آزمایشگاهی گسترده‌ای ارائه شده است. بررسی سه بعدی جریان در کانال‌های باز در پژوهش هانگ و همکاران انجام شده است (Huang et al. 2002).

آزمایش‌هایی به منظور تعیین توزیع سرعت در مقطع و همچنین تخمین سرعت متوسط عمقی در کانال مستطیلی و مثلثی انجام شده است. فلوم آزمایشگاهی که آزمایش‌های مقطع مثلثی در آن انجام شد، دارای طول ۸ متر بود. محل اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه سرعت‌سنج در فاصله ۴/۸ متری از ابتدای کانال انتخاب شد. از سرعت‌سنج مدل Low Speed Probe 403 با دقت ۱ درصد در برداشت سرعت، در محدوده ۱۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی مورد اشاره نشان داد که در این نقطه، جریان توسعه یافته است. سرعت نقطه‌ای در فواصل عرضی و عمقی معین توسط مولینه برداشت شد. سرعت آب در فاصله ۰/۶ تا ۱/۰ سانتی‌متری از سطح آزاد سیال نیز توسط لوله پیتو با دقت ۵ درصد، اندازه‌گیری شد و به‌عنوان سرعت سطحی آب در نظر گرفته شد. جداره شیشه‌ای به‌عنوان اولین زبری در آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفت. دومین و سومین نوع زبری، مربوط به دانه‌های شن به ترتیب با قطر متوسط ۳/۵ میلی‌متر و ۱۱ میلی‌متر بود که به بدنه توسط چسب، چسبانده شد. به منظور تعیین ضریب زبری مانینگ (n) با توجه به نحوه توزیع زبری جداره، از معادله مانینگ که از دقت بیشتری نسبت به سایر معادلات برخوردار است، استفاده شد

$$n = \frac{AR_h^3 S_0^2}{Q} \quad (1)$$

که در آن

A سطح مقطع جریان، Q دبی، S_0 شیب کانال و R_h شعاع هیدرولیکی مقطع است. با انجام چندین آزمایش در دبی‌ها و ارتفاع‌های مختلف آب، مقادیر ضریب زبری مانینگ برای شیشه و زمانی که کل مقطع با دانه‌های شن به ترتیب با قطر متوسط ۳/۵ میلی‌متر و ۱۱ میلی‌متر پوشیده باشند، به ترتیب برابر با ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۷۸ و ۰/۰۲۲۵ محاسبه شد.

مقاطع مثلثی مورد استفاده در این پژوهش، در دو حالت مختلف از نظر شکل هندسی در نظر گرفته شد. در شکل ۱ زوایای داخلی مثلث‌های متقارن از نظر هندسی برابر با ۴۶ و ۵۳/۱۳ درجه با شیب جانبی s (1:s) به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۰/۵ است. سه نوع زبری در این مقاطع در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ انواع

شکل ۷ با بستر مقاوم عملاً رودخانه دارای شکلی مثلثی خواهد بود. بررسی شرایط جریان در این مقاطع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی منابع علمی نشان داد که اطلاعات کمی در مورد توزیع سرعت در این مقاطع وجود دارد.

در پژوهش‌های مختلف وضعیت کانتورهای سرعت در داکت‌های مثلثی در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. نتایجی در رابطه با بررسی جریان‌های ثانویه در داکت‌های مثلثی و توزیع سلول‌های جریان‌های ثانویه نیز ارائه شده است اما در کلیه موارد، مقطع مثلثی بسته که بیشتر در مجاری عرضی عبوری از زیر راه‌ها استفاده می‌شود، مورد تحقیق قرار گرفته است (Aly et al. 1978; Cope & Hanks 1972; Bandopadhyay & Hinwod 1973)

تعداد محدودی از پژوهشگران به کانال‌های باز با سطح مقطع مثلثی، پرداخته‌اند. پژوهش‌هایی در مورد تخمین سرعت متوسط عمقی در مجاری مثلثی باز، تعیین توزیع تنش برشی در مقاطع مثلثی باز، توزیع سرعت و تنش برشی در مقطع مثلثی با زبری یکنواخت و غیر یکنواخت انجام شده است (Sooky 1969; Lane 1953; Maghrebi & Givehchi 2010) در اغلب پژوهش‌ها توزیع زبری بر روی جداره کانال یکسان در نظر گرفته می‌شود. اما در عمل به دلایل مختلف از جمله فرسایش و رسوب‌گذاری ممکن است توزیع غیر یکنواخت زبری در دو جداره مقطع مثلثی ایجاد شود (Maghrebi & Givehchi 2010)

در این پژوهش روشی نوین به منظور تخمین کانتورهای سرعت در مجاری روباز مثلثی شکل با توزیع زبری غیر یکنواخت با بهره‌گیری از سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی^۱ ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات تخمینی دبی و همچنین توزیع سرعت متوسط عمقی که کاربرد فراوان به‌ویژه در تخمین ضریب توزیع آلودگی دارد، محاسبه می‌شود. این مدل در کانال‌های منشوری شکل و با هندسه‌های متداول و توزیع زبری‌های مختلف قابل استفاده است.

۲- روش کار

۲-۱- اطلاعات آزمایشگاهی

داده‌های این پژوهش، از مطالعات آزمایشگاهی قبلی نویسنده جمع‌آوری شده است (Givehchi 2009). در آن پژوهش

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

مقطع، A مساحت سطح مقطع جریان، U سرعت متوسط و Fr عدد فرود جریان است. نام هر آزمایش ترکیبی از نام‌های در نظر گرفته شده برای هندسه و الگوی زبری و ارتفاع آب رأس مثلث در آزمایش است.

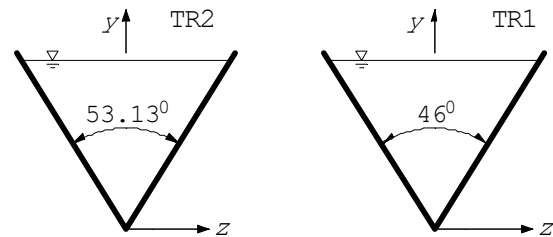


Fig. 1. Various shapes of triangular sections
شکل ۱- شکل‌های مختلف مقاطع مثلثی

۲-۲- سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی
ریاضیات مبهم یا فازی، با توزیع و احتمال قابل توصیف نیستند (Teshnehlab et al. 2008) شبکه‌های عصبی که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، از عناصر عملیاتی ساده‌ای به صورت موازی و تعداد دلخواهی نرون تشکیل می‌شوند که مجموعه ورودی را به خروجی ربط می‌دهند (Wol Pert 1992). اصطلاح ANFIS مخفف عبارت "سیستم استنتاج فازی تطبیق پذیر مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی" است (Chang & Chang 2006)

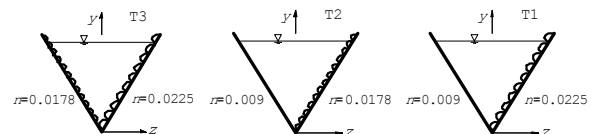


Fig. 2. Types of different roughness distributions for triangular sections
شکل ۲- انواع توزیع‌های مختلف زبری برای مقاطع مثلثی

این سیستم پیاده‌سازی یک سیستم فازی سوگنو به صورت ساختار شبکه‌ای پیش رونده است. مدل‌های فازی-عصبی که در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیب می‌نماید (Jang 1993). علت اصلی ترکیب سیستم‌های فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی است (Jeon 2007). در شکل ۳ معماری مدل ANFIS معادل یک سیستم فازی تاکاگی- سوگنو با دو ورودی A و B و یک خروجی F و دو قانون ارائه شده است.

توزیع‌های مختلف زبری برای هر یک از اشکال شکل ۱ نشان داده شده است. مقطع TR1، با سه ارتفاع آب ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر و مقطع TR2 با دو ارتفاع آب ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر در هر یک از توزیع‌های زبری نشان داده شده در شکل ۲، مورد آزمایش قرار گرفتند. شیب طولی کانال در همه آزمایش‌ها ۰/۰۰۰۶ بود. در این تحقیق ۱۵ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. نام و مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول H ارتفاع آب در رأس مثلث، Q دبی اندازه‌گیری شده

جدول ۱- نام، مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1. Name, Geometry and hydraulic parameters of experiments

Experiment	Name	H (cm)	A (cm ²)	Q (lit/s)	U (ms ⁻¹)	Fr
1	TR1-T1-H15	15	95.4	1.59	0.165	0.136
2	TR1-T1-H25	26.5	297.9	6.55	0.222	0.138
3	TR1-T1-H35	34	117	12.17	0.250	0.136
4	TR1-T2-H15	18.3	142	3.1	0.223	0.167
5	TR1-T2-H25	25	265.1	6.79	0.261	0.166
6	TR1-T2-H35	34	490.4	15.41	0.304	0.165
7	TR1-T3-H15	16	108.6	1.47	0.140	0.112
8	TR1-T3-H25	26.2	291.2	5.14	0.179	0.111
9	TR1-T3-H35	35	519.6	11.16	0.206	0.110
10	TR2-T1-H15	14.3	106.3	1.89	0.180	0.152
11	TR2-T1-H25	25.6	340.9	8.18	0.235	0.150
12	TR2-T2-H15	15	117	2.53	0.221	0.182
13	TR2-T2-H25	25	325.1	9.0	0.267	0.170
14	TR2-T3-H15	15	117	1.65	0.145	0.119
15	TR2-T3-H25	25	325.1	6.32	0.188	0.120

ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گره‌های متصل به هم است که به طور مستقیم به هم مرتبط شده‌اند و در آن هر گره یک واحد پردازشگر محسوب می‌شود. با استفاده از این شبکه، مشکل اصلی استفاده از سیستم استنتاج فازی که بهینه‌سازی پارامترهای مورد استفاده در مدل بود، رفع می‌شود. بخشی از این گره‌ها تطبیقی هستند، به این معنی که خروجی‌شان به پارامترهای وابسته به این گره‌ها بستگی دارد. گره‌های مربعی، گره تطبیقی شامل تابع بوده و گره‌های دایره‌ای گره‌های ثابتی هستند که هیچ تابعی بر روی آن‌ها اعمال نمی‌شود (شکل ۳). به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی، این پارامترها مطابق با داده‌های آموزشی و بر اساس فرایند یادگیری بهنگام می‌شوند.

برای تعیین ساختار مدل، روش‌های متعددی پیشنهاد شده است که پرکاربردترین آن‌ها، روش افراز شبکه‌ای و خوشه‌بندی فازی

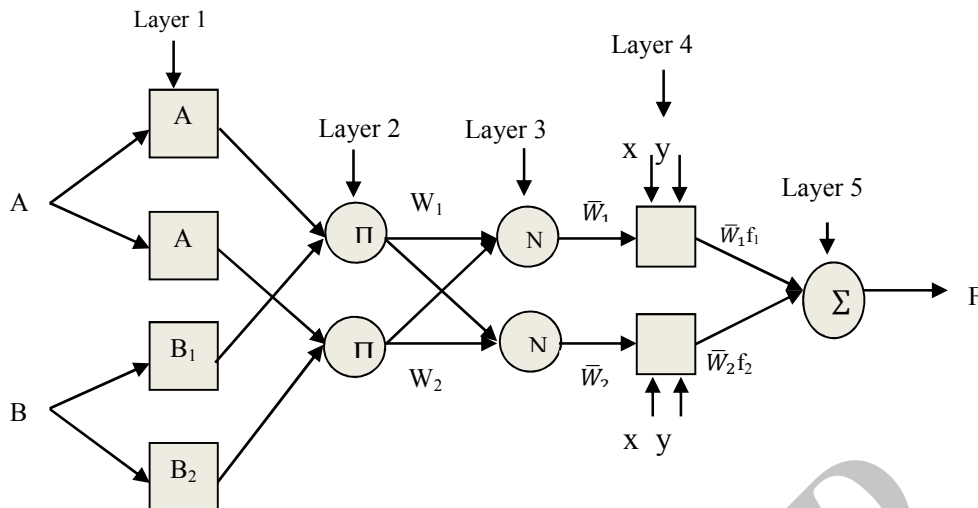


Fig. 3. Architecture of ANFIS model based on Takagi- Sugeno Fuzzy Inference System with two inputs, two rules and one output

شکل ۳- معماری مدل ANFIS معادل سیستم استنتاج فازی تاکاگی- سوگنو با دو ورودی، دو قانون و یک خروجی

هدف آنالیز ابعادی، شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده مورد مطالعه و تعیین نسبت‌های بی‌بعد این پارامترها و بیان ارتباط بین این نسبت‌ها است. به منظور بررسی و تخمین سرعت متوسط عمقی در مقاطع مثلثی باز متقارن با زبری غیریکنواخت، استفاده از تحلیل ابعادی و ساخت گروه‌های بی‌بعد به منظور تعیین روشی فراگیر، ضروری به نظر می‌رسد. با استفاده از متغیرهای بی‌بعد به جای متغیرهای اصلی، از تعداد کمتری کمیت متغیر استفاده می‌شود. از طرف دیگر تعداد آزمایش‌ها به منظور تعیین رابطه حاکم بر پدیده مورد مطالعه کاهش می‌یابد. همچنین متغیرهای بی‌بعد حاصل از آنالیز ابعادی به سیستم آحاد بستگی ندارد و در هر سیستمی قابل استفاده است. با استفاده از قضیه پی‌باکینگهام^۱، کمیت‌های بدون بعد انتخاب شده و در نهایت شکل کلی معادله حاکم بر توزیع سرعت در مقاطع مثلثی به صورت زیر ارائه می‌شود

$$\frac{u(y,z)}{\sqrt{gH}} = f\left(\frac{y}{T}, \frac{z}{T}, \frac{H}{T}, S_L, S_R, n_L, n_R\right) \quad (3)$$

بنابراین برای ساخت شبکه ANFIS، با استفاده از معادله بی‌بعد ۳، پارامترهای $\frac{H}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{y}{T}$ ، S_L ، S_R ، n_L و n_R به عنوان پارامترهای مؤثر ورودی و $\frac{u(y,z)}{\sqrt{gH}}$ به عنوان خروجی به مدل معرفی شد. وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه‌ها می‌شود.

کاهش است. تفاوت عمده این دو روش در چگونگی تعیین تابع عضویت فازی است (Haykin 1999). در روش افراز شبکه‌ای، نوع و تعداد تابع عضویت بردار اطلاعات ورودی توسط اطلاعات ورودی تعیین می‌شود. در روش خوشه‌بندی فازی کاهش، نوع تابع عضویت با توجه به خصوصیات بردار اطلاعات ورودی و دسته‌بندی موجود در آن‌ها توسط خود مدل تعیین می‌شود (Chiu 1994; Rumelhart & McClelland 1986).

۳-۲- سازمان‌دهی داده‌ها

با توجه به نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران و مشاهدات فیزیکی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سرعت موضعی در راستای طولی کانال $u(y, z)$ در مختصات y و z در مقاطع مثلثی روباز با هندسه متقارن و زبری غیریکنواخت عبارت از H ارتفاع سیال در محل راس مثلث، T عرض سطح آزاد آب، S_L و S_R به ترتیب شیب وجوه چپ و راست مقطع، g شتاب ثقل، n_L ، n_R ، به ترتیب ضریب زبری مانینگ در جداره‌های چپ و راست مقطع، S_0 شیب طولی کانال و وضعیت سلول‌های جریان ثانویه می‌باشند. اثر جریان‌های ثانویه در اطلاعات سرعت آزمایشگاهی وجود دارد. با صرف نظر کردن شیب کانال به دلیل عدم تغییر آن در آزمایش‌های انجام شده، می‌توان رابطه این پارامترها را مطابق زیر بیان نمود

$$f(u(y, z), y, z, H, T, S_L, S_R, n_L, n_R, g) = 0 \quad (2)$$

¹ π Buckingham

رو باز، از پارامترهای $\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{H}{T}$ ، S_L ، S_R ، n_L و n_R به عنوان داده‌های ورودی شبکه استفاده شد. در جدول ۲ نتایج مدل فازی-عصبی با پارامترهای ورودی مختلف نشان داده شده است. بررسی مدل‌ها و پاسخ‌های به دست آمده، نشان داد که استفاده از سه پارامتر ورودی $\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ و $\frac{H}{T}$ در راستای تخمین $\frac{u(y,z)}{\sqrt{gH}}$ نتایج ضعیفی را ارائه می‌دهد. در این حالت نتایج قسمت ارزیابی برابر با ضریب همبستگی ۴۴/۶۴ درصد، جذر میانگین مجذورات خطا ۰/۰۲۸۸ و میانگین خطای مطلق ۰/۰۲۴۵ است. این در حالی است که اضافه کردن پارامترهای n_L و n_R یا S_L و S_R به عنوان اطلاعات ورودی به مراتب نتایج بهتری را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که پارامترهای زبری نسبت به پارامترهای شیب جداره‌ها تأثیر بیشتری بر روی مقدار سرعت تخمینی دارد. به گونه‌ای که مقادیر $R^2(\%)$ ، $RMSE$ و MAE حاصل از مدل‌سازی شبکه با استفاده از پارامترهای نسبت ابعاد و زبری جداره‌های کانال، به ترتیب برابر با ۸۸/۱۹، ۰/۰۱۳۱ و ۰/۰۱۰۹ درصد به دست می‌آید. همچنین ترکیب پارامترهای نسبت ابعاد، زبری و شیب جداره‌ها با یکدیگر باعث بهبود نتایج می‌شود. با مقایسه نتایج سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی، مدل‌های با هفت پارامتر ورودی از مدل‌های با پنج و یا سه پارامتر ورودی دارای قدرت ارزیابی بهتری است. مقادیر ضریب همبستگی، جذر میانگین مجذورات خطا و میانگین خطای مطلق حاصل از مدل‌سازی با استفاده از هفت پارامتر ورودی به ترتیب برابر با ۸۸/۳۹، ۰/۰۱۳۰ و ۰/۰۰۹۹ درصد است. در این پژوهش، تعداد توابع عضویت برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. مدل فازی-عصبی استفاده شده در این پژوهش، شامل روش افزاز شبکه‌ای و روش خوشه‌بندی فازی کاهش‌ی است. در روش افزاز شبکه‌ای، تابع عضویت بخش نتیجه به دو صورت

برای احتراز از چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان کردن ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل استانداردسازی صورت می‌گیرد. لذا داده‌ها با استفاده از معادله ۴ بین دو عدد ۰/۱ و ۰/۹ استاندارد می‌شوند

$$x_i = 0.8 \left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) + 0.1 \quad (4)$$

که در این معادله، x_i مقدار استاندارد شده، x مقدار واقعی و x_{\min} و x_{\max} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها می‌باشند. در این پژوهش به منظور سنجش کارایی مدل از معیارهای ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مجذورات خطا که به ترتیب توسط معادلات زیر ارائه می‌شود، استفاده شد

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f_i^{\text{observed}} - f_i^{\text{predicted}})^2}{\sum_{i=1}^N (f_i^{\text{observed}} - \bar{f}_i^{\text{observed}})^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i^{\text{observed}} - f_i^{\text{predicted}}| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i^{\text{observed}} - f_i^{\text{predicted}})^2} \quad (7)$$

f_i^{observed} مقدار مشاهده شده که در این معادلات، $\bar{f}_i^{\text{observed}}$ مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌ها است. $\bar{f}_i^{\text{observed}}$ میانگین مشاهده شده داده مورد نظر است.

به منظور مدل‌سازی سرعت موضعی در مقاطع مثلثی با توزیع زبری غیر یکنواخت با استفاده از ANFIS، کل داده‌ها که برابر ۱۷۰۳ داده است، به دو دسته آموزش و ارزیابی تقسیم‌بندی شدند که به ترتیب برابر با ۱۲۰۳ و ۵۰۰ داده است.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، به منظور تخمین سرعت موضعی در مجاری مثلثی

جدول ۲ - نتایج مدل فازی-عصبی با پارامترهای ورودی مختلف

Table 2. Results of neuro-fuzzy model with different input parameters

Input parameters	Training			Validation		
	R ² (%)	RMSE	MAE	R ² (%)	RMSE	MAE
$\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{H}{T}$	52.15	0.0262	0.0226	44.64	0.0288	0.0245
$\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{H}{T}$ ، S_L ، S_R	52.12	0.0263	0.0226	46.61	0.0280	0.0241
$\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{H}{T}$ ، n_L ، n_R	92.24	0.0106	0.0081	88.19	0.0131	0.0109
$\frac{y}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{H}{T}$ ، S_L ، S_R ، n_L ، n_R	92.18	0.0106	0.0080	88.39	0.013	0.0099

جدول ۳- نتایج مدل فازی - عصبی با توابع عضویت مختلف ورودی و تابع عضویت ثابت خروجی

Table 3. Results of neuro-fuzzy model with different membership functions of input and fixed output membership function

Membership functions	Training			Validation		
	R ² (%)	RMSE	MAE	R ² (%)	RMSE	MAE
Gbellmf	82.90	0.01572	0.0126	80.45	0.01701	0.01260
Gaussmf	82.96	0.01569	0.0196	80.04	0.01718	0.01279
Gauss2mf	82.53	0.01589	0.0214	80.85	0.01683	0.01264
Trimf	80.58	0.01675	0.0293	76.20	0.01874	0.01434
Dsigmf	79.92	0.01703	0.0130	78.66	0.01778	0.01354
Pimf	79.30	0.01729	0.0132	78.28	0.01793	0.01370
Trapmf	81.28	0.01644	0.0126	79.35	0.01748	0.01334
Psigmf	79.92	0.01703	0.0130	78.66	0.01778	0.01354

جدول ۴- نتایج مدل فازی - عصبی با توابع عضویت مختلف ورودی و تابع عضویت خطی خروجی

Table 4. Results of neuro-fuzzy model with different membership functions of inputs and linear output

Membership functions	Training			Validation		
	R ² (%)	RMSE	MAE	R ² (%)	RMSE	MAE
Gbellmf	91.18	0.01123	0.0086	84.33	0.01424	0.01090
Gaussmf	91.85	0.01085	0.0083	87.28	0.01370	0.01069
Gauss2mf	90.23	0.01144	0.0094	79.53	0.01522	0.01132
Trimf	92.18	0.01063	0.0080	88.39	0.01304	0.00990
Dsigmf	90.14	0.01194	0.0093	76.13	0.01869	0.01394
Pimf	89.79	0.01214	0.0093	78.64	0.01814	0.01323
Trapmf	89.97	0.01204	0.0092	82.45	0.01619	0.01213
Psigmf	90.17	0.01191	0.0093	77.63	0.01867	0.01338

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل‌های ANFIS با روش خوشه بندی فازی کاهششی

Table 5. Validation results of ANFIS models using reduction fuzzy clustering method

r	Training			Validation		
	R ² (%)	RMSE	MAE	R ² (%)	RMSE	MAE
0.9	89.97	0.01204	0.00930	86.13	0.01424	0.01092
0.7	87.31	0.01354	0.01050	78.60	0.01790	0.01305
0.5	89.58	0.01227	0.01204	82.67	0.01602	0.01226
0.3	94.14	0.00920	0.00950	49.98	0.03449	0.01790

به‌عنوان یک کاندیدا برای مرکز یک دسته اطلاعات (مجموعه فازی) مورد بررسی قرار می‌دهد. اگر یک نقطه دارای تعداد زیادی نقاط همسایگی باشد، شاخص تراکم بالایی خواهد داشت. پس از محاسبه شاخص تراکم برای هر نقطه، نقطه‌ای که دارای بالاترین شاخص تراکم است، به‌عنوان مرکز اولین خوشه انتخاب می‌شود. فرایند تعیین مرکز خوشه، شعاع تأثیر (r) و دانسیته متناظر آن تا جایی تکرار می‌شود که تعداد مناسبی از مراکز خوشه‌ها تولید شوند. با استفاده از خوشه‌های به‌دست آمده، توابع عضویت متغیرهای ورودی تعیین می‌شود. از ترکیب توابع عضویت متناظر متغیرهای ورودی و ارتباط آن‌ها با متغیر خروجی، قوانین تعریف می‌شوند. نتایج جدول ۵ حاکی از آن است که کاهش r باعث افزایش خطا در نتایج ارزیابی می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، شعاع تأثیر برابر با ۰/۳ تأثیر چشمگیری بر نتایج نهایی مدل داشته

ثابت و خطی مدل‌سازی می‌شود (جدول ۳ و ۴). مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مدل‌های با تابع عضویت خروجی خطی نسبت به مدل‌های با تابع عضویت خروجی ثابت نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. با توجه به جدول ۴، شبکه با تابع عضویت خروجی خطی، تابع عضویت مثلثی در مقایسه با سایر توابع عضویت ورودی، نتیجه مطلوب‌تری دارد. نتایج حاصل از مدل‌های ANFIS با روش خوشه‌بندی فازی کاهششی در جدول ۵ ارائه شده است. روش خوشه‌بندی فازی کاهششی، روشی است برای دسته‌بندی داده‌ها که طی آن مجموعه داده‌ها بر اساس شباهت‌شان، به مجموعه‌ای از خوشه‌ها تبدیل می‌شوند. در انجام خوشه‌بندی این نکته باید مد نظر قرار بگیرد که داده‌های موجود در یک خوشه، حداکثر شباهت را نسبت به هم و حداکثر تفاوت را با داده‌های خوشه‌های دیگر داشته باشند. این روش هر کدام از نقاط داده‌ای را

با توجه به نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده، محل حداکثر سرعت در تمام شرایط جریان، در زیر سطح آزاد است. این موضوع ناشی از این است که سرعت در سطح آزاد سیال به دلیل وجود جریان‌های ثانویه و مقاومت هوا در مقابل حرکت سیال کمتر از سرعت ماکزیمم است. کانتورهای سرعت در مجاری مثلی نشان می‌دهد که خطوط هم سرعت در نزدیکی دیواره‌ها مطابق با هندسه جداره بوده و مقادیر آنها به تدریج با نزدیک شدن به مرکز مجرا، افزایش می‌یابد. با توجه به عدم یکنواختی زبری جداره‌ها و در بعضی حالات تفاوت فاحش آن‌ها، از حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای شیب جانبی و ارتفاع آب، نتیجه گرفته می‌شود که سیستم ANFIS به خوبی توانسته است سرعت موضعی و کانتورهای سرعت را تخمین بزند، که شاهدی بر شبیه‌سازی صحیح الگوی جریان ثانویه در مقاطع متقارن با زبری‌های غیریکنواخت است. مقادیر سرعت بیشینه هر مقطع (V_{max}) در مقابل مقادیر سرعت میانگین مقطع (V_{ave}) در شکل ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه $V_{max}=1.119V_{ave}+0.03189$ بیانگر رابطه خطی بین V_{ave} و V_{max} است.

است. به‌ویژه در مرحله ارزیابی مدل، مقدار R^2 در مقایسه با مقادیر بالاتر شعاع تأثیر، کاهش و مقادیر RMSE و MAE افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای $r=0/3$ ، مدل از دقت قابل قبولی برخوردار نیست. بهترین نتایج مربوط به مدل فازی-عصبی با تابع عضویت ورودی مثلی و خروجی خطی است. بنابراین این مدل به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شده است. ساختار مدل ANFIS نهایی مورد استفاده در این پژوهش دارای هفت متغیر ورودی است که هر کدام دو تابع عضویت مثلی دارد.

در این مطالعه با استفاده از اطلاعات سرعت موضعی که با استفاده از سیستم فازی-عصبی به‌دست آمد، کانتورهای سرعت تعیین شده است. مقادیر تخمینی سرعت موضعی در مقطع TR1-T3-H15 با مقادیر R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۳ دارای نتایج بهتری است. در شکل‌های ۴ و ۵ کانتورهای سرعت شبیه‌سازی شده در مقابل اطلاعات آزمایشگاهی ترسیم شده است. شکل ۴ مربوط به مقطع TR1-T3-H15 است. شکل ۵ کانتورهای سرعت را برای مقطع TR1-T2-H25 با مقادیر R^2 ، RMSE و MAE برابر با ۰/۸۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۱ ارائه می‌دهد که نسبت به مقاطع دیگر دارای بدترین نتیجه است.

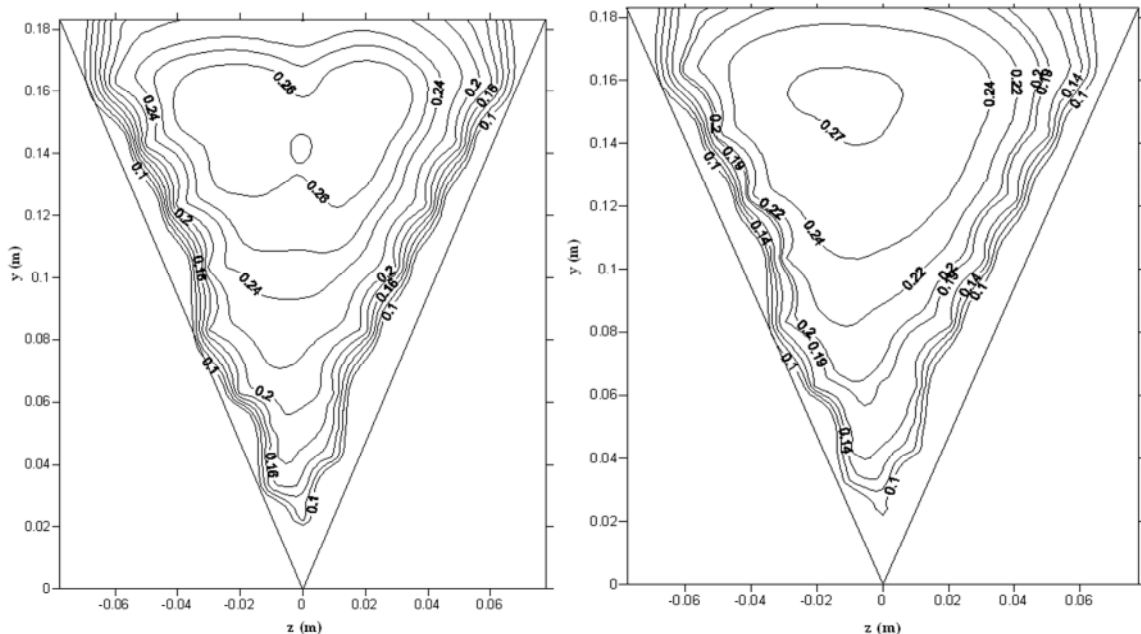


Fig.4. Velocity contours (m/s) for TR1-T3-H15 section using
(a) The experimental data and (b) predicted data

شکل ۴- کانتورهای سرعت (m/s) برای مقطع TR1-T3-H15 با استفاده از

(a) داده‌های آزمایشگاهی و (b) داده‌های تخمینی

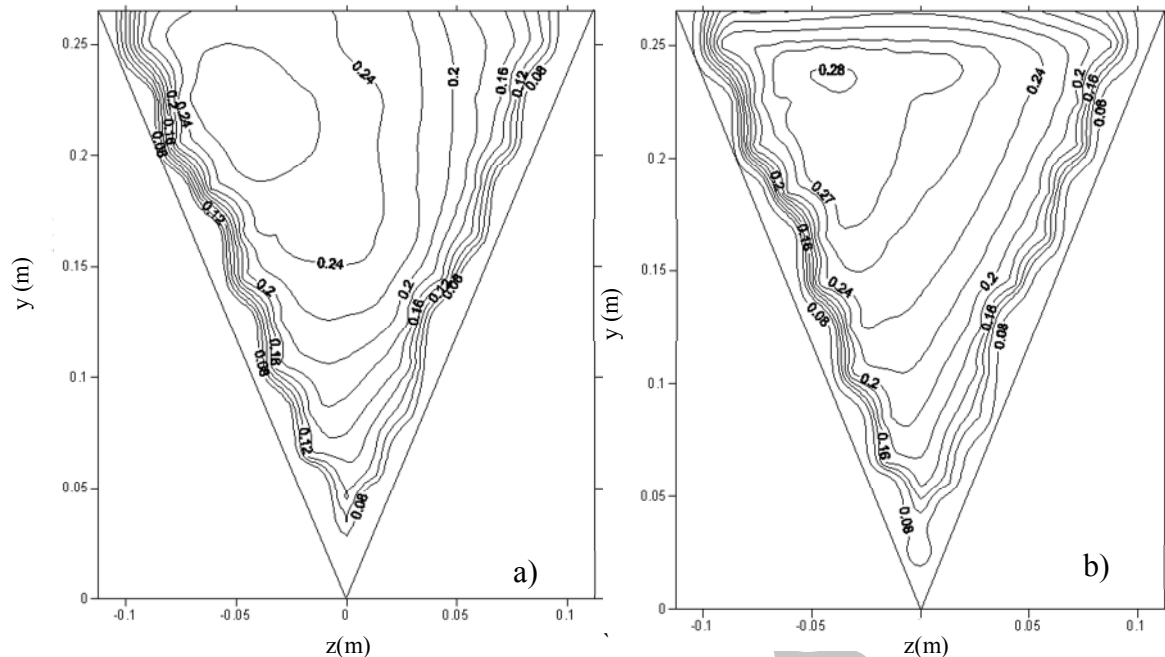


Fig.5. Velocity contours (m/s) for TR1-T2-H25 section using
(a) The experimental data and (b) predicted data

شکل ۵- کانتورهای سرعت (m/s) برای مقطع TR1-T2-H25 با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و (b) داده‌های تخمینی

می‌باشد که نشان‌دهنده این است که ANFIS توانسته است سرعت و دبی جریان عبوری از هر مقطع را با دقت مناسب پیش‌بینی نماید. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات سرعت موضعی که با استفاده از سیستم فازی-عصبی به دست می‌آید، مقادیر سرعت متوسط عمقی نیز تعیین شده است. نتایج مقایسه مقادیر مربوط به سرعت متوسط عمقی حاصل از اطلاعات سرعت موضعی مدل‌های ANFIS و آزمایشگاهی در هر مقطع در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقاطع با زبری مانینگ ۰/۰۰۹ و ۰/۰۲۲۵ (مقطع T1 در شکل ۲) نسبت به مقاطع دیگر دارای تطابق بیشتری با اطلاعات آزمایشگاهی است. مقادیر تخمینی سرعت متوسط عمقی در مقطع TR1-T1-H15 با مقادیر R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۱۷ و ۰/۱۶ درصد دارای بهترین نتایج است. بدترین نتایج مربوط به مقاطع T3 (شکل ۲) است، که جداره‌ها، به علت تعدیل گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره، پروفیل سرعت متوسط عمقی در این مقاطع دارای شیب ملایم‌تری است. در قسمت‌های a و b از شکل ۷ پروفیل‌های سرعت متوسط عمقی شبیه‌سازی شده در مقابل اطلاعات آزمایشگاهی به ترتیب برای آزمایش TR1-T1-H15 (بهترین انطباق) و TR1-T3-H35

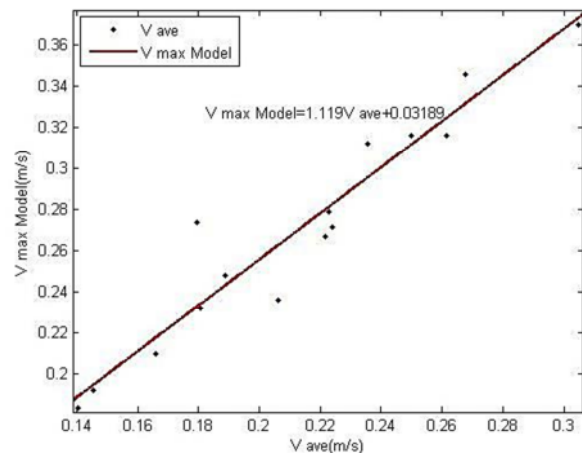


Fig.6. Linear relationship between Vmax and Vave

شکل ۶- رابطه خطی بین V_{ave} و V_{max}

دقت دبی عبوری از مقطع با استفاده از مقادیر سرعت تخمین زده شده به روش ANFIS ارزیابی شد. مقادیر دبی آزمایشگاهی (Q_{obs}) و تخمینی (Q_{model}) در جدول ۶ نشان داده شده است. درصد خطای دبی با استفاده از رابطه $[(Q_{model} - Q_{obs})/Q_{obs}] \times 100$ تعیین می‌شود. مقادیر درصد خطای ارائه شده در جدول ۶ در محدوده ۳/۹۳ و ۳/۵۳- بوده و دارای درصد خطای متوسط ۲/۲۶ درصد

جدول ۷- نتایج مقایسه مقادیر سرعت متوسط عمقی حاصل از اطلاعات سرعت موضعی مدل‌های ANFIS و آزمایشگاهی در هر مقطع

Table 7. Comparing depth-averaged velocity values resulted from local velocity information of ANFIS and experimental models in each section

Expermet	Name	R ² (%)	RMSE	MAE
1	TR1-T1-H15	71.97	0.17	0.16
2	TR1-T1-H25	64.92	0.23	0.21
3	TR1-T1-H35	64.82	0.26	0.24
4	TR1-T2-H15	21.14	0.22	0.22
5	TR1-T2-H25	5.590	0.27	0.26
6	TR1-T2-H35	29.53	0.31	0.29
7	TR1-T3-H15	1.57	0.14	0.13
8	TR1-T3-H25	0.99	0.17	0.16
9	TR1-T3-H35	0.73	0.21	0.19
10	TR2-T1-H15	68.74	0.20	0.19
11	TR2-T1-H25	67.71	0.26	0.24
12	TR2-T2-H15	26.06	0.23	0.22
13	TR2-T2-H25	35.77	0.29	0.28
14	TR2-T3-H15	20.47	0.15	0.14
15	TR2-T3-H25	20.32	0.21	0.19

جدول ۶- نتایج مقادیر دبی آزمایشگاهی و تخمینی برای همه مقاطع بررسی شده

Table 6. Results of laboratory and predicted discharge for all examined sections

Test number	Test name	Q _{obs} (cm ³ /s)	Q _{model} (cm ³ /s)	Error (%)
1	TR1-T1-H15	1.59	1.58	0.75
2	TR1-T1-H25	6.55	6.63	-1.19
3	TR1-T1-H35	12.17	12.25	-0.67
4	TR1-T2-H15	3.10	3.18	-2.63
5	TR1-T2-H25	6.79	6.93	-2.03
6	TR1-T2-H35	15.41	14.96	2.92
7	TR1-T3-H15	1.47	1.52	-3.53
8	TR1-T3-H25	5.14	5.23	-1.73
9	TR1-T3-H35	11.16	10.72	3.93
10	TR2-T1-H15	1.89	1.92	-1.66
11	TR2-T1-H25	8.18	8.03	1.90
12	TR2-T2-H15	2.53	2.59	-2.14
13	TR2-T2-H25	9.00	8.70	3.28
14	TR2-T3-H15	1.65	1.70	-2.64
15	TR2-T3-H25	6.32	6.13	2.91

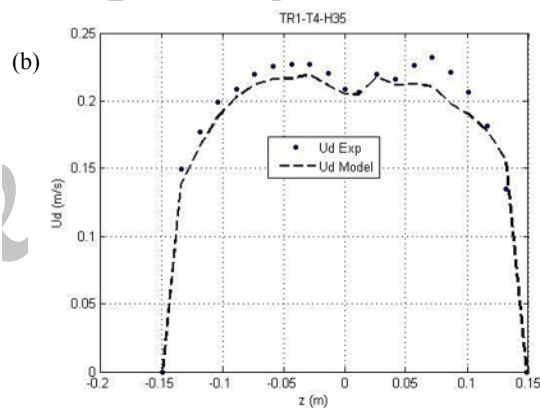
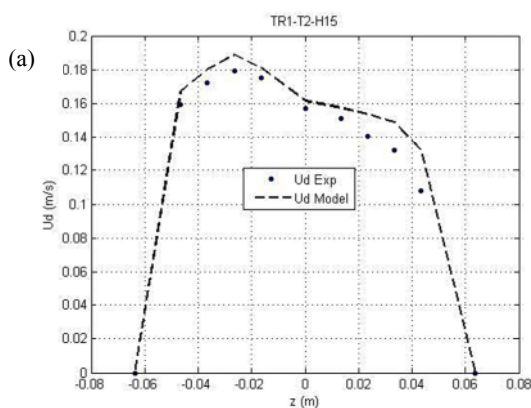


Fig 7. Depth- averaged velocity profile of the sections based on experimental data and predicted values (a) TR1-T1-H15, (b) TR1-T3-H35

شکل ۷- پروفیل سرعت متوسط عمقی مربوط به مقاطع بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی و مقادیر تخمینی

TR1-T3-H35 (b) TR1-T1-H15 (a)

به‌ویژه در مجاری مثلی روباز به خوبی شرح دهد و یا شبیه‌سازی کند، وجود ندارد. در این پژوهش یک مدل فازی-عصبی به‌منظور تخمین سرعت متوسط عمقی در جریان مجاری باز مثلی ارائه شد. مدل ANFIS ارائه شده در این پژوهش، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در فلوم آزمایشگاهی آموزش داده شدند. مدل فازی-عصبی استفاده شده در این پژوهش، شامل هفت پارامتر ورودی $\frac{\mu(y,z)}{\sqrt{gH}}$ ، n_{Left} ، S_{Right} ، S_{Left} ، $\frac{H}{T}$ ، $\frac{z}{T}$ ، $\frac{y}{T}$ بود که به روش افزاز شبکه‌ای با تابع عضویت خروجی خطی، تابع

(بدترین انطباق) نشان داده شده است. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی در آنها جداره‌های سمت راست و چپ، دارای ضریب زبری مانینگ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۲۲۵ و ۰/۰۱۷۸ می‌باشند. با زبر شدن با مقادیر تخمینی نشان‌دهنده انطباق خوب بین اطلاعات آزمایشگاهی و مدل ANFIS است.

۴- نتیجه‌گیری

به‌علت پیچیدگی و غیرخطی بودن پروفیل‌های سرعت در جریان کانال‌های باز، هیچ رابطه یا تابع ساده‌ای که بتواند پروفیل‌ها را

بر مبنای اطلاعات سرعت تخمین زده شده توسط مدل با دقت زیادی منطبق بر مقادیر آزمایشگاهی است. رهیافت جدید ارائه شده را می توان در جریان کانال های باز، با زبری های متفاوت و با هندسه های مختلف تعمیم داد.

عضویت مثلثی است. نتایج نشان دادند که روش فازی-عصبی در راستای شبیه سازی پروفیل های سرعت در کانال های مثلثی باز، دارای تطابق بالایی با اطلاعات آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر دبی و پروفیل های سرعت متوسط عمقی محاسبه شده

References

- Aly, A.M.M., Trupp, A.C. & Gerrard, A.D., 1978, "Measurements and prediction of fully developed turbulent flow in an equilateral triangular duct", *J. Fluid. Mech.*, 85, (1), Pp 57-83.
- Bandopadhyay, P. C. & Hinwood, J. B., 1973, "On the coexistence of laminar and turbulent flow in a narrow triangular duct", *J. Fluid Mech.*, 59, 775.
- Bogle, G. V., 1997, "Stream velocity profiles and longitudinal dispersion", *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(9), 816-820.
- Huang, J., Weber, L. J., & Lai, Y.G., 2002, "Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 268-280.
- Cope, R.C. & Hanks, R. W., 1972, "Transitional flow in isosceles transitional ducts", *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 1, 105-117.
- Cremers, C.J. & Eckert, E.R.G., 1962, "Hot wire measurements of turbulence correlations in a triangular duct", *J. Appl. Mech. Trans.*, 29, 609-614.
- Chang, F. J. & Chang, Y. T., 2006, "Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir", *Advances in Water Resources*, 29, 1-10.
- Coleman, N.L., 1986, "Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution", *Water Resources Research*, 22(10), 1377-1384.
- Chiu, C.L. & Tung, N.C., 2002, "Maximum velocity and regularities in open-channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(4), 390-398.
- Chiu, S.L., 1994, "Fuzzy model identification based on cluster estimation", *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 2, 267-278.
- Givehchi, M., 2009, "Estimation of depth- averaged velocity and boundary shear stress in an open channel and their use in estimating the longitudinal diffusion coefficient", PhD Thesis, University of Mashhad, Iran. (In Persian)
- Knight, D.W., Omran, M. & Tang, X., 2007, "Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 39-47.
- Lane, E.W., 1953, "Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation", *Am. Soc. Civil Engineers*, 79 (280), 1-30
- Maghrebi, M. F., & Givehchi, M., 2010, "Estimating of the depth-averaged velocity and shear stress in triangular open channel", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 21 No. 2 (74), 71-80. (In Persian)
- Sarma, K.V.N., Lakshminarayan, P., & Rao, N.S.L., 1983, "Velocity distribution in smooth rectangular open channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), 270-289.
- Sooky, A.A., 1969, "Longitudinal dispersion in open channels", *J. Hydr. Div., Am. Soc. Civil Eng.*, 95(4), 1327-1346.

- Teshnehlab, M., Saffarpour, N., & Afyouni, D., 2008, *Fuzzy control & fuzzy systems*, Translate (written by Wong, L.), 2nd Ed., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Waldon, M. G., 2004, "Estimation of average stream velocity", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(11), 1119-1122.
- Wark, J. B., Samuels, P. G. & Ervine, D. A., 1990, "A practical method of estimating velocity and discharge in a compound channel", White, W. R. (Ed.), *River flood hydraulics*, Wiley, New York.
- Wolpert, D.H., 1992, "Stacked generalization", *Neural Networks*, 5 (2), 241-259.
- Haykin, S., 1999, *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd Edition, Prentice-Hall, N.Y.
- Jang, J. -S. R., 1993, "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, 23(3), 665-685.
- Jeon, J., 2007, "Fuzzy and neural network models for analyses of piles", PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, North Carolina.
- Rumelhart, D.E., & McClelland, J. L., 1986, *Parallel distributed processing*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Yang, H.C. & Chang, F.J., 2005, "Modeling combined open channel flow by artificial neural networks", *Journal of Hydrol. Process*, 19, 3747-3762.