تخمین کانتورهای سرعت در کانال مثلثی 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

(دریافت ۹٤/٥/۱۳ پذیرش ۹۵/۳/۱۷)

چکیدہ

کانالهای مثلثی 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 به طور دقیق کانتورهای سرعت را تخمین بزند. در این پژوهش رهیافتی کارآمد بهمنظور مدل سازی کانتورهای سرعت در کانالهای مثلثی روباز با توزیع زبری غیر یکنواخت، با استفاده از سیستم هندسی و توزیع زبری غیر یکنواخت، با استفاده و ارزیابی مدل از اطلاعات آزمایشگاهی شامل ۱۷۰۳ داده در مجاری مثلثی با تقارن هندسی و توزیع زبری غیر یکنواخت استفاده شد. مقایسه نتایچ آزمایشگاهی با مقادیر تخمینی توسط مدل نشان میدهد که مدل مدلسی و توزیع زبری غیر یکنواخت استفاده شد. مقایسه نتایچ آزمایشگاهی با مقادیر تخمینی توسط مدل نشان میدهد که مدل مدهندسی و توزیع زبری غیر یکنواخت استفاده شد. مقایسه نتایچ آزمایشگاهی با مقادیر مهداست و ارزیابی مستقل نشان میده ANFIS، قابلیت کاربرد در شبیه سازی سرعت موضعی و تعیین کانتورهای سرعت را به خوبی داراست و ارزیابی مستقل نشان میده که مقادیر دبی و سرعت متوسط عمقی محاسبه شده از اطلاعات مدل، با دقت زیادی منطبق بر مقادیر آزمایشگاهی است.

واژههای کلیدی: کانال مثلثی، کانتور سرعت، سرعت متوسط عمقی، سیستم تطبیقی استنتاج فازی– عصبی

۱ – مقدمه

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 زیست محیطی و تخمین دبی مورد استفاده قرار می گیرد (2007) Bogle 1997; Knight et al. 2007). توزیع سرعت جریان در مجاری باز، پیچیده و سه بعدی است و به دست آوردن رابطه ای کلی که بیانگر توزیع سرعت جریان در کانال هایی 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).

نتایج پژوهش دیگری در تخمین دبی نشان داده است که توزیع سرعت، متاثر از عوامل زیادی از جمله جریان های ثانویه، هندسه مقطع، خصوصیات هیدرولیکی و شیمیایی سیال است (Wark et al. 1990).

(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 مدل سازی پروفیل سرعت در مجاری مستطیلی ارائه شده است (Sarma et al. 1983). معادله توزیع سرعت میتواند توسط مفاهیم آنتروپی با تابع چگالی احتمال مناسب به دست آید & Chiu) مفاهیم آنتروپی با تابع چگالی احتمال مناسب به دست آید گه (Chiu مفاهیم آنتروپی با تابع چگالی احتمال مناسب به دست آید گه ایر) معاهیم آنتروپی با تابع چگالی احتمال مناسب به دست آید گه مای مستطیلی باز، شبیه سازی شده است. نتایج نشان داده که شبکه های عصبی مصنوعی به خوبی می تواند پروفیل های سرعت را مدل سازی نماید (Yang & Chang 2005).

کانالهای مثلثی شکل غالباً بهعنوان مقاطع متعارف در مجاری هدایت آبهای سطحی با دبی کم مطرح میشوند. در درهای عمیق

۴۷ هجله آب و فاضالب

www.SID.ir

V شکل با بستر مقاوم عملاً رودخانه دارای شکلی مثلثی خواهد بود. بررسی شرایط جریان در ایـن مقـاطع از اهمیـت ویـژهای برخـوردار است. بررسی منـابع علمی نشـان داد کـه اطلاعـات کمی در مـورد توزیع سرعت در این مقاطع وجود دارد.

در پژوهش های مختلف وضعیت کانتورهای سرعت در داکتهای مثلثی در اعداد رینول دز مختلف بررسی شده است. نتایجی در رابطه با بررسی جریانهای ثانویه در داکتهای مثلثی و توزیع سلول های جریانهای ثانویه نیز ارائه شده است اما در کلیه موارد، مقطع مثلثی بسته که بیشتر در مجاری عرضی عبوری از زیر (ماها استفاده می شود، مورد تحقیق قرار گرفته است ا. (Aly et al. ست است ا. (ماها استفاده می شود، مورد تحقیق قرار گرفته است ا. (ماها استفاده می شود، مورد تحقیق قرار گرفته است ا. (ماه 4 استفاده می شود، مورد تحقیق قرار گرفته است ا. (ماه 2003)

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 غیریکنواخت انجام شده است Sooky 1969; Lane). 1953; Maghrebi & Givehchi 2010)

در اغلب پژوهش ها توزیع زبری بر روی جدار، کانال یکسان در نظر گرفته می شود. اما در عمل به دلایل مختلف از جمله فرسایش و رسوبگذاری ممکن است توزیع غیر یکنواخت زبری در دو جدار، 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 ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات تخمینی دبی و همچنین توزیع سرعت متوسط عمقی که کاربرد فراوان به ویژه در تخمین ضریب توزیع آلودگی دارد، محاسبه می شود. این مدل در کانالهای منشوری شکل و با هندسه های متداول و توزیع زبری های مختلف قابل استفاده است.

۲ – روش کار ۲ – ۱ – اطلاعات آزمایشگاهی دادههای این پژوهش، از مطالعات آزمایشگاهی قبلی نویسنده جمع آوری شده است (Givehchi 2009)، در آن پژوهش

دوره ۲۸ شماره ۶ سال ۱۳۹٦

آزمایشهایی بهمنظور 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 سرعت سنج مدل Low Speed Probe با دقت ۱ در صد 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 عمقي معين توسط مولينه برداشت شد. سرعت آب در فاصله ۱/۶ 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 آزمایش ها مد نظر قرار گرفت. دومین و سومین نوع زبری، مربوط به دانههای شن به تر تیب 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

 $n = \frac{AR_{h}^{\frac{2}{3}}S_{0}^{\frac{1}{2}}}{Q}$

که در آن

A سطح مقطع جریان، Q دبی، S⁰ شیب کانال و R 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 ۲۰۰۹، ۱۱۸۸ و ۲۰۲۲/۰ 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 و۵۳/۱۳ درجه با شیب جانبی s (۱:s) به تر تیب برابر با ۴۲/۰ و ۱/۰۵ است. سه نوع زبری در این مقاطع در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ انواع

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 نام های درنظر گرفته شده برای هندسه و الگوی زبری و ارتفاع آب رأس مثلث در آزمایش است.

۲-۲- سیستم تطبیقی استنتاج فازی-عصبی

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

این سیستم پیاده سازی یک سیستم فازی سوگنو به صورت ساختار شبکه ای پیش رونده است. مدل های فازی – عصبی که در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت، منطق فازی را با شبکه های عصبی مصنوعی ترکیب می نماید (Jang 1993). علت اصلی ترکیب سیستم های فازی با شبکه های عصبی مصنوعی، استفاده از قابلیت یادگیری شبکه های 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.

ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گر،های متصل به هم است که به طور مستقیم به هم مرتبط شده اند و در آن هر گره یک واحد پردازشگر محسوب می شود. با استفاده از این شبکه، مشکل اصلی استفاده از سیستم استنتاج فازی که بهینه سازی پارامترهای مورد استفاده در مدل بود، رفع می شود. بخشی از این گرها تطبیقی هستند، به این معنی که خروجی شان به پارامترهای وابسته به این گرها بستگی دارد. گرهای مربعی، گره تطبیقی شامل تابع بوده و گرهای دایره ای گرهای ثابتی هستند که هیچ تابعی بر روی آنها اعمال نمی شود (شکل ۳). به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی، این پارامترها مطابق با داده ای آموزشی و بر اساس فرایند یادگیری بهنگام می شوند.

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



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



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

توزیع های مختلف زبری برای هر یک از اشکال شکل ۱ نشان داده شده است. مقطع TR1، با سه ارتفاع آب ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی متر و مقطع TR2 با دو ارتفاع آب ۱۵ و ۲۵ سانتی متر در هر یک از توزیع های زبری نشان داده شده در شکل ۲، مورد آزمایش قرار گرفتند. شیب طولی کانال در همه آزمایش ها ۲۰۰۶/۰۰ بود. در این تحقیق ۱۵ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. نام و مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول H ارتفاع آب در رأاس مثلث، Q دبی اندازه گیری شده

جدول ۱ – نام، مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایشها Table 1. Name, Geometry and hydraulic parameters of experiments

r r · · · ·							
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	



Fig. 3. Architecture of ANFIS model based on Takagy- 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

کاهشی 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 کاهشی، 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)

۲–۳– 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، _LS و_RS بهترتیب شیب وجوه چپ و راست مقطع، g شتاب ثقل، _Ln، _R، _n بهترتیب ضریب زبری مانینگ در جدارههای چپ و راست مقطع، _S شیب طولی کانال و وضعیت سلولهای جریان ثانویه می باشند. اثر جریانهای ثانویه در اطلاعات سرعت آزمایشگاهی وجود دارد. با صرف نظر کردن شیب کانال به دلیل عدم تغییر آن در آزمایش های انجام شده، می توان

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

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

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

 $^{^{1}\}pi$ Buckingham

برای احتراز از چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان کردن ارزش داده ها برای شبکه، عمل استاندار دسازی صورت میگیرد. لذا داده ها با استفاده از معادله ۴ بین دو عدد ۰/۱ و ۰/۹ استاندار د می شوند

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

که در این معادله، x_i مقدار استاندارد شده، x مقدار واقعی و x_{min} و x_{max} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر داده ها 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 می شود، استفاده شد

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (f_{i_{observed}} - f_{i_{predicted}})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (f_{i_{observed}} - f_{i_{observed}})^{2}}$$
 (Δ)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| f_{observed} - f_{predicted} \right|$$
 (%)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (f_{observed} - f_{predicted})^2}$$
(Y)

fi_{observed} مقدار مشاهده شده که در این معادلات. fi_{predicted} مقدار پیش بینی شده و N تعداد داده ها است. fi_{observed} میانگین مشاهده شده داده مورد نظر است.

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

۳- نتایج و بحث در این پژوهش، بهمنظور تخمین سرعت موضعی در مجاری مثلثی

روباز، از پارامترهای $\frac{y}{T}$ ، $\frac{y}{T}$ ، $\frac{n_R}{T}$ و n_R و n_R به عنوان دادهای ورودی شبکه استفاده شد. در جدول ۲ نتایج مدل فازی-عصبی با پارامترهای ورودی مختلف نشان داده شده است. بررسی مـدلهـا و یاسخهای بهدست آمده، نشان داد که استفاده از سه یارامتر ورودی y ، $\frac{1}{T}e^{\frac{1}{2}}$ در راستای تخمین $\frac{u(y,z)}{\sqrt{eH}}$ نتایج ضعیفی را ارائه میده. در . این حالت نتایج قسمت ارزیابی برابر با ضریب همبستگی ۴۴/۶۴ درصد، جذر میانگین مجذورات خط ۲۸۸ / ۰ و میانگین خطای مطلق ۰۲۴۵ است. ایسن در حسالی است که اضافه کردن پارامترهای n_L و n_R یا S_L و S_R بهعنوان اطلاعات ورودی بهمراتب 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 RMSE ،R²(%) و MAE حاصل از مدلسازی شبکه با استفاده از یارامترهای نسبت ابعاد و زبری جدار،های کانال، بهترتیب برابر با ۸۸/۱۹ ، ۱۳۱۰/۰۱ و ۰/۰۱۰۹ درصد به دست می آید. همچنین ترکیب پارامترهای نسبت ابعاد، زبری و شیب جدارهها با یکدیگر باعث بهبود نتایج می شود. 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 ضريب همبستگی، جذر ميانگين مجذورات خطا و ميانگين خطاي مطلق حاصل از مدل سازی با استفاده از هفت پارامتر ورودی بهترتیب 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 افراز شبکهای و روش خوشهبندی فازی کاهشی است. در روش افراز شبکهای، تابع عضویت بخش نتیجه به دو صورت

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
$\frac{y}{T} \cdot \frac{z}{T} \cdot \frac{H}{T} S_L$, S _R	52.12	0.0263	0.0226	46.61	0.0280	0.0241
$\frac{y}{T} \cdot \frac{z}{T} \cdot \frac{H}{T} \cdot n_L$, n_R	92.24	0.0106	0.0081	88.19	0.0131	0.0109
$\frac{y}{T} \cdot \frac{z}{T} \cdot \frac{H}{T} \mathcal{S}_L \mathcal{S}_R \mathcal{N}_L, n_R$	92.18	0.0106	0.0080	88.39	0.013	0.0099

Mamhanahin	Tustatas	Validation
	membership function	
Table 3. Results of n	neuro-fuzzy model with different member	ship functions of input and fixed output
بت حروجی	ی با توابع عصویت مختلف ورودی و تابع عصویت تا	جدول ۱ - تتایج مدل قاری عصبه

Membership	Training			Validation			
functions	$R^{2}(\%)$	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

|--|

Membership	Training			Validation		
functions	$R^{2}(\%)$	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 کاهشی **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 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 ۳/۰ تأثیر چشمگیری بر نتایج نهایی مدل داشته

ثابت و خطی مدلسازی می شود (جداول ۳ و ۴). مقایسه نتایج ارائه شده در جداول ۳ و ۴ نشان می ده د که مدل های با تابع عضویت خروجی خطی نسبت به مدل های با تابع عضویت خروجی ثابت نتایج بهتری را ارائه می دهد. با توجه به جدول ۴، شبکه با تابع عضویت خروجی خطی، تابع عضویت مثلثی در مقایسه با سایر توابع عضویت ورودی، نتیجه مطلوب تری دارد. نتایج حاصل از مدل های ANFIS با روش خوشه بندی فازی کاهشی در جدول ۵ ارائه شده است. روش خوشه بندی فازی کاهشی، روشی است برای مجموعه ای از خوشه ها تبدیل می شوند. در انجام خوشه بندی این نکته باید مد نظر قرار بگیرد که داده های موجود در یک خوشه، حداکثر شباهت را نسبت به هم و حداکثر تفاوت را با داده های را

است. بهویژه در مرحله ارزیابی مدل، مقدار ^R در مقایسه با مقادیر بالاتر شعاع تأثیر، کاهش و مقادیر RMSE و MAE افزایش یافته است. نتایج نشان میدهد که به ازای ۲۰۰۳ مدل از دقت قابل قبولی برخوردار نیست. بهترین نتایج مربوط به مدل فازی – عصبی با تابع عضویت ورودی مثلثی 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 مثلثی دارد.

در این مطالعه با استفاده از اطلاعات سرعت موضعی که با استفاده از سیستم فازی – عصبی به دست آمد، کانتورهای سرعت TR1- تعیین شده است. مقادیر تخمینی سرعت موضعی در مقطع -۳ ۹۵/۲۱ با مقادیر RMSE ،R² و MAE به ترتیب برابر با ۳۵/۲۱ ۹ /۰۱۶ و ۲۰/۱۷ دارای نتایج بهتری است. در شکلهای ۶ و کانتورهای سرعت شبیه سازی شده در مقابل اطلاعات آزمایشگاهی کانتورهای سرعت شبیه سازی شده در مقابل اطلاعات آزمایشگاهی ترسیم شده است. شکل ۴ مربوط به مقطع TR1-T3-H15 است. شکل ۵ کانتورهای سرعت را برای مقطع RMSE با مقادیر شکل ۵ کانتورهای سرعت را برای مقطع RMSE با مقادیر RMSE ، R² می دهد که نسبت به مقاطع دیگر دارای بدترین نتیجه است.

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 بهدلیل وجود جریان های ثانویه و مقاومت هوا در مقابل حرکت سیال کمتر از سرعت ماکزیمم است. کانتورهای سرعت در مجاری مثلثي نشان ميدهد كه خطوط هم سرعت در نزديكي ديوارهها مطابق با هندسه جداره بوده و مقادیر آنها به تدریج با نزدیک شدن به مرکز مجرا، افزایش می یابد. با توجه به عدم یکنواختی زبری جدارهها و در بعضی حالات تفاوت فاحش آن ها، از حالت های مختلف در نظر گرفته شده برای شیب جانبی و ارتفاع آب، نتیجه گرفته می شود که سیستم ANFIS به خوبی توانسته است سرعت موضعی و کانتورهای سرعت را تخمین بزند، که شاهدی بر شبیه سازی صحیح الگوی جریان ثانویه در مقاطع متقارن با زبریهای غیریکنواخت است. مقادیر سرعت بیشینه هر مقطع ${\cal P}$ در مقابل مقادیر سرعت میانگین مقطع (V_{ave}) در شکل (V_{max}) نمایش داده شده است. نتایج نشان میدهد که رابطه V_{ave} و V_{max} بيانگر رابطه خطی بين V_{max}=1.119V_{ave}+0.03189



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

a) دادههای آزمایشگاهی و b) دادههای تخمینی

V ave

V max Model

V max Model=1.119V ave+0.03189

0.22

Fig.6. Linear relationship between Vmax and Vave

شکل ۶- رابطه خطی بین Vmax و Vave

دقت دبی عبوری از مقطع با استفاده از مقادیر سرعت تخمین زده

شده به روش ANFIS ارزیابی شد. مقادیر دبی آزمایشگاهی (Qobs)

و تخمینی (Q_{model}) در جدول ۶ نشان داده شده است. درصد خطای

دبسي با استفاده از رابط 100×[(Q_{model} -Q_{obs})/Q_{obs}] تعيين

می شود. مقادیر درصد خطای ارائه شده در جدول ۶ در محدوده

V ave(m/s

0.24

0.26

0.28

0.36

0.34

0.32

0.3 0.3 0.28

e 0.26

0.24

0.22

0.2

0.14

0.16

0.18

0.2

مىباشد كه نشاندهنده اين است كه 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 فاری – عصبی بهدست می آید، مقادیر سرعت متوسط عمقی نیز تعیین شده است. نتایج مقایسه مقادیر مربوط به سرعت متوسط عمقي حاصل از اطلاعات سرعت موضعي مدلهاي ANFIS و آزمایشگاهی در هر مقطع در جدول ۷ ارائه شده است. نتايج نشان ميدهند كه مقاطع با زبري مانينـگ ۲۰۹/۰و 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 RMSE ،R² و MAE به ترتیب برابر با ۷۱/۹۷، ۱۷/۱۷ و ۱۶/۰ درصد دارای بهترین نتایج است. بدترین نتایج مربوط به مقاطع T3 (شکل ۲) است، که جدار،ها، به علت تعدیل گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره، یروفیل سرعت متوسط عمقي در اين مقاطع داراي شيب ملايم تري است. در قسمتهای a و b از شکل ۷ پروفیل های سرعت متوسط عمقی شبيهسازي شده در مقابل اطلاعات آزمايشگاهي بهترتيب براي آزمايش TR1-T1-H15 (بهترين انطباق) و TR1-T3-H35

۳/۹۳ و ۳/۵۳– بوده و دارای درصد خطای متوسط ۲/۲۶ درصد

دوره ۲۸ شماره ۶ سال ۱۳۹۲

مجله آب و فاضلاب ۵۴

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

Expermiet	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

TR1-T2-H15

Ud Exp

Ud Mode

0.02 0.04 0.06

0.3

0.18

0.16

0.12

0.1

0.06

0.02

-0.08 -0.06

-0.04 -0.02

(s/m) pn

(a)

 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 مثلثی روباز به خوبی شرح دهد و یا شبیهسازی کند، وجود ندارد. در این پژوهش یک مدل فازی-عصبی به منظور تخمین سرعت متوسط عمقی در جریان مجاری باز مثلثی ارائه شد. مدل ANFIS ارائه شده در این پژوهش، با استفاده از داده های اندازه گیری شده در فلوم آزمایشگاهی آموزش داده شدند. مدل فازی- عصبی استفاده شده در این پژوهش، شامل هفت پارامتر فازی- عصبی استفاده شده در این پژوهش، شامل هفت پارامتر ورودی $\frac{y}{\sqrt{gH}}$, S_{Right} , S_{Left} , $\frac{H}{T}$, $\frac{z}{7}$, $\frac{y}{\sqrt{gH}}$ بود که به روش افراز 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 ۱۷۸/۰میباشند. 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 ارائـه با هندسههای مختلف تعمیم داد.

عضویت مثلثی است. نتایج نشان دادند که روش فازی- عصبی در راستای شبیهسازی پروفیل های سرعت در کانالهای مثلثـی بـاز، دارای تطابق بالایی با اطلاعات آزمایشگاهی است. همچنین 🦳 شده را میتوان در جریان کانالهای باز، با زبریهای متفاوت و مقادیر دبی و پروفیل های سرعت متوسط عمقبی 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.
- Bandopadhayay, 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 Hydaulic 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 isocceles transitional ducts", Ind. Eng. Chem. Fund,1, 105-117.
- Cremers, C.J. & Eckert, E.R.G., 1962, "Hot wire measurments 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 estimatin 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 Hydaulic 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., Lakshminaraynan, 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 Hydaulic 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.