توزیع سرعت و برآورد دبی در کانال‌های فاضلاب براساس مفهوم آنتروپی شانون

مرجان معظم‌نیا[1] حسین بنکداری[2]

(دریافت ۹۱/۶/۱۲ پذیرش ۹۱/۱۲/۱۵)

چکیده

در هیدرولیک، توزیع سرعت به‌عنوان یک پارامتر کلیدی برای تعیین مشخصات جریان مانند دبی، توزیع تنش برشی، رسوبگذاری، فرسایش، تلفات هد، ضریب انرژی و ضریب مومنتوم مورد نیاز است. بنابراین محاسبه سرعت جریان، یکی از نکات مهم طراحی کانال‌های فاضلاب است. جریان در شبکه‌های فاضلاب، برای هر سطح مقطعی، جریان سه بعدی آشفته با سطح آزاد است. مفهوم آنتروپی بر اساس قوانین توزیع احتمال توسط چیو این امکان را می‌دهد که برای برآورد توزیع سرعت و دبی در سطح مقطع، یک معادله ساده ایجاد شود. این روش برای مطالعه میدان سرعت در کانال فاضلاب مرکب تنگ به‌کار گرفته شد. میدان توزیع سرعت در شرایط مختلف هیدرولیکی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. صحت سنجی روش و معادله توزیع سرعت و دبی توسط مقایسه نتایج برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاههای کانال‌های فاضلابرو واقعی انجام شد. آنالیز میدان سرعت بر اساس مفهوم احتمال، این امکان را به‌وجود می‌آورد که توزیع سرعت و دبی مقطع برای هر سطح مقطع دلخواهی برآورد شود که در کانال‌های واقعی فاضلاب بسیار حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی، توزیع سرعت، دبی، کانال تنگ

Velocity Distribution and Estimation of Discharge in Sewers By Shannon Entropy Concept

M. Moazamnia [1] *H. Bonakdari [2]*

(Received Sep. 2, 2012 Accepted March 5, 2013)

Abstract

In hydraulic, velocity distribution as a key parameter for determining the flow profile, such as flow, shear stress distribution, sedimentation, erosion, loss of head, the coefficient of energy and momentum coefficient is needed, so the calculation of flow velocity is an important part of sewers design. The flow in a sewer, regardless of its geometry, is three-dimensional turbulent free surface flow. The introducing of the entropy based on probability in hydraulic by Chiu gives the possibility to develop a simple equation to evaluate the velocity and the discharge in the cross section. The method was applied to a study of velocity field of flow in narrow compound sewer. The primary flow distribution was investigated under various hydraulic conditions. The validation of the method and velocity distribution and discharge was carried out by comparing the estimated results with the measured findings at the field sites. Analysis of velocity distribution based on the probability concept has made it possible to determine the cross-sectional primary velocity distribution and discharge without having to deal with the geometrical shape of cross sections, which tend to be extremely complex in real sewers.

Keywords: Entropy, Velocity Distribution, Discharge, Narrow Channel.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه رازی کرمانشاه
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه (نویسنده مسئول)
bonakdari@yahoo.com (۰۲۱) ۸۱۶۰۶۴۰۰

1. M.Sc. Student, Dept. of Civil Eng., University of Razi, Kermanshah
2. Assoc. prof., Dept. of Civil Eng., University of Razi, Kermanshah
(Corresponding Author) (+98 21) 81606400 bonakdari@yahoo.com

۱- مقدمه

توزیع سرعت یکی از مهم‌ترین مباحث در مطالعات جریان‌های کانال‌های روباز است، زیرا برای سرعت متوسط و بیشینه و برآورد دبی و ارزیابی تنش برشی روی جداره‌ها، انتقال غلظت رسوب، انتقال آلودگی و مقاومت جریان مورد نیاز است. لذا پروفیل سرعت طولی جریان درون مقطع عرضی از یک کانال، سالها مورد تحقیق پژوهشگران مختلف بوده است. در کانال‌های روباز طبیعی و مجاری رودخانه‌ها، سرعت از صفر در کف کانال به مقدار بیشینه در سطح آب به‌طور سریع افزایش می‌یابد و می‌تواند به‌صورت تقریباً یک بعدی در نظر گرفته شود. برای کانال‌هایی که عریض نیستند، در کنار تغییرات در جهت قائم، سرعت در جهت عرضی نیز تغییر می‌کند، بنابراین توزیع سرعت، دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. در چنین حالتی، سرعت از صفر در مرز کانال به مقدار بیشینه در رو یا زیر سطح آب نزدیک مرکز کانال افزایش می‌یابد. پدیده‌ای که در آن سرعت به مقدار بیشینه زیر سطح آب می‌رسد، پدیده دیپ نام دارد.

اطلاعات مفهوم آنتروپی توسط شانون در سال ۱۹۴۸ توسعه یافته است؛ و اصل این است که یک سیستم متعادل تحت محدودیتهای ثابت، تمایل به بیشینه‌سازی آنتروپی دارد که توسط جینز پیشنهاد شده است و به‌طور گسترده برای پیش‌بینی توزیع‌های احتمال، طیف وسیعی از پارامترهای مورد مطالعه در جریان کانال باز مورد استفاده قرار گرفته است. شانون یک اندازه‌گیری کمّی از عدم قطعیت همراه با یک توزیع احتمال از متغیر تصادفی در ترم‌های آنتروپی تعریف می‌کند. آنتروپی شانون، H نامیده می‌شود و به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)\log p(x)dx \qquad (۱)$$

که p(x) تابع چگالی احتمال پیوسته از متغیر تصادفی x است[۱]. در کانال‌های فاضلابرو، مقطع عرضی به‌طور معمول شامل یک کانال اصلی است که جریان‌های پایین را انتقال می‌دهد و توسط یک یا دو جداره یا گذرگاه‌ها، جریان را در سطح بالای فاضلاب عبور می‌دهد. گذرگاه، یک دسترسی آسان به کانال فاضلابرو طی عملیات سیستم برای نظارت یا تصفیه است. تعدادی از کارهای آزمایشگاهی برای کانال‌های مرکب انجام شده است [۲ و ۳]. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که در مقاطع مرکب، خصوصیت سه بعدی ساختار جریان بسیار پیچیده‌تر از کانال‌های مستطیلی است اما مکانیسم آن ممکن است یکسان باشد. شیونو و فنگ در سال ۲۰۰۳ یک توزیع سرعت را معرفی کرده‌اند که اثرات شیب دائمی کانال و جریان ثانویه را نشان می‌دهد و سرعت بیشینه آن در ۰/۵ تا ۰/۷ ارتفاع سطح آب رخ داده است [۴ و ۵].

کاربرد مفهوم آنتروپی در هیدرولیک، توسط چیو در سالهای ۱۹۸۷،۱۹۸۸،۱۹۹۱ پیشنهاد شده و امکان توسعه یک روش ساده برای نتیجه گرفتن یک معادله توزیع سرعت با استفاده از مفهوم احتمال و اصل بیشینه‌سازی آنتروپی ارائه شده است. این روش قادر به توصیف تغییرات سرعت در جهت قائم و عرضی با سرعت بیشینه در رو یا زیر سطح آزاد است. مطالعات گذشته، محدودیت‌ها در بازتاب توزیع سرعت در کانال‌هایی با نسبت عرض به عمق کمتر از پنج را نشان می‌دهد. این مطالعه به بررسی برآورد توزیع سرعت و محاسبه دبی توسط مفهوم احتمال آنتروپی و سرعت بیشینه در هر کانال فاضلابرو واقعی پرداخته است و صحت سنجی توسط داده‌ها از کانال فاضلاب واقعی انجام شده است [۶-۸].

در این مطالعه به بررسی توزیع سرعت در کانال‌های فاضلابرو با نسبت عرض به عمق کمتر از پنج که کانال‌های تنگ نامیده می‌شوند با استفاده از مفهوم آنتروپی پرداخته شد.

۲- توزیع سرعت بر مبنای آنتروپی شانون

بررسی مفهوم احتمال در هیدرولیک توسط چیو، امکان توسعه یک روش ساده برای استخراج معادله توزیع سرعت با استفاده از مفهوم احتمال و اصل بیشینه‌سازی آنتروپی را فراهم می‌کند. این مدل قادر به توصیف تغییرات سرعت در جهت قائم و عرضی با سرعت بیشینه رخ داده رو یا زیر سطح آزاد است و در برآورد توزیع سرعت در کانال‌های فاضلاب استفاده شده است. برای اعمال تئوری آنتروپی، سرعت متوسط زمانی U در یک مقطع عرضی کانال به‌عنوان یک متغیر تصادفی و تغییرات آن از صفر تا u_{max} در نظر گرفته می‌شود. معادله توزیع سرعت چیو به‌صورت زیر است [۷]

$$u = \frac{u_{max}}{M}\ln[1+(e^{M}-1)\frac{\xi-\xi_0}{\xi_{max}-\xi_0}] \qquad (۲)$$

در سیستم مختصات دو بعدی مقطع عرضی، سرعت برای یک نقطه خاص به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود

$$\frac{\xi-\xi_0}{\xi_{max}-\xi_0} = \int_0^u p(u)du \qquad (۳)$$

که در این روابط

u سرعت در ξ، ξ متغیر مستقل در حالتی که سرعت افزایش می‌یابد، در صورتی که هر مقدار از ξ مطابق با یک مقدار از u می‌باشد، ξ_{max} مقدار بیشینه ξ در جایی که سرعت بیشینه u_{max} رخ می‌دهد، و ξ_0 مقدار کمینه ξ که در کف کانال جایی که u صفر

است، رخ می‌دهد. رابطه ۵ نشان می‌دهد که اگر ξ به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری شود، احتمال سرعت بین u و u+du برابر p(u)du است.

آنتروپی بیشینه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۱]

$$H(u) = -\int_0^{u\,max} p(u)\ln p(u)du \qquad (۴)$$

متغیر p(u) باید شرایط زیر را اغنا کند

$$\int_0^{u_{max}} p(u)du = 1 \qquad (۵)$$

$$\int_0^{u_{max}} up(u)du = \bar{u} \qquad (۶)$$

معادله خطوط هم سرعت ξ به‌صورت زیر است [۷]

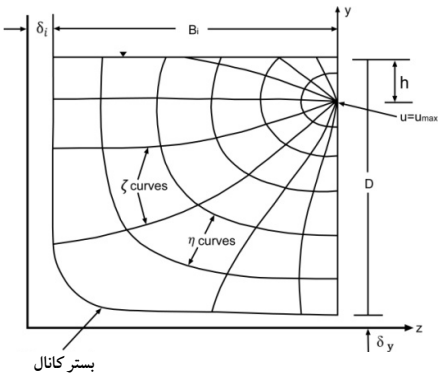
$$\xi = Y(1-Z)^{\beta_i}\exp(\beta_i Z - Y + 1) \qquad (۷)$$

$$Y = \frac{y+\delta_y}{D+\delta_y-h} \qquad Z = \frac{|Z|}{B_i+\delta_i} \qquad (۸)$$

رابطه ۷ یک گروه از منحنی خطوط هم سرعت را نشان می‌دهد. کف کانال یک منحنی هم سرعت است که در آن $\xi_0 = \xi$ است. در رابطه ۸، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، y نشان دهنده سیستم مختصات قائم اندازه‌گیری شده از کف کانال در امتداد محور y است که به‌عنوان محور قائم ویژه تعریف شده و از طریق نقطه‌ای که سرعت بیشینه در مقطع عرضی رخ می‌دهد مشخص می‌شود، D عمق آب در محور y، Z سیستم مختصات در جهت عرضی، B_i برای i معادل ۱ یا ۲ و در واقع فاصله عرضی روی سطح آب بین محور y و سمت چپ یا راست مقطع عرضی کانال، و δ_y، δ_i، B_i و h پارامترها هستند که شکل هندسی خطوط هم سرعت را مشخص می‌کنند. δ_y و δ_i با شکل هندسی مقطع عرضی کانال تغییر می‌کنند. اگر مقطع عرضی کانال به شکل مستطیلی میل کند، پارامترهای δ_y و δ_i به صفر نزدیک می‌شوند. پارامتر h خصوصاً نزدیک سطح آب و در مجاورت نقطه سرعت بیشینه، شکل و شیب منحنی خطوط هم سرعت را کنترل می‌کند [۸-۶].

۲-۱- سرعت متوسط و بیشینه

سرعت‌های بیشینه و متوسط حاوی اطلاعات مهمی در هیدرولیک کانال باز هستند. موقعیت سرعت بیشینه از مباحثی است که نشان می‌دهد سرعت بیشینه همیشه در سطح آب رخ نمی‌دهد، بلکه در



شکل ۱- توزیع سرعت و سیستم مختصات منحنی چیو

فاصله کمی زیر آن اتفاق می‌افتد (پدیده دیپ). در حقیقت یک حرکت ثانویه ضعیف در مقطع عرضی و انتقال مومنتوم ناشی از آن از طرف دیواره‌های کناری کانال به سمت مرکز کانال سبب می‌شود بیشینه سرعت طولی در پایین‌تر از سطح آزاد آب اتفاق افتد. چیو و تونگ در سال ۲۰۰۵ بیان کرده‌اند که موقعیت سرعت بیشینه به نسبت سرعت‌های متوسط و بیشینه، پارامتر توزیع سرعت، موقعیت سرعت متوسط، ضرایب مومنتوم و انرژی، و تابع چگالی احتمال معادله توزیع به‌دست آمده توسط آنتروپی مرتبط است[۹]. سرعت متوسط در معادلات حاکم برای انتقال جرم، مومنتوم و انرژی، از طریق یک مقطع عرضی کانال مورد نیاز است؛ از طرفی به‌دست آوردن سرعت متوسط در کل مقطع عرضی بسیار دشوار است. با دانستن مقدار سرعت متوسط، دبی جریان، انتقال رسوب و انتقال آلودگی به‌دست می‌آید. مشخص شده است که مقدار متوسط از نسبت سرعت‌های متوسط و بیشینه در یک مقطع مشخص، پایدار و ثابت است و با زمان و دبی تغییر نمی‌کند [۱۰]. با در نظر گرفتن فرمول‌سازی احتمالی، سرعت متوسط (u_{mean}) می‌تواند به‌صورت تابعی از سرعت بیشینه (u_{max})، از طریق پارامتر بی بعد آنتروپی (M) بیان شود[۸]. چیو و همکاران در سالهای ۱۹۹۵، ۱۹۹۴، ۱۹۸۹، توزیع سرعت در جریان‌های کانال روباز را بررسی و رابطه زیر را برای شرح رابطه سرعت بیشینه و سرعت متوسط در سراسر مقطع عرضی معرفی کرده‌اند

$$\frac{u_{mean}}{u_{max}} = \frac{e^M}{e^M-1} - \frac{1}{M} = \Phi(M) \qquad (۹)$$

$$u_{max} = \left(\frac{e^M}{e^M-1} - \frac{1}{M}\right)^{-1} u_{mean} = a u_{mean} \qquad (۱۰)$$

که در آن

a شیب خطی است که می‌تواند به‌صورت Φ^{-1} (M) به‌دست آید. میزان پارامتر آنتروپی از یک مقطع کانال شامل اطلاعاتی درباره

مشخصات هیدرولیکی کلی آن است. این تحلیل‌ها امکان به‌کارگیری آسان سرعت بیشینه در اندازه‌گیری میدان سرعت جریان را به‌وجود می‌آورد [۱۰]. هنگامی که پارامتر آنتروپی معلوم است، سرعت متوسط مقطع عرضی می‌تواند به آسانی از سرعت بیشینه به‌دست آید. سرعت بیشینه به‌طور مستقیم توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۲- برآورد دبی

برآورد سریع و دقیق دبی رودخانه از مهم‌ترین موضوعات برای بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند پیش‌بینی سیلاب در زمان واقعی و مدیریت منابع آب است. با استفاده از محاسبه M، $\phi(M)$ از رابطه ۹ محاسبه می‌شود و همچنین u_{max} توسط اندازه‌گیری تعیین می‌شود. از طریق این روندها، سرعت متوسط با استفاده از رابطه بین سرعت بیشینه u_{max} و حالت تعادل کلی $\phi(M)$ برآورد می‌شود. این دید یعنی نظارت بر دبی رودخانه از طریق نمونه‌برداری سرعت بیشینه جریان، از موارد مورد بحث در مباحث هیدرولوژیکی است. همچنین فناوری‌های رادار جدید که در حال حاضر برای اندازه‌گیری سرعت جریان سطحی موجود می‌باشند، اغلب با حداکثر سرعت جریان منطبق هستند [۱۱].

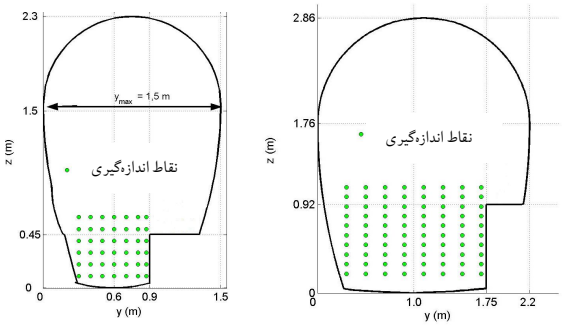
در مدیریت هیدرولوژی شهری، اندازه‌گیری دبی در شبکه فاضلاب یک وظیفه مهم است. داده‌های جریان برای هدف‌های متعدد، مانند کنترل شبکه‌ها، مدیریت منابع آب، تحلیل‌های هیدرولوژیکی، بهینه‌سازی عملکرد سیستم، و میزان فاضلاب و نظارت بر ظرفیت مورد نیاز هستند. روش مرسوم برای برآورد دبی در فاضلابروها، اندازه‌گیری عمق جریان و ارزیابی سرعت متوسط مقطع عرضی است. مساحت مقطع عرضی تقریباً پر، A(h)، می‌تواند به صورت تابعی از عمق جریان (h) محاسبه شود، اما تعیین سرعت متوسط مقطع عرضی نیاز به فنون مناسبی دارد. هدف از این مطالعه بررسی توزیع سرعت و برآورد دبی در کانال فاضلابرو با استفاده از آنتروپی شانون بود. توزیع‌ها شامل پارامتر M است که این پارامتر جدید M ، مشخصات هیدرولیکی کانال را نشان می‌دهد. قانون احتمال، توزیع سرعت در یک مقطع کانال در رودخانه‌ها و مسیل‌ها که با زمان و دبی تغییر نمی‌کند را توصیف می‌کند. این روش بر مبنای نسبت سرعت‌های متوسط و بیشینه استوار است که با دبی و سطح آب تغییر نمی‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک اساس برای توسعه روش مؤثری برای برآورد دبی در کانال‌های فاضلاب به‌کار رود. چیو روشی برای تعیین دبی از پارامتر بی بعد آنتروپی از یک مقطع کانال و پروفیل سرعت بر روی یک محور قائم منفرد که سرعت بیشینه در مقطع عرضی کانال رخ می‌دهد را توسعه داده است [۱۲]. بنابراین دبی می‌تواند به‌صورت زیر برآورد شود

$$Q(estimated) = u_{mean} \times A(h) = \Phi(M) u_{max} \times A(h) \quad (۱۱)$$

که A(h) مساحت نسبتاً پر شده مقطع عرضی است.

۳- سایت آزمایشگاهی و داده‌های میدانی

در این بررسی به‌منظور صحت سنجی داده‌های مورد نیاز، دو سایت میدانی واقعی (کوردن بلو[1]، ژاردن دی پلات[2]) از شبکه فاضلاب شهر نانت (شمال غربی فرانسه) مورد استفاده قرار گرفت. مقطع عرضی مطابق با مقطع تنگ شامل کانال بتنی تخم مرغی شکل بود (شکل ۲). جریان آشفته و زیر بحرانی، با عدد رینولدز بزرگ‌تر از 10^5 و عدد فرود بین ۰/۲ و ۰/۳ برای تمام شرایط هیدرولیکی است. شیب طولی ۰/۰۰۰۴ و ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۴ است. محورهای انتخابی در جهت افقی z و در جهت قائم y هستند. در سایت‌ها یک ریل دائمی وجود دارد که به‌کمک آن ابزار اندازه‌گیری سرعت به داخل مجرا هدایت می‌شود. ابزار اندازه‌گیری سرعت که در لابراتوار راه و پل فرانسه طراحی و ساخته شده است، سربر نامیده می‌شود. این وسیله سرعت را در دو بعد اندازه‌گیری می‌کند و از راه دور عملکرد آن قابل کنترل است، علاوه بر این، پنج سرعت‌سنج صوتی دوپلر می‌توانند روی این وسیله نصب شود. فاصله عمودی بین این سرعت‌سنج‌ها، ۲۰ سانتی‌متر است و می‌توانند به‌طور همزمان در ۵ نقطه روی یک خط عمودی در مقطع، سرعت جریان را اندازه‌گیری کنند. جابجایی افقی و عمودی این وسیله به کمک ریل، در هر مقطع می‌تواند باعث شود که کل سطح مقطع عرضی کانال پوشش داده شود. به‌علاوه با توجه به تغییرات تراز آب داخل فاضلابرو، تعداد نقاط اندازه‌گیری می‌تواند در امتداد قائم تغییر کند.



(ب) (الف)

شکل ۲- ابعاد و شکل شماتیک کانال‌ها (الف) کوردن بلو (ب) ژاردن دی پلات

[1] Cordon Blue
[2] Jardin des Plantes

۳-۱- اندازه گیری دبی

برای بررسی دقیق سیر تکاملی میزان جریان، دبی فاضلابرو توسط اندازه‌گیری سرعت محلی با زمان $t_i(\approx 1\min)$ به‌دست آمده است. رویکرد مدل به‌صورت زیر است

$$Q(measured) = \int u(t)ds = \sum_{i=1}^{n} u_i(t_i)S_i \qquad (۱۲)$$

روش اندازه‌گیری دبی نیازمند ارزیابی سرعت متوسط در هر سطح اصلی انتخاب شده است. سرعت متوسط در این سطوح از نقاط اندازه‌گیری شده سرعت در هر ایستگاه میدان است.

۳-۲- توزیع سرعت و تعیین محور Y

محور Y محور قائم در مقطع کانال است که در آن سرعت بیشینه رخ می‌دهد. در کانال‌های باز منشوری، موقعیت سرعت بیشینه در بخش میانی مقطع عرضی است اما در کانال‌های غیرمنشوری در تمام قسمت‌های مقطع عرضی می‌تواند قرار گرفته شود[۱۳]. موقعیت محور y توسط اندازه‌گیری توزیع سرعت می‌تواند تعیین شود. برای بررسی رفتار هیدرولیکی نقاط کانال، سرعت‌ها در انواع گوناگون از آزمایش‌ها با ارتفاعات مختلف آب اندازه‌گیری شده است. شکل ۳ سرعت‌های ابتدایی محلی اندازه‌گیری شده، که طی اندازه‌گیری عمق جریان از ۰/۹۲ تا ۱/۱۷ متر در سایت کوردن بلو و از ۰/۶۵ تا ۰/۷۲ متر در سایت ژاردن دی پلات تغییر می‌کند، را نشان می‌دهد. مطابق با داده‌های استفاده شده، نشان داده شده که موقعیت محور y در یک مقطع کانال، کاملاً پایدار است و مستقل از دبی و عمق آب و شرایط هیدرولیکی است. برای سایت آزمایشگاهی کوردن بلو محور y در W=0.9m و سایت ژاردن دی پلات در W=0.5m قرار گرفته است.

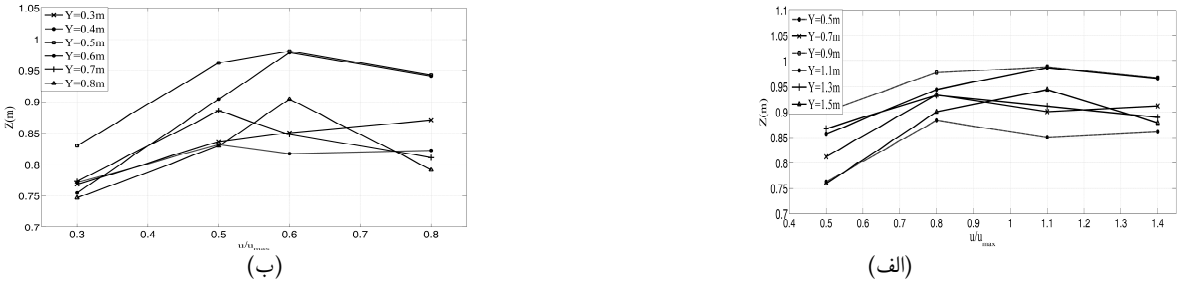
هنگامی که نسبت عرض به عمق کانال باز کمتر از ۵ باشد، کانال تنگ است و سرعت بیشینه در سطح آزاد رخ نمی‌دهد، اما زیر سطح آزاد است، که پدیده دیپ نامیده می‌شود و توسط جریان ثانویه ایجاد شده است [۱۴ و ۱۵]. برای سایت کوردن بلو کانال با نسبت b/D_{max} بین ۱/۷ و ۲/۶ و سایت ژاردن دی پلات بین ۱/۴۴ و ۲/۱۵ کانال‌ها تنگ هستند، که b عرض سطح آزاد و D_{max} ارتفاع بیشینه آب در کانال اصلی طی اندازه‌گیری است.

۳-۳- تعیین پارامتر M و رابطه بین سرعت بیشینه و متوسط در کانال‌های فاضلاب

پارامتر آنتروپی M از مقطع عرضی کانال از رابطه بین سرعت متوسط و بیشینه در کانال به‌دست می‌آید. بزرگی و موقعیت سرعت بیشینه در یک مقطع کانال شامل اطلاعات مهمی برای به‌دست آوردن آسان مجموعه داده‌ها و بهبود و طراحی و کنترل سیستم مهندسی هیدرولیک است. موقعیت سرعت بیشینه مانند میانگین سرعت، تابعی از M و پارامترهای توزیع سرعت است. سرعت متوسط در یک مقطع عرضی کانال، صرف‌نظر از شکل هندسی آن، به‌صورت پیش‌بینی ریاضی از u می‌تواند به‌دست آید:

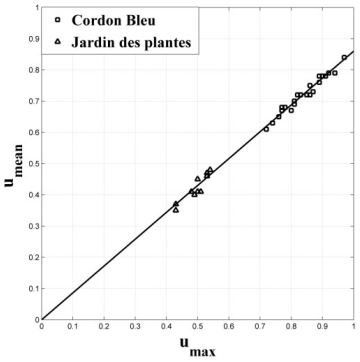
$$u_{mean} = \int_0^{u_{max}} up(u)du = \Phi(M)u_{max} \qquad (۱۳)$$

رابطه ۱۳ نشان می‌دهد که u_{mean} از u_{max} و M می‌تواند به‌دست آید، و u_{max} و u_{mean} می‌توانند M را به‌دست آورند. شکل ۴ رابطه خطی بین u_{max} و u_{mean} در کانال را نشان می‌دهد. میزان Φ(M) برای یک جفت منفرد u_{max} و u_{mean} در دو کانال ثابت و برابر ۰/۸۶ است. با استفاده از رابطه ۱۳ و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شد که M برای هر مقطع کانال ثابت است و با دبی یا عمق آب تغییر نمی‌کند. میزان M براساس آنتروپی شانون برای کانال‌های فاضلاب تنگ برابر ۷/۱ به‌دست آمده است. با استفاده از M به بررسی پروفیل سرعت در کانال تنگ فاضلاب پرداخته می‌شود.



(ب) (الف)

شکل ۳- اندازه‌گیری سرعت برای سایت‌های میدانی: الف- کوردن بلو طی اندازه‌گیری عمق جریان از ۰/۹۲ تا ۱/۱۷ متر تغییر می کند و ب- ژاردن دی پلات، طی اندازه‌گیری عمق جریان از ۰/۶۵ تا ۰/۷۲ متر تغییر می‌کند



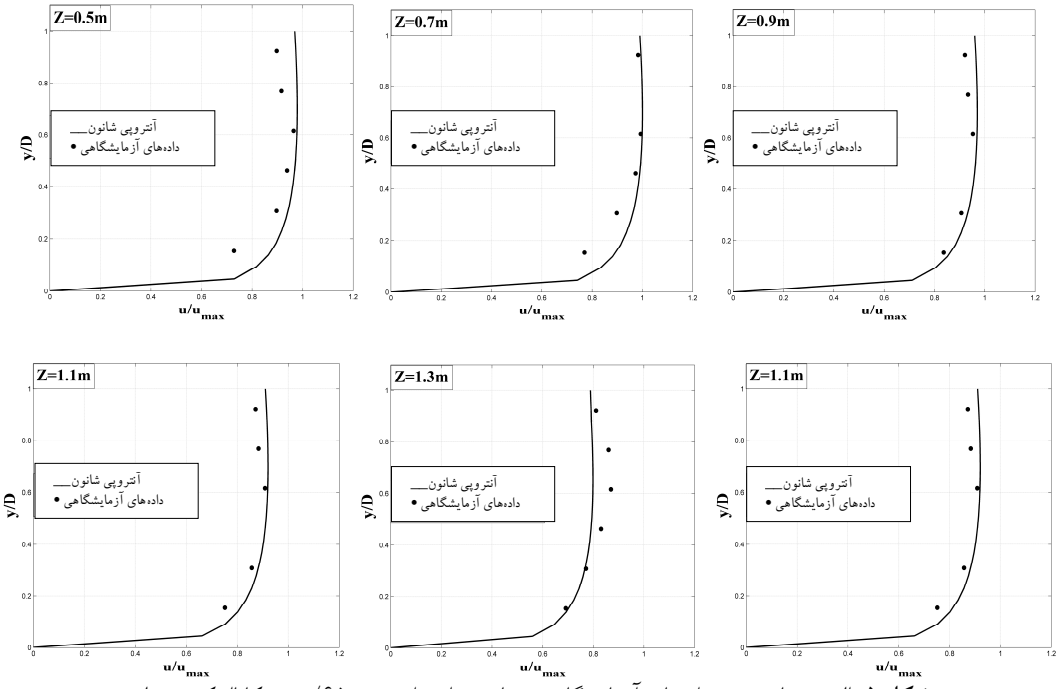
شکل ۴- رابطه خطی سرعت متوسط و بیشینه در کانال‌های فاضلاب

۴- پیش‌بینی توزیع سرعت

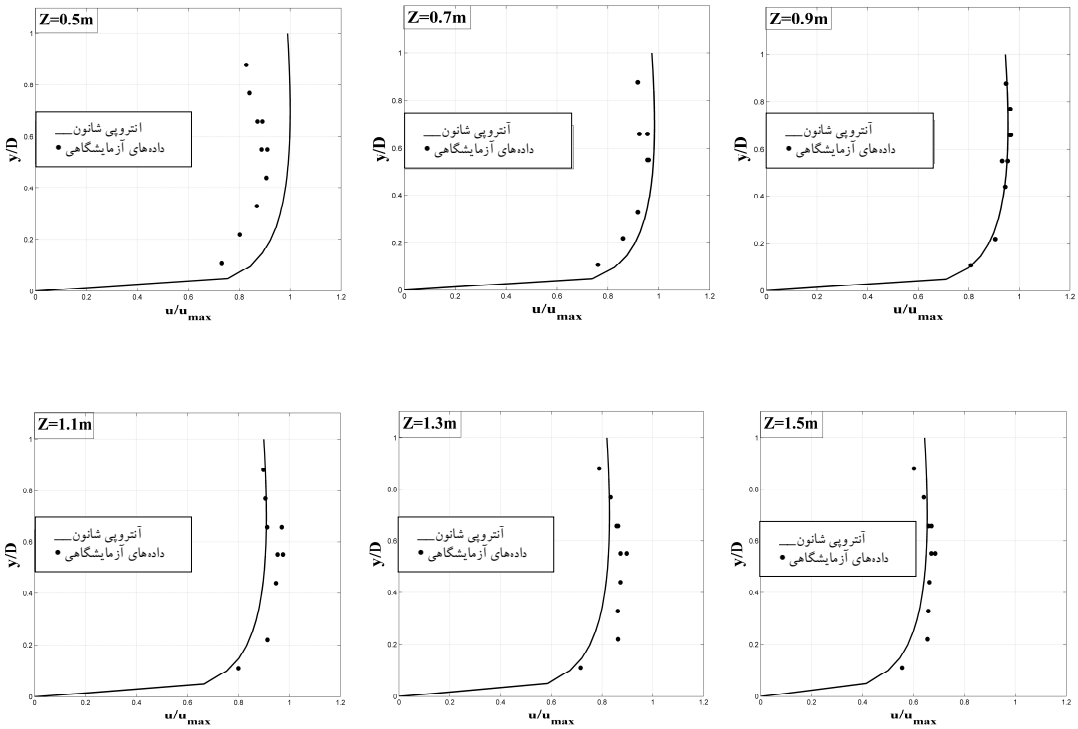
مدل‌های ریاضی توزیع سرعت با مجموعه‌ای از داده‌های توزیع سرعت آزمایش شده است. شکل ۵ پروفیل‌های سرعت اولیه محلی همراه با مقاطع عرضی بی بعد شده توسط سرعت بیشینه، برای سطوح آب پایین (D=0.64m)، متوسط(D=0.91m) و بالا (D=1.19m) را برای کانال کوردن بلو و شکل ۶ سطوح آب پایین (D=0.54m)، متوسط (D=0.6m) و بالا (D=0.77m) در کانال ژاردن دی پلات را نشان می‌دهند. سرعت بیشینه اغلب زیر سطح آب رخ می‌دهد و از این‌رو سرعت نزدیک سطح ممکن است با فاصله از کف کاهش یابد.

شکلهای ۵- الف و ۶- الف، توزیع سرعت طولی در امتداد عرض کانال کوردن بلو و ژاردن دی پلات برای تراز ۰/۵۴ و ۰/۶۵ متری آب که که مقطع شبه مستطیلی است را نشان می‌دهند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل شانون در ناحیه مرزی خوب جواب می‌دهد، اما در نمایش گرادیان منفی سرعت طولی در ناحیه مرکزی کانال در محل وقوع سرعت بیشینه ضعیف عمل می‌کند و پدیده دیپ را به وضوح نشان نمی‌دهد. شکلهای ۵-ب و ۶-ب، توزیع سرعت را برای تراز ۰/۶۱ و ۰/۹۱ متری برای کانال های کوردن بلو و ژاردن دی پلات نشان می‌دهد. در این حالت به‌دلیل اینکه عمق آب بیشتر شده است و شرایط تعریفی برای کانال تنگ بهتر نمایان است، پروفیل‌های رسم شده بر اساس مدل‌های ذکر شده از یکنواختی بیشتری برخوردار هستند. میزان انحنای ناشی از وقوع پدیده دیپ به‌خوبی در پروفیل‌ها نمایان است و اندک اختلافی هم که در نزدیکی دیواره یعنی Z=1.5 و Z=0.8 متری دیده می‌شود، ناشی از تغییر تراز آب و تبدیل مقطع به مقطعی مرکب و بروز جریان‌های ثانویه و مومنتوم ناشی از آنها است [۱۶].

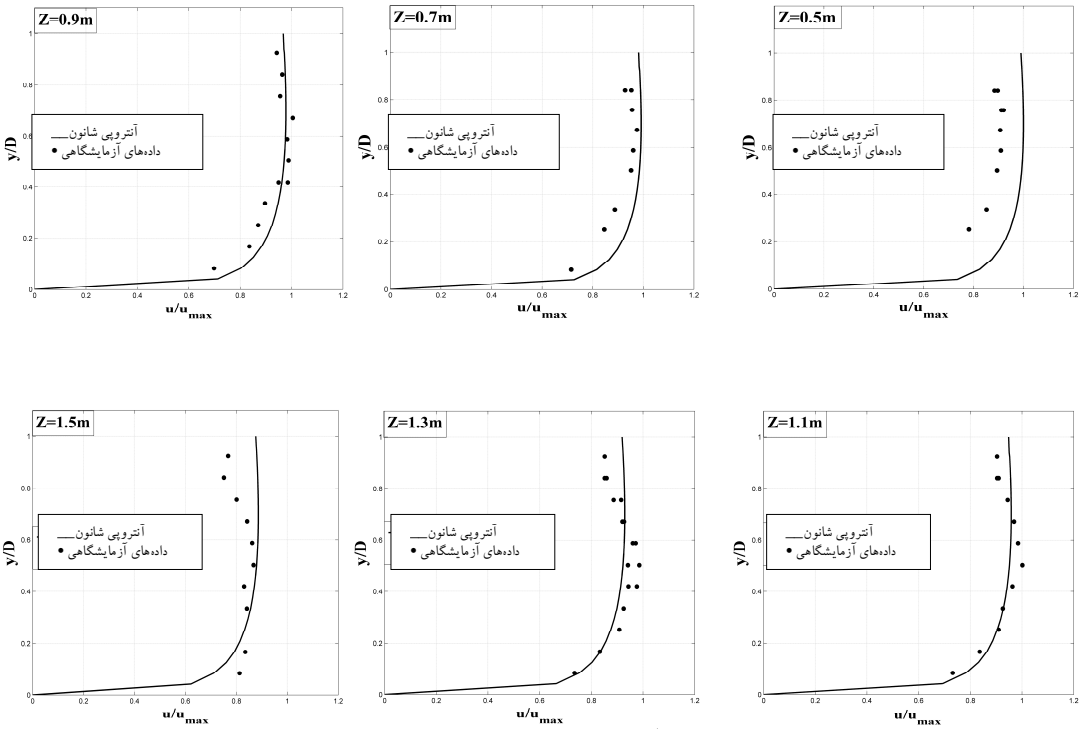
شکلهای ۵-ج و ۶-ج، توزیع سرعت را برای کانال‌های کوردن بلو و ژاردن دی پلات در حالتی که مقطع به مقطعی مرکب تبدیل شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در شکلها مشخص است وجود جریان‌های ثانویه در ناحیه کناری کانال یعنی Z=0.8 و Z=1.5 به‌خوبی بر روی پروفیل‌های سرعت دیده می‌شود. انحنای



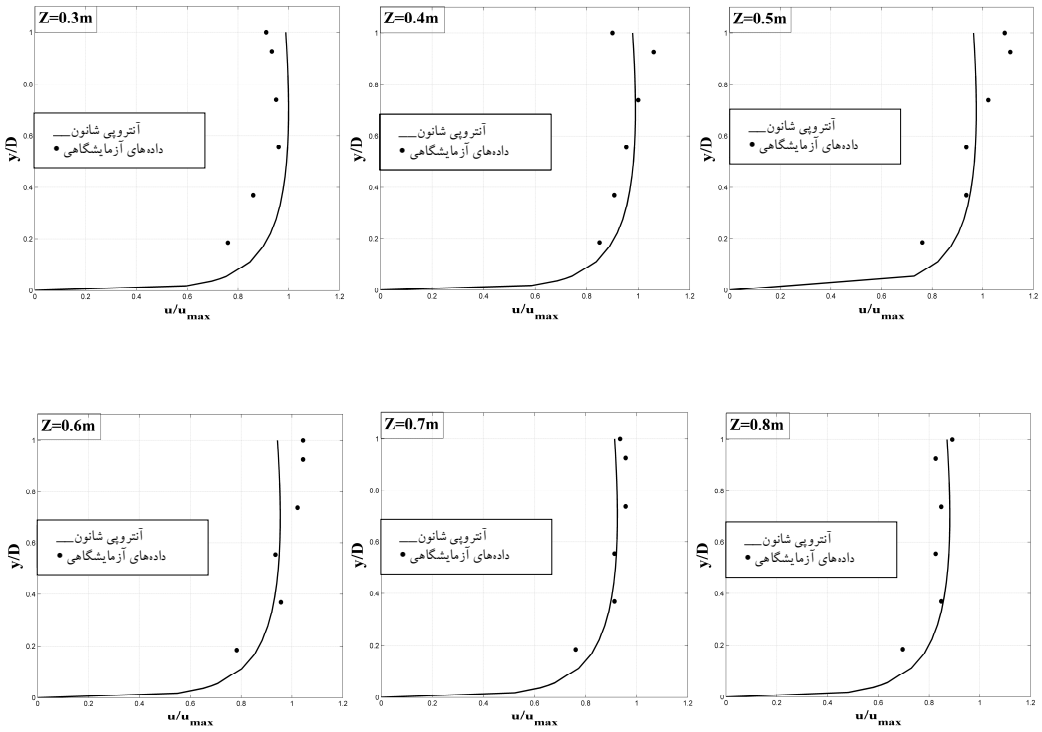
شکل ۵-الف- مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل برای عمق ۰/۶۵ متر کانال کوردن بلو



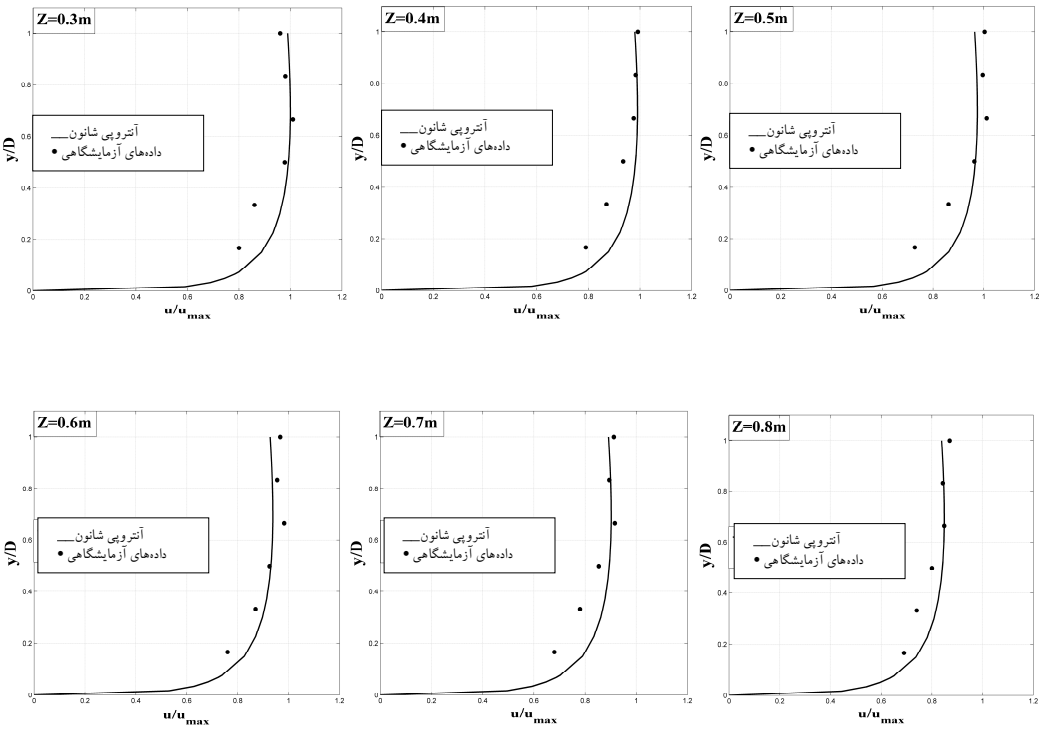
شکل ۵-ب- مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل برای عمق ۰/۹۱ متر کانال کوردن بلو



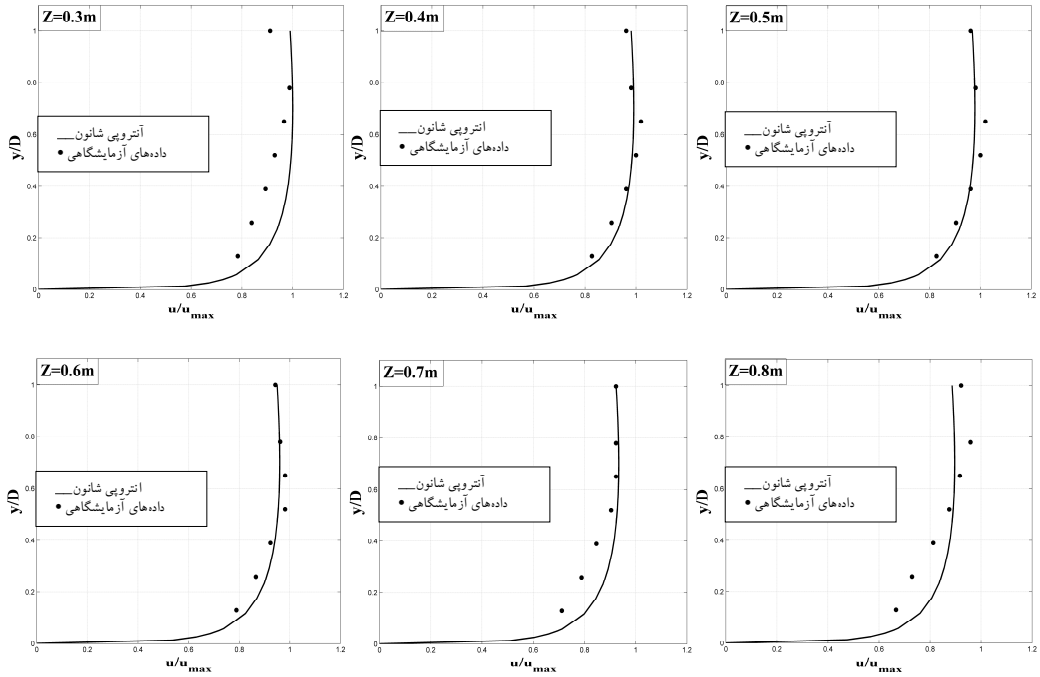
شکل ۵-ج- مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل برای عمق ۱/۱۹ متر کانال کوردن بلو



شکل ۶-الف- توزیع سرعت برای تراز ۰/۵۴ متری براساس مدل‌های ارائه شده و نتایج اندازه‌گیری شده در کانال ژاردن دی پلات



شکل ۶-ب- توزیع سرعت برای تراز ۰/۶۱ متری بر اساس مدل‌های ارائه شده و نتایج اندازه‌گیری شده در کانال ژاردن دی پلات



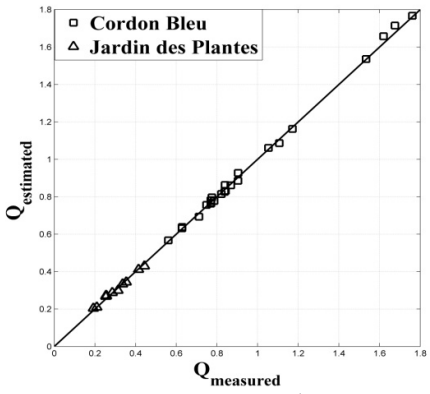
شکل ۶-ج- توزیع سرعت برای تراز ۰/۷۷ متری براساس مدل‌های ارائه شده و نتایج اندازه‌گیری شده در کانال ژاردن دی پلات

معکوسی که در مقادیر اندازه‌گیری شده در قسمت بالای محل وقوع سرعت بیشینه مشخص است، ناشی از همین تبدیل مقطع و جریان‌های ثانویه ناشی از آن است. اما به دور از تأثیر این جریان‌ها در ناحیه مرکزی کانال به خوبی پدیده دیپ قابل مشاهده است. اما همچنان مدل شانون در نمایش گرادیان منفی در بالای محل وقوع پدیده دیپ، ضعیف عمل می‌کند و پدیده دیپ را نشان نمی‌دهد.

۴-۱- برآورد دبی

برای برآورد دبی توسط رابطه ۱۲، اندازه مساحت مقطع عرضی، سرعت بیشینه در مقطع عرضی و تابع آنتروپی مورد نیاز است. سایر داده‌های به‌دست آمده سرعت از این سایت‌ها، نشان می‌دهد که موقعیت محور سرعت بیشینه بسیار پایدار است و با شرایط هیدرولیکی و دبی تغییر نمی‌کند. اگرچه یک تغییر مکان کوچک از این محور اثرات زیادی بر سرعت بیشینه ندارد [۹]. میزان سرعت بیشینه در این محور توسط هر نوعی از جریان‌سنج می‌تواند اندازه‌گیری یا برآورد شود.

در شکل ۷ داده‌های دبی و دبی برآورد شده توسط این روش با استفاده از نمونه‌های سرعت جمع‌آوری شده بر روی محور y، برای دو کانال موجود مقایسه شده‌اند. تطابق داده‌ها در تمام شرایط هیدرولیکی مناسب است. همانگونه که نشان داده شده است، با مقایسه بین دبی برآورد شده و دبی اندازه‌گیری شده، یک رابطه پایدار و منحصر به فرد بین نقطه سرعت بیشینه و سرعت متوسط مقطع عرضی آشکار می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که سرعت بیشینه در یک نقطه، ضرب در مضربی مانند تابع آنتروپی، می‌تواند به‌عنوان برآورد دقیق سرعت متوسط مقطع عرضی استفاده شود. این روش نیازمند ساده سازی اندازه‌گیری بیشینه به جای توزیع سرعت کامل سراسر کانال برای ارزیابی سرعت جریان است.



شکل ۷- مقایسه دبی برآورد شده با دبی اندازه‌گیری شده در کانال فاضلابرو

۵- نتیجه‌گیری

محاسبه سرعت جریان در فاضلاب یکی از نکات مهم طراحی کانال‌های فاضلاب است. اکثر فاضلاب‌ها بنابر اصول جریان در کانال‌های باز طراحی می‌شوند. در این مطالعه ابتدا داده‌های سرعت

از جریان آشفته در کانال‌های باز مرکب تنگ با استفاده از مفهوم آنتروپی شانون تحلیل شدند، سپس یک سری آزمایش برای مطالعه سرعت میدانی در کانال فاضلاب واقعی انجام شد. بنابراین روش محاسبه توزیع سرعت به اصل مفهوم آنتروپی مشخص می‌شود. سرانجام داده‌های اندازه‌گیری شده که از سایت اندازه‌گیری شده واقعی از شبکه فاضلاب به‌دست آمد، برای صحت سنجی و کاربرد تئوری استفاده می‌شوند. نشان داده شد که معادله قادر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی توزیع سرعت از کف کانال تا سطح آزاد است، در حالتی که سرعت بیشینه زیر سطح آزاد رخ می‌دهد و جوابگوی پدیده دیپ است. همچنین مدل به‌دست آمده بدون در نظرگیری شکل هندسی مقطع عرضی، قادر به توصیف تغییرات سرعت در جهت‌های قائم و عرضی است، که در کانال‌های فاضلاب واقعی به‌شدت پیچیده است. به‌خاطر سادگی و زمان موردنیاز کم، این روش می‌تواند به آسانی به‌صورت خودکار برای جمع‌آوری کردن داده‌های سرعت و دبی در کانال‌های فاضلابرو عمل کند، که به‌منظور پیش‌بینی جریان با زمان واقعی و طراحی سازه‌های کنترل سیلاب و برای پیشرفت علمی اساسی در هیدرولیک نیاز است. از سوی دیگر، رابطه خطی بین سرعت‌های متوسط و بیشینه، یک روش مؤثر برای ارزیابی دبی در کانال های فاضلابرو معرفی می‌کند. اندازه‌گیری دبی توسط ضرب سرعت بیشینه در تابع آنتروپی و مساحت مقطع عرضی به‌دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهند که این روش مؤثر است و برای ارزیابی دقیق سرعت جریان و دبی در کانال‌های فاضلاب واقعی می‌تواند استفاده شود.

۶- مراجع

1. Shannon, C.E. (1948). "A mathematical theory of communication." *J. Bell Systems Technical*, 27 (3), 379-423.
2. Chiu, C.L. (1987). "Entropy and probability concepts in hydraulics." *J. Hydr Hydraulic Engineering*, 113 (5), 583-600.
3. Chiu, C.L. (1988). "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels." *J. Hydraulic Engineering*, 114(7), 738-756.
4- Shiono, K., and Knight, D.W. (1991). "Turbulent open channel flows with variable depth across the channel." *J. Fluid Mechanics*, 222, 617-646.
5. Chiu, C.L. (1991). "Application of entropy concept in open-channel flow study." *J. Hydraulic Engineering*, 117 (5), 615-628.
6. Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows, IAHR-Monograph*, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
7. Nezu, I. (1994). "Compound open Channel turbulence and its role in river environment." *J. Keynote Lecture of 9th APD-IAHR Congress*, Delft, The Netherlands, 1-24.
8. Chiu, C. L., and Said, C. A. (1995). "Maximum and mean velocities and entropy in open- channel flow." *J. Hydraul. Engineering*, 121(1) 26-35.
9. Nezu, I., and Noat, D. (1995). "Turbulence structure and secondary currents in compound open channel flows with variable depth flood plains." *10th Symp. on Turbulence Shear Flows*, The Penylvania State University Park,7-12.
10. Kirkgoz, M.S., and Ardiclioglu, M. (1997). "Velocity profiles of developing and developed open channel flow. " *J. Hydraul. Engineering*, 123(12), 1099-1105.
11. Chiu, C. L., and Chen, Y. C. (1998). "A fast method of discharge measurement in open- channel flow." *J. Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference*, Memphis, Tennessee.
12. Chiu, C. L., and Chen, Y. C. (1999). "Efficient methods of measuring discharge and reservoir- sediment inflow." Kuo, J.-T. and Yen, B. C. (Eds.) *Risk analysis in dam safety assessment*, Water Resources Publications. LLC, Highlands Ranch, Colorado.
13. Chiu, C. L., and Tung, N. C. (2002). "Maximum velocity and regularities in open-channel flow." *J. Hydraul. Engineering*, 128(8), 803-803.
14. Shiono, K., and Feng, T.(2003). "Turbulent measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows." *J. Hydraulic Engineering*, 129 (5), 373-384.
15. Larrate, F. (2006). "Velocity fields within sewers: An exprimental study." *J. Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 282-290.
16. Bonakdari, H. (2009). "Numerical and experimental study of velocity profiles in sewers." *J. World Applied Science*, 7 (6), 735-734.