

توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال‌های صاف ذوزنقه‌ای و مستطیلی با بهترین مقطع هیدرولیکی

عبدالرضا کبیری سامانی^۲

فاطمه فرشی^۱

(پذیرش ۹۱/۴/۶)

(دریافت ۹۰/۱۱/۱۲)

چکیده

رابطه‌های عمومی تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال‌های باز با مقطع ذوزنقه‌ای، نتایج مناسبی ارائه نمی‌کنند. از این‌رو در این مقاله به ارائه روشی جدید برای تخمین این پارامتر در کانال‌های صاف ذوزنقه‌ای با بهترین مقطع هیدرولیکی پرداخته شد. در این روش، توزیع سرعت متوسط عمقی با استفاده از رابطه تنش برشی جداره محاسبه شد. برای واسنجی مدل تحلیلی، از نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج حاصل از مقایسه مدل تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: کانال باز، سرعت متوسط عمقی، تنش برشی جداره

Depth-averaged Velocity Distribution in Smooth Trapezoidal and Rectangular Open Channels with the Best Hydraulic Section

F. Farshi¹

A. Kabiri-Samani²

(Received Feb. 1, 2012 Accepted June 26, 2012)

Abstract

General equations for predicting depth-averaged velocity in open channels are not well suited for trapezoidal open channels. In this study, an innovative method is developed for predicting the depth-averaged velocity distributions in smooth trapezoidal open channels with the best hydraulic section. Depth-averaged velocity was obtained using the boundary shear stress obtained in the present study. To calibrate the present analytical results, an experimental investigation was also performed. Analytical results compared well with the experimental data.

Keywords: Open Channel, Depth-Averaged Velocity, Boundary Shear Stress.

1. M.Sc Grad. Student of Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan
(Corresponding Author) (+98 311) 3913829 f.farshi@cv.iut.ac.ir
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان (نویسنده مسئول)
f.farshi@cv.iut.ac.ir (۰۳۱۱) ۳۹۱۳۸۲۹
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

تفکیک شود و به طور مشابه برای تخمین میزان تغییرات مسیر کانال و یا میزان فرسایش جداره نیاز به دانستن توزیع تنش جداره است [۵]. تخمین درست و دقیق پارامترهای ذکر شده، منجر به طراحی ایمن کانال‌ها در برابر فرسایش و تخمین درست ضریب پراکندگی آلودگی می‌شود [۶]. رابطه‌ی مشهور لگاریتمی سرعت، به وضوح ارتباط تنگاتنگ بین تنش برشی جداره و سرعت طولی در کانال‌های باز را نشان می‌دهد [۳]. از این رو، فرشی در سال ۱۳۸۹ و فرشی و همکاران در سال ۱۳۹۰، تنش برشی جداره را به کمک یک مرز فرضی که نقش جداکننده‌ی نواحی تحت تأثیر کف و دیواره‌ها را دارد، به دست آورده‌اند. این مرز یک سطح با تنش برشی صفر محسوب می‌شود [۷ و ۸].

تاکنون مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی زیادی به منظور تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال‌های باز ارائه شده است [۹-۱۱]. شیونو و نایت یک مدل تحلیلی به منظور تخمین هم‌زمان توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی جداره در حالت کلی ارائه کرده‌اند که کلیه آثار جریان آشسته در کانال‌های باز را در بر می‌گرفت [۱۲ و ۱۳]. اروین و همکاران به شیوه‌ای دیگر، روش شیونو و نایت را به کار گرفتند [۱۴]. از دیگر مدل‌های تحلیلی می‌توان به روش مغربی اشاره کرد که در آن، کانتورهای بی‌بعد سرعت در سطح مقطع داکت‌ها، کانال‌های باز و رودخانه‌های طبیعی نامنظم به دست آمده است [۱۵]. ویلکرسون و مک‌گهان دو مدل برای تخمین سرعت متوسط عمقی ارائه کرده‌اند. در مدل اول، برای تخمین برخی پارامترها نیاز به اطلاعات میدانی بود که با محدودیت همراه بود. آن‌ها این محدودیت را در مدل دوم با استفاده از اطلاعات میدانی کانال‌های عریض رفع کردند [۱۶]. محققان بسیاری به تکمیل و بررسی روش شیونو و نایت در مقاطع مختلف پرداخته‌اند [۲۰-۱۷]. همچنین گیوه‌چی و همکاران به کاربرد سرعت متوسط عمقی در ضریب پخشیدگی آلودگی پرداخته‌اند [۲۱].

از آنجا که کانال‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی، کاربردهای زیادی در طرح‌های سیستم‌های انتقال آب دارند و در عین حال بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که اطلاعات کافی در زمینه‌ی توزیع سرعت متوسط عمقی در این کانال‌ها وجود ندارد و از آنجا که بهترین شکل طراحی در حالت بهترین مقطع هیدرولیکی است، تحقیق حاضر با هدف محاسبه‌ی توزیع سرعت متوسط عمقی در جداره صاف کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای با شرایط بهترین مقطع هیدرولیکی انجام شد. برای نیل به این هدف از توزیع تنش برشی استفاده شد [۷]. در محاسبه توزیع تنش برشی به شکل تحلیلی، آثار جریان‌های ثانویه و تنش‌های برشی رینولدزی نیز منظور شد. در این روش مقطع کانال با منظور کردن این آثار به وسیله دو مرز فرضی به سه قسمت کف و دیواره‌ها، تقسیم‌بندی می‌شود. با استفاده

توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، از پارامترهای بسیار مهم در مسایل مربوط به کانال‌های باز و مهندسی رودخانه هستند. در صورت وجود اطلاعات سرعت در سطح مقطع جریان، با جمع سرعت نقاطی که در راستای قائم مشخص (فاصله مشخص از مبدأ) قرار گرفته‌اند و تقسیم این مجموع بر تعداد نقاط مورد استفاده، می‌توان سرعت متوسط عمقی در هر نقطه از عرض مقطع را محاسبه نمود. این روش وقتی قابل استفاده است که اطلاعات سرعت نقطه‌ای در سطح مقطع جریان در دسترس باشد؛ در غیر این صورت باید با روش‌های تئوریک به تخمین آن مبادرت ورزید. بیان تئوریک توزیع سرعت عرضی در مجرای باز بسیار دشوار است. پارامتر مهم دیگر در کانال‌های باز، توزیع تنش برشی جداره است. هنگامی که آب در کانال جریان می‌یابد، نیرویی در جهت حرکت آب بر سطح بستر کانال وارد می‌شود. این نیرو که با نیروی اصطکاک در جریان یکنواخت برابر بوده و در جهت مخالف آن اعمال می‌شود، به نیروی برشی یا نیروی مالشی معروف است. توزیع تنش برشی جداره از پارامترهای اساسی در پدیده‌هایی همچون مطالعه‌ی آشفستگی، حرکت رسوب، تغییر مورفولوژی رودخانه و فرسایش در کانال‌های باز است و تعیین دقیق آن حتی در حالت‌های ساده و خاص نیز بسیار مشکل است. تغییرات تنش برشی در پیرامون تر شده‌ی مقاطع کانال‌های باز و رودخانه‌ها، غیریکنواخت بوده و مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نحوه و شدت توزیع آن، شکل سطح مقطع مجرا، توزیع زبری بستر و جریان‌های ثانویه است [۱-۳].

مطالعه‌ی جریان‌های ثانویه در کانال‌های باز، از اهمیت زیادی در علم مهندسی هیدرولیک برخوردار است. این اهمیت به دلیل تأثیر جریان‌های ثانویه بر پارامترهای مختلف مطرح در هیدرولیک و مهندسی رودخانه همچون سرعت متوسط جریان، توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی است. اندازه‌گیری مستقیم جریان‌های ثانویه دشوار است، زیرا این جریان‌ها بردارهایی از جنس سرعت هستند که در صفحه‌ی مقطع جریان یا محور عمود بر راستای جریان به وجود می‌آیند و از نظر مقدار، حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان را تشکیل می‌دهند. منشأ این جریان‌ها غیرهمگن بودن آشفستگی سیال است [۳]. از مسائل مهم دیگر در این خصوص می‌توان به تقسیم‌بندی مقطع کانال به دو ناحیه‌ی تحت تأثیر کف و دیواره‌ها اشاره کرد. مسئله‌ی تفکیک تنش برشی دیواره از کف، در بسیاری از مسایل مربوط به مطالعات جریان در کانال‌های باز، کاربرد دارد. به عنوان نمونه برای مطالعه‌ی توزیع سرعت، نیاز به دانستن توزیع تنش برشی است [۴]. برای محاسبه‌ی میزان بار کف در پدیده‌ی فرسایش، لازم است که مقدار تنش برشی کف از کل

برای تقسیم‌بندی سطح مقطع کانال‌ها در تحقیق پیشین، از منحنی‌هایی به نام "متعامد"^۳ بهره گرفته شده است [۷ و ۸]. طبق نظر چپو و چپو در امتداد این منحنی‌ها، تنش برشی صفر است [۲۴]. بنابراین این منحنی‌ها نیز سطوح تنش برشی صفر محسوب می‌شوند (مانند سطح آب). به این شکل برای محاسبه توزیع تنش برشی می‌توان $\rho g S_0$ را در المانی ضرب کرد که از یک سو بر جداره عمود است و از سوی دیگر به این منحنی‌ها می‌رسد (تئوری لاندرگن و جانسون). در بین این متعامدها، مهم‌ترین منحنی از گوشه‌ی کانال آغاز می‌شود و نقش مهم تفکیک دیواره از کف را بر عهده می‌گیرد. لذا براساس نظریه‌ی لاندرگن و جانسون برای محاسبه‌ی تنش برشی جداره در هر نقطه، می‌توان از المان‌هایی که از یک سمت عمود بر جداره و از سوی دیگر به این منحنی می‌رسند، استفاده کرد.

در تحقیقات قبلی برای پیش‌بینی محل و رابطه دقیق این منحنی به این شکل عمل شده است: ابتدا در یک کانال مستقیم و منشوری صاف دوزنقه‌ای و یا مستطیلی (حالتی خاص از دوزنقه‌ای)، از ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم، معادله سومی حاصل می‌شود. از معادله به دست آمده، در شکل دیفرانسیلی روی مرز مشخصی که در ابتدا به شکل دلخواه برای منطقه کف منظور شده، انتگرال‌گیری شده است که با اعمال شرایط مرزی، در نهایت تنش برشی متوسط کف یا دیواره به صورت تابعی از A_b یا A_w و همچنین ترم‌های دیفرانسیلی از جریان‌های ثانویه و تنش‌های برشی محاسبه شده است. در این مرحله دو فرض ساده کننده وارد می‌شوند که چشم‌پوشی از اثر جریان‌های ثانویه و همچنین تنش‌های برشی رینولدزی هستند. بنابراین رابطه‌های تنش برشی متوسط کف و دیواره، در این مرحله فقط توابعی از A_b یا A_w هستند. برای محاسبه A_b و A_w نیاز است که منحنی متعامد اصلی که از آن نام برده شد (از گوشه‌ها شروع و به سطح می‌رسد)، تعیین شود. بنابراین با استفاده از فرضهای ساده کننده گفته شده، رابطه مومنتوم به معادله پواسون تبدیل شد. این معادله برای جریان چرخشی قابل استفاده است و با شیوه‌ای عددی یا روش کاربردی نگاشت همدیسی قابل حل است. بنابراین در تحقیقات قبلی نیز با استفاده از روش نگاشت همدیسی و به طور اخص، تبدیل شوارتز- کریستوفل، این رابطه به شکل غیرمستقیم حل شده است [۷ و ۸]. منظور از حل غیر مستقیم این رابطه، پیدا کردن منحنی‌های متعامد است که به کمک آنها بتوان تنش برشی جداره را تخمین زد. بنابراین روی مقطع دوزنقه‌ای، فرم کلی تبدیل شوارتز- کریستوفل پیاده شد. در این تبدیل دو صفحه فیزیکی و مجازی در نظر گرفته می‌شود و جداره

از سه روش موجود برای تخمین سرعت متوسط در کانال‌ها و همچنین بهره‌گیری از مرزهای نام برده، توزیع سرعت متوسط عمقی به دست آمده و با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شد.

۲- مدل تحلیلی

۱-۲- روش تحلیلی

فرشی در سال ۱۳۸۹ و فرشی و همکاران در سال ۱۳۹۰، با فرض یک جریان توسعه یافته و یکنواخت در طول یک کانال منشوری با جداره صاف دوزنقه‌ای، تنش برشی متوسط کف و دیواره را در حالت کلی و توزیع تنش برشی را در کانال‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی با مقطع بی‌نهایت محاسبه نموده‌اند [۷ و ۸]. معادلات بنیادین استفاده شده برای محاسبه این پارامترها، پیوستگی و مومنتوم هستند. در مورد کانال‌های مستطیلی، توزیع تنش برشی متوسط کف و دیواره قبلاً توسط گوو و ژولین به دست آمده است [۵]. در تحقیق حاضر سرعت متوسط عمقی در مقاطع ذکر شده با استفاده از توزیع تنش برشی محاسبه شده در پژوهش فرشی در سال ۱۳۹۰ به سه روش محاسبه شد [۷]. توزیع تنش برشی در یک مقطع را می‌توان بر پایه‌ی تئوری لاندرگن^۱ و جانسون^۲ محاسبه نمود. در این روش در یک جریان توسعه یافته و یکنواخت، تنش برشی در هر نقطه از جداره کانال، از حاصل ضرب $\rho g S_0$ (جرم حجمی آب، g شتاب جاذبه و S_0 شیب کانال) در اندازه المانی که از یک طرف بر جداره عمود بوده و از طرف دیگر به سطح آب می‌رسد، به دست می‌آید. سطح آب در تئوری آن‌ها مرزی با تنش برشی صفر فرض شده است [۲۲].

نظریه اساسی دیگر مربوط به انیشتین است که سطح مقطع کانال مستطیلی را به دو بخش مساحت مربوط به کف A_b و دیواره A_w تقسیم و فرض کرده که وزن قسمت A_b با مقاومت بستر خنثی می‌شود و وزن قسمت A_w با مقاومت دیواره به تعادل می‌رسد [۷ و ۸]. همچنین فرض کرده که هیچ نوع اصطکاکی بین دو مرز وجود ندارد. همین فرضیه در مورد انرژی پتانسیل موجود در ناحیه کف دیواره نیز برقرار است. به عبارت دیگر، انرژی پتانسیل ناحیه کف در بخش مربوط به کف و انرژی پتانسیل ناحیه دیواره در بخش مربوط به دیواره به انرژی جنبشی تبدیل شده و مصرف می‌شوند [۲۳]. بنابراین با استفاده از این تئوری می‌توان توزیع تنش برشی متوسط کف و دیواره کانال‌ها را به طور جداگانه با تقسیم‌بندی سطح مقطع کانال به دو منطقه کف و دیواره محاسبه کرد.

¹Lundgren
²Jonsson

³ Orthogonals

جریان‌های ثانویه و تنش‌های برشی رینولدزی، دو ترم وابسته به دو پارامتر در رابطه‌های تنش برشی متوسط کف و دیواره معرفی، و با استفاده از شرایط مرزی محاسبه شدند. به این ترتیب توزیع تنش برشی متوسط کف و دیواره در مقاطع دوزنقه‌ای به‌طور دقیق محاسبه شد. پس از این مرحله به مقاطع بهینه پرداخته شده است [۷]. در این حالت نسبت عرض به ارتفاع مقطع بهینه در رابطه تنش برشی متوسط کف وارد شده و مقادیرهای تنش برشی متوسط کف و دیواره برای مقاطع بهینه به‌دست آمد. سپس با یک برنامه‌نویسی کامپیوتری برای یک رابطه انتگرالی که سمت چپ آن مقدار تنش برشی متوسط کف محاسبه شده و در سمت راست آن حاصل جمع انتگرال‌هایی که مقدار تنش برشی متوسط را به‌دست می‌دهند، توزیع تنش برشی کف و دیواره برای مقاطع بهینه دوزنقه‌ای و مستطیلی با جداره صاف به‌دست آمد [۷].

همان‌طور که توضیح داده شد، توزیع تنش برشی کف و یا دیواره در این حالت، در واقع حاصل ضرب $\rho g S_0$ در المانی است که از یک سو بر کف یا دیواره عمود است و از سوی دیگر به این متعامد می‌رسد. با این شکل، با ثابت در نظر گرفتن $\rho g S_0$ ، این منحنی‌ها به‌شکل دقیق برای مقاطع بهینه به‌دست آمد. خاصیت مهم این منحنی‌ها، جدا کردن منطقه کف از دیواره است که از این خاصیت مهم برای محاسبه توزیع سرعت متوسط عمقی که هدف این تحقیق است، استفاده شد.

رابطه این منحنی برای محاسبه تنش برشی کف روی جداره‌ی صاف چند مقطع در شرایط بهینه و برای نیمه سمت راست به شکل زیر ارائه شده است

$$\theta=45^\circ \begin{cases} y = 1.207b & 0 \leq z \leq 0.003b \\ y = -\frac{29.07}{b^2}z^3 + \frac{18.8}{b}z^2 - 5.222z + 1.223b & 0.003b < z \leq 0.375b \\ y = -1.304b \ln\left(\frac{2z}{b}\right) & 0.375b < z \leq 1.707b \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta=60^\circ \begin{cases} y = 0.866b & 0 \leq z \leq 0.001b \\ y = -\frac{90.9}{b^2}z^3 + \frac{42.3}{b}z^2 - 6.22z + 0.873b & 0.001b < z \leq 0.263b \\ y = -0.793b \ln\left(\frac{2z}{b}\right) & 0.263b < z \leq \frac{b}{2} \end{cases} \quad (2)$$

مقطع در صفحه فیزیکی، به‌عنوان مسیر حرکت برای نوشتن فرم کلی این تبدیل لحاظ می‌شود. روی این مسیر، نقاط شکستگی، جزء مکان‌هایی هستند که توان‌های فرم دیفرانسیلی تبدیل شوارتز-کریستوفل را معلوم می‌کنند. برای مقطع مستطیلی که توسط گو و جولین در سال ۲۰۰۵ ارائه شده است، این توان‌ها برابر با $0/5-$ به‌دست آمده‌اند. در این حالت انتگرال به‌صورت کاملاً تحلیلی قابل حل است ولی در حالت‌های غیر از مستطیلی (دوزنقه‌ای)، این توان‌ها برابر با $0/\pi-\theta$ است (θ زاویه‌ی جداره‌ی کانال با افق را تشکیل می‌دهد). هنگامی که از فرم دیفرانسیلی تبدیل شوارتز-کریستوفل در حالتی غیر از $0/5-$ انتگرال‌گیری شد، به تابعی پیچیده موسوم به هاپر ژئومتریک ${}_2F_1$ برخورد شد که ساده‌ترین فرم آن تابع بتا^۱ است. بنابراین با یک برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار Mathematica، انتگرال نام‌برده به‌صورت عددی حل شده است. با حل عددی انتگرال توسط نرم‌افزار، ماتریس‌هایی با 10×10 مولفه به‌دست آمد که در آنها منحنی‌هایی موسوم به "هم‌سرعت"^۲ و عمودهای وارد بر آنها (متعامدها) به‌صورت توابعی از مختصات هندسی مقطع در آنها مرتب شده‌اند. بنابراین رابطه‌هایی برای این منحنی‌ها، در حالتی که اثر فرض‌های ساده‌کننده وجود دارد، به‌دست آمده است. متعامد مرزی مهم‌تر نیز در این حالت یک رابطه مشخصه دارد که می‌توان با انتگرال‌گیری مساحت منطقه محصور در بین دو متعامد مرزی، A_b و به تبع آن A_w را محاسبه کرد و تخمین اولیه‌ای از مساحت منطقه‌ی کف ارائه داد. در مرحله بعد به‌جای اثر

¹ Hypergeometric2F1

² Beta function

³ Isovels

$$\theta=75^\circ \begin{cases} y = -\frac{43.7}{b^2}z^3 + \frac{18.9}{b}z^2 - 3.11z + 0.652b & 0 < z \leq 0.256b \\ y = -0.542b \ln\left(\frac{2z}{b}\right) & 0.256b < z \leq \frac{b}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta=90^\circ \begin{cases} y = \frac{18.7}{b^2}z^3 - \frac{13.9}{b}z^2 + 2.08z + 0.338b & 0 < z < 0.26b \\ y = -\frac{b}{\pi} \ln \tan\left(\frac{\pi z}{2b}\right) & 0.26b \leq z \leq \frac{b}{2} \end{cases} \quad (4)$$

دوران محورهای مختصات استفاده می‌شود، به‌شکلی که محور عرضی مماس و محور دیگر عمود بر دیواره قرار گیرد. به این ترتیب، رابطه مرزهای جداکننده دیواره از کف با محور افقی مماس بر دیواره برای چهار مقطع ذکر شده، به‌شکل زیر است و پارامترهای مختلف آن در شکل ۲ نیز آورده شده است.

که در این روابط m کتانژانت زاویه θ ، b عرض در کف کانال، z مختصات عرضی مقطع با مرکز مختصات در محل محور تقارن و y محور مختصات عمود بر z است که از کف آغاز می‌گردد (پارامترهای مختلف این رابطه‌ها، در شکل ۱ نیز معرفی شده است). لازم به‌ذکر است که برای محاسبه تنش برشی دیواره، از انتقال و

$$\theta=45^\circ \begin{cases} y'_1 = \frac{1.184}{b}z_1'^2 + 1.795z_1' & 0 \leq z_1' \leq 0.175b \\ y'_1 = \frac{31.216}{b^2}z_1'^3 - \frac{29.471}{b}z_1'^2 + 11.038z_1' - 0.8465b & 0.175b < z_1' \leq 0.5b \\ y'_1 = -z_1' + 1.707b & 0.5b < z_1' \leq 1.707b \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta=60^\circ \begin{cases} y'_1 = \frac{0.703}{b}z_1'^2 + 1.173z_1' & 0 \leq z_1' \leq 0.325b \\ y'_1 = \frac{165.5}{b^2}z_1'^3 - \frac{196.67}{b}z_1'^2 + 78.977z_1' - 10.118b & 0.325b < z_1' \leq 0.5b \\ y'_1 = \sqrt{3}(b - z_1') & 0.5b < z_1' \leq b \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta=75^\circ \begin{cases} y'_1 = \frac{-1.298}{b}z_1'^2 + 1.51z_1' & 0 < z_1' \leq 0.286b \\ y'_1 = \frac{1702.7}{b^3}z_1'^4 - \frac{2734.2}{b^2}z_1'^3 + \frac{1621.9}{b}z_1'^2 - 419.2z_1' + 40.155b & 0.286b < z_1' \leq 0.5b \\ y'_1 = 3.73(-z_1' + 0.675b) & 0.5b < z_1' \leq 0.675b \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta=90^\circ \begin{cases} y'_1 = \frac{-0.537}{b}z_1'^2 + 1.043z_1' & 0 \leq z_1' \leq 0.338b \\ y'_1 = \frac{403.62}{b^2}z_1'^3 - \frac{448.14}{b}z_1'^2 + 167.12z_1' - 20.587b & 0.338b < z_1' \leq 0.426b \\ y'_1 = 0.5b & 0.426b < z_1' \leq 0.5b \end{cases} \quad (8)$$

که در روابط بالا z'_1 و y'_1 به‌ترتیب معرف محورهای جدید حاصل از انتقال و دوران محورهای z و y هستند.

شود، و پس از آن رابطه این سرعتها در هر فاصله نسبت به مختصات هندسی جداره تعیین شود، توزیع سرعت متوسط عمقی در هر مقطع به دست می آید. برای محاسبه سرعت متوسط عمقی در فواصل مشخص از مبدأ، از رابطه ۹ استفاده می شود؛ به این شکل که با داشتن توزیع تنش برشی یک مقطع، در مختصاتهای مختلف جداره کانال می توان سرعت متوسط عمقی را محاسبه نمود. توضیح اینکه در رابطه ۹، سرعت برشی از توزیع تنش برشی جداره محاسبه می شود و بسته به اینکه در ناحیه کف و یا دیواره واقع شود، از رابطه مخصوص به کف یا دیواره بهره گیری می شود.

توزیع تنش برشی کف و دیواره برای مقاطع بهینه نام برده، به دست آمد. در هر فاصله مشخص از مبدأ و در هر سه روش نام برده، روند محاسبه توزیع سرعت متوسط عمقی به این شکل بود که اگر نقطه مورد نظر برای تعیین سرعت، با توجه به رابطه مرز جداکننده، در ناحیه کف واقع می شد، y_w عمود بر دیواره منظور می شد و بسته به قرارگیری در هر ناحیه، از رابطه مربوط به آن (کف یا دیواره)، تنش برشی و به تبع آن سرعت برشی تعیین می شد. حال به تشریح هر سه روش در به کارگیری روند بالا پرداخته می شود. در روش اول، همان طور که توضیح داده شد، از رابطه ۹ روی عمق انتگرال گیری می شود. ثابت شده که فرم ساده شده این انتگرال به شکل زیر است [۲۵]

$$U_d = u_{\max} - 3.75u_* \quad (10)$$

که در این رابطه

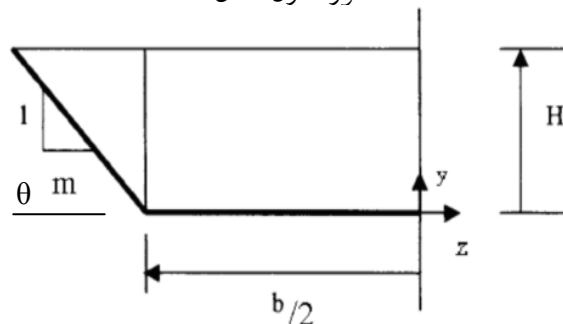
U_d سرعت متوسط عمقی در هر مقطع دلخواه نسبت به خط تقارن است و u_{\max} سرعت بیشینه در مقطع مورد نظر است. بنابراین در روش اول نیاز است از نقطه ای استفاده شود که در آن سرعت بیشینه در آن ناحیه قرار می گیرد و بنابراین u_* با توجه به آن تعیین می شود. براساس رابطه لگاریتمی سرعت (رابطه ۹)، سرعت بیشینه در هر فاصله مشخص از مبدأ، از سرعت برشی که y آن بیشینه است به دست می آید. لازم به ذکر است که طبق آزمایش های تامینگا و همکاران، پدیده ی پایین افتادگی سرعت در مقاطع دوزنقه ای روی محور تقارن مقطع اتفاق نمی افتد [۳]. اما برای تعیین میزان پایین افتادگی موقعیت سرعت بیشینه روی محور تقارن مقطع مستطیلی از رابطه ی یانگ و همکاران استفاده می شود [۲۶]

$$\frac{\delta}{H} = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (11)$$

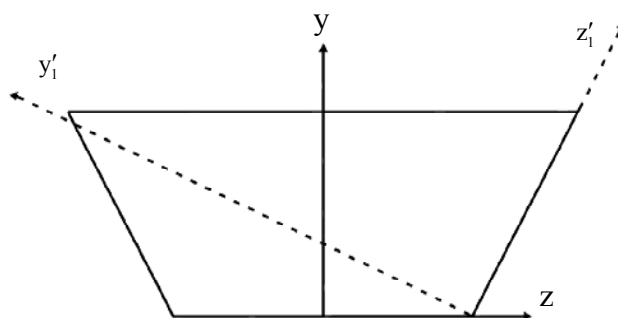
که در این رابطه

δ مختصات y برای سرعت بیشینه و α فاکتوری برابر با $\exp(-z/H)/3$ است به شرطی که مرکز مختصات در گوشه سمت چپ مقطع واقع شده باشد. بنابراین برای محور تقارن یک مقطع

محور تقارن کانال



شکل ۱- پارامترهای مختلف مقاطع دوزنقه ای



شکل ۲- پارامترهای مختلف مقاطع دوزنقه ای برای دیواره

۲-۲- سرعت متوسط عمقی

رابطه ی متداولی که در کانال های صاف، تنش برشی جداره را به سرعت های نقطه ای مرتبط می کند، به صورت زیر است [۳]

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{u_* y_w}{\nu} \right) + B \quad (9)$$

که در این رابطه

$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ سرعت برشی (τ_0 تنش برشی جداره)، y_w برای کف برابر با y و برای دیواره برابر با y_1 است، u سرعت طولی کانال، ν لزجت سینماتیکی آب و B یک مقدار ثابت برابر با $5/5$ برای کانال های با $H/b \leq 0/5$ و $5/3$ برای کانال های با $0/5 < H/b$ است [۱]. برای محاسبه سرعت متوسط عمقی در یک مقطع مشخص با فاصله معلوم از محور تقارن، سه روش مختلف وجود دارد: در روش اول از رابطه ی ۹ در عمق، انتگرال گیری می شود. در روش دوم، مقدار متوسط سرعت های نقطه ای در عمقهای $0/2H$ و $0/8H$ در هر مقطع محاسبه می شود و در روش سوم، سرعت های نقطه ای $0/6H$ در هر مقطع برای توزیع سرعت متوسط عمقی در کل مقطع منظور می شود. بنابراین برای محاسبه سرعت متوسط عمقی در یک مقطع مشخص، اگر به هر سه روشی که توضیح داده شد، سرعت متوسط عمقی در هر فاصله مشخص از مبدأ محاسبه

و باتوجه به اینکه همه از رابطه ۹ استفاده کرده‌اند، شکل نهایی مربوط به توزیع سرعت متوسط عمقی نیز در هر سه روش با فرمی کلی از رابطه ۹ به دست می‌آید با این تفاوت که در هر مقطع، دو پارامتر F_1 و F_2 معرفی شده‌اند که نقششان، بیان رابطه‌ی U_d با مختصات z مقطع است. در این تحقیق فرم کلی توزیع سرعت متوسط عمقی با سه روش شرح داده شده، به شکل زیر به دست می‌آید

$$\frac{U_d}{\sqrt{bgS_0}} = \left[F_1 + F_2 \ln \left(\frac{b^{3/2} \sqrt{gS_0}}{v} \right) \right] \quad (12)$$

که در این رابطه

U_d سرعت متوسط عمقی و F_1 و F_2 به صورت تابعی چندجمله‌ای از z/b هستند. این پارامترها به شکل رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ برای مقاطع دوزنقه‌ای و رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ برای مقاطع مستطیلی به دست می‌آیند. ثابت‌های مربوط به این پارامترها در جدول‌های ۱ تا ۸ مرتب شده است.

$$F_1 = \begin{cases} A_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + B_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + C_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + D_{11} \left(\frac{z}{b}\right) + E_{11} & 0 \leq z \leq 0.5b \\ A_{12} \left(\frac{z}{b}\right)^5 + B_{12} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + C_{12} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + D_{12} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + E_{12} \left(\frac{z}{b}\right) + F_{12} & 0.5b < z \leq b \end{cases} \quad (13)$$

$$F_2 = \begin{cases} A_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + B_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + C_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + D_{21} \left(\frac{z}{b}\right) + E_{21} & 0 \leq z \leq 0.5b \\ A_{22} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + B_{22} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + C_{22} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + D_{22} \left(\frac{z}{b}\right) + E_{22} & 0.5b < z \leq b \end{cases} \quad (14)$$

$$F_1 = A_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^5 + B_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + C_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + D_{11} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + E_{11} \left(\frac{z}{b}\right) + F_{11} \quad 0 \leq z \leq 0.5b \quad (15)$$

$$F_2 = A_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^4 + B_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^3 + C_{21} \left(\frac{z}{b}\right)^2 + D_{21} \left(\frac{z}{b}\right) + E_{21} \quad 0 \leq z \leq 0.5b \quad (16)$$

جدول ۱- ثابت‌های رابطه ۱۳ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 60^\circ$

F_{12}	E_{12}	D_{12}	C_{12}	B_{12}	A_{12}	E_{11}	D_{11}	C_{11}	B_{11}	A_{11}	F_1
-۱۶۶	۱۲۳۲	-۳۵۸۰	۵۱۲۳	-۳۶۳۰	۱۰۲۰	۰/۹۴	-۱۲	۹۷	-۳۱۶	۳۲۰	روش اول
۴	-۷	۰	۰	۰	۰	۲	-۱۷	۱۲۴	۳۳۶	۲۸۲	روش دوم
-۶۱	۳۳۰	-۶۳۶	۵۳۶	-۱۷۰	۰	۳	-۲۱	۱۴۱	-۳۰۳	۰	روش سوم

بهینه مستطیلی، این فاکتور برابر با $0/676H$ یا $0/338b$ به دست می‌آید.

در روش دوم، در هر فاصله مشخص از مبدأ، نقاطی برای محاسبه u در نظر گرفته می‌شوند که در اعماق $0/2H$ و $0/8H$ واقع شده‌اند. بنابراین در برخی از فواصل، هر دو نقطه در یک ناحیه و در برخی دیگر در دو ناحیه واقع شده‌اند. در نهایت برای هر فاصله مشخص از مبدأ، از مقدار سرعت‌های به دست آمده میانگین‌گیری می‌شود. روش سوم مشابه روش دوم است با این تفاوت که در هر فاصله مشخص از مبدأ، تنها از یک نقطه در موقعیت $0/6H$ استفاده می‌شود که این نقطه می‌تواند در ناحیه کف و یا دیواره قرار گیرد. برای هر سه روش، در محیط نرم‌افزار Mathematica، برنامه‌ای نوشته شده است که با توجه به نوع روش، سرعت هر نقطه تعیین می‌شود. در روش اول و سوم، سرعت تعیین شده در هر مختصات، توسط برنامه به عنوان سرعت آن مختصات خاص در نظر گرفته می‌شود ولی در روش دوم، از سرعت‌های محاسبه شده در هر مختصات، میانگین‌گیری شده و به عنوان سرعت آن مختصات منظور شده است. پس از آن، در هر روش، سرعت‌های متوسط عمقی محاسبه شده نسبت به مختصاتشان، در ماتریس‌هایی مرتب شده‌اند

جدول ۲- ثابت‌های رابطه ۱۴ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 60^\circ$

E ₂₂	D ₂₂	C ₂₂	B ₂₂	A ₂₂	E ₂₁	D ₂₁	C ₂₁	B ₂₁	A ₂₁	F ₂
۷	-۱۹	۲۶	-۱۴	۰	۲	-۸	۶۳	-۱۹۴	۱۷۲	روش اول
۱۰	-۵۲	۱۱۸	-۱۰۹	۳۴	۲	-۱۱	۹۰	-۲۷۲	۲۶۰	روش دوم
-۴۹	۲۸۲	-۵۷۲	۵۰۹	-۱۶۹	۲	-۹	۶۱	-۱۳۲	۰	روش سوم

جدول ۳- ثابت‌های رابطه ۱۳ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 45^\circ$

F ₁₂	E ₁₂	D ₁₂	C ₁₂	B ₁₂	A ₁₂	E ₁₁	D ₁₁	C ₁₁	B ₁₁	A ₁₁	F ₁
۰	۶	-۱۰	۳	۰	۰	۲	-۱۴	۶۸	-۱۷۲	۱۳۳	روش اول
-۴/۱	۱۸/۹	-۱۴/۶	۲/۹	۰	۰	۴/۲	-۲۴	۱۷۶/۹	-۴۹۴/۴	۴۴۱/۶	روش دوم
-۵/۶	-۳/۴	۲/۳	-۱/۳۵	۰	۰	۵/۲	-۱۵/۴	۲۱/۶	۶۳/۸	-۱۰۶/۷	روش سوم

جدول ۴- ثابت‌های رابطه ۱۴ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 45^\circ$

E ₂₂	D ₂₂	C ₂₂	B ₂₂	A ₂₂	E ₂₁	D ₂₁	C ₂₁	B ₂₁	A ₂₁	F ₂
۳/۵	-۳/۵	۲/۹	-۱/۱	۰	۲/۸	-۶/۸	۲۶/۱	-۴۴/۸	۰	روش اول
-۵/۶	۳۰/۵	-۴۱/۲	۲۳/۷	-۵/۲	۲/۸	-۱۰/۶	۸۰/۴	-۲۳۷	۲۲۴/۴	روش دوم
-۱/۸	۵/۶	-۱۱/۱	۷/۷	-۲/۱	۲/۸	-۷/۴	۲۲/۶	-۱۵/۸	۰	روش سوم

جدول ۵- ثابت‌های رابطه ۱۳ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 75^\circ$

E ₂₂	D ₂₂	C ₂₂	B ₂₂	A ₂₂	E ₂₁	D ₂₁	C ₂₁	B ₂₁	A ₂₁	F ₂
۵۸/۱	-۲۹۴/۸	۵۲۳/۶	-۳۱۶/۸	۰	۱/۹	-۱/۷	۲/۶	-۱۲/۴	۰	روش اول
-۶۶۸/۶	۴۹۵۶/۱	-۱۳۷۲۶	۱۶۸۶۹	-۷۷۶۰/۳	۱/۹	-۱	۰	۰	۰	روش دوم
۳۳۳۱/۳	-۲۳۳۴۶	۶۱۰۵۹	-۷۰۵۸۶	۳۰۴۲۷	۲	-۱/۷	-۲/۴	۸/۸	۰	روش سوم

جدول ۶- ثابت‌های رابطه ۱۴ برای مقطع بهینه دوزنقه‌ای با $\theta = 75^\circ$

E ₂₂	D ₂₂	C ₂₂	B ₂₂	A ₂₂	E ₂₁	D ₂₁	C ₂₁	B ₂₁	A ₂₁	F ₂
۵۸/۱	-۲۹۴/۸	۵۲۳/۶	-۳۱۶/۸	۰	۱/۹	-۱/۷	۲/۶	-۱۲/۴	۰	روش اول
-۶۶۸/۶	۴۹۵۶/۱	-۱۳۷۲۶	۱۶۸۶۹	-۷۷۶۰/۳	۱/۹	-۱	۰	۰	۰	روش دوم
۳۳۳۱/۳	-۲۳۳۴۶	۶۱۰۵۹	-۷۰۵۸۶	۳۰۴۲۷	۲	-۱/۷	-۲/۴	۸/۸	۰	روش سوم

جدول ۷- ثابت‌های رابطه ۱۵ برای مقطع بهینه مستطیلی

F ₁₁	E ₁₁	D ₁₁	C ₁₁	B ₁₁	A ₁₁	F ₁
۱/۷	-۴/۷	۱۶/۸	-۵۸/۲	۴۳/۹	۰	روش اول
۰/۳۸۱	-۶/۴	۱۱۴/۳	-۸۴۳	۲۳۷۳/۳	-۲۳۲۸/۳	روش دوم
۰/۷	۶/۳	-۴۲/۱	۵۵/۵	۰	۰	روش سوم

جدول ۸- ثابت‌های رابطه ۱۶ برای مقطع بهینه مستطیلی

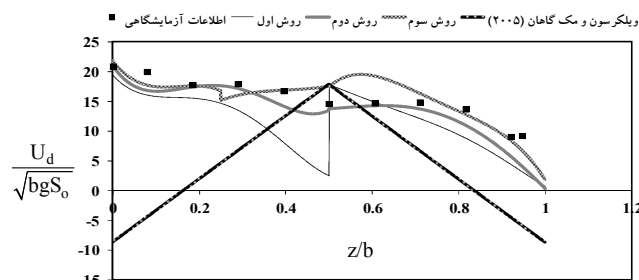
E ₂₁	D ₂₁	C ₂₁	B ₂₁	A ₂₁	F ₂
۱/۵	۲/۲	-۱۲/۹	۷/۹	۰	روش اول
۱/۵	۱/۹	-۱۱/۸	۱۲/۹	۰	روش دوم
۱/۵	۴/۱	-۲۷	۳۴/۱	۰	روش سوم

۳- مدل سازی آزمایشگاهی

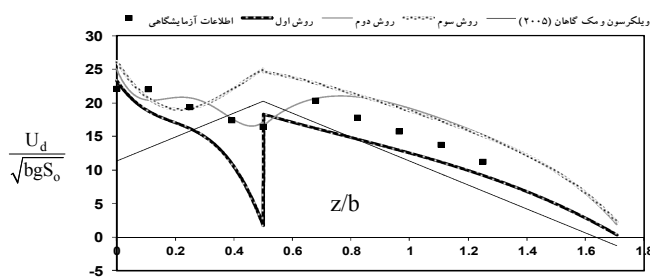
کمتری دارد. همچنین در این روش، اصل عدم لغزش در گوشه انتهای مقطع ارضا نمی شود.

روش اول نسبت به دیگر روشها دقت کمتری دارد که دلیل اصلی آن مقدار u_{max} در هر فاصله مشخص از محور تقارن است. این پارامتر در کلیه مقاطع نام برده، در محل محور تقارن مقدار مشخصی دارد، ولی در دیگر فاصله ها از محور تقارن برای محاسبه آن نیاز است تا منحنی های هم سرعت دقیقاً تعیین شوند. مشکل دیگر این روش، پرش ناگهانی است که در محل اتصال کف و دیواره رخ می دهد. در این نقطه مقدار u_{max} متأثر از هر دو ناحیه کف و دیواره است. باید توجه داشت که این پرش در مقطع مستطیلی به دلیل قائم بودن دیواره اتفاق نمی افتد. دلیل اصلی مناسب تر بودن روش دوم نسبت به دیگر روشها، در نظر گرفتن دو نقطه (یکی نزدیک به کف و دیگری نزدیک به سطح آب) در هر مقطع است. بنابراین در هر مقطع، به شکل بهتری آثار هم زمان کف و دیواره منظور می شود.

برای اعتبار بخشیدن به مدل تئوری ارائه شده، آزمایش هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. مدل های آزمایشگاهی برای دو کانال دوزنقه ای با $\theta=45^\circ$ و $\theta=60^\circ$ درجه ساخته شده و نتایج تئوری با اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده، مقایسه شد. نتایج تئوری مربوط به کانال مستطیلی نیز با اطلاعات آزمایشگاهی پژوهشهای گذشته مقایسه شد که به دلیل مشابهت نتایج با دو کانال دیگر ارائه نشد. [۳]. فلوم آزمایشگاهی که مقاطع دوزنقه ای با $\theta=45^\circ$ و $\theta=60^\circ$ درجه در آن نصب شد، کانالی مستطیلی با عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی متر و طول ۸ متر و جنس جداره کانال شیشه ای بود. شیب کانال ۰/۰۰۱ تنظیم شد. آب توسط پمپ از مخزن به مدخل ورودی کانال، هدایت می شد. در مدخل ورودی کانال، صفحات مشبکی تعبیه شده بود تا جریان به حالت غیر آشفتنه و آرام به کانال وارد شود. در انتهای کانال یک سرریز لبه تیز مثلثی برای اندازه گیری دبی جریان تعبیه شده بود. آب بعد از عبور از سرریز مجدداً به مخزن بازگشته و به این ترتیب جریان یک سیکل بسته را طی می کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- توزیع سرعت متوسط عمقی به سه روش در پژوهش حاضر در مقایسه با اطلاعات آزمایشگاهی و مرجع [۱۶] برای نیمه سمت راست مقطع بهینه دوزنقه ای با الف- $\theta=60^\circ$ و ب- $\theta=45^\circ$

مقایسه نتایج پژوهش ویلکرسون و مک گاهان با اطلاعات آزمایشگاهی، نشان می دهد که روش ارائه شده توسط این محققان برای کانال های غیرعریض مناسب نیست، وجود مقادیر منفی در نتایج آنها و همچنین اختلاف زیاد نتایج ایشان با اطلاعات آزمایشگاهی، این مطلب را تأیید می کند. دلیل این مسئله این است

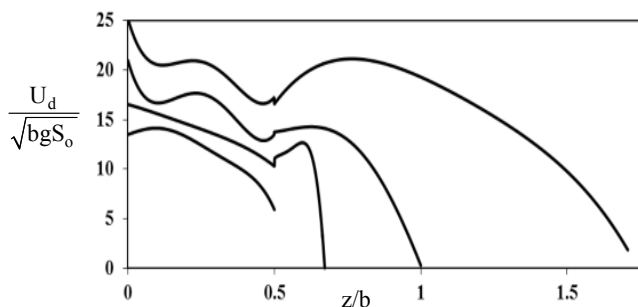
مقطع منتخب برای برداشت اطلاعات، ۴/۸ متری ابتدای کانال در نظر گرفته شد. برای اطمینان از برقراری جریان یکنواخت در این مقطع، پروفیل های سرعت در ۵۰ سانتی متر قبل و بعد از این مقطع به دست آمد و از مشابه بودن پروفیل های سرعت در این دو مقطع و مقایسه آزمایش ها و نیز مشابه بودن با پروفیل لگاریتمی سرعت نتیجه گیری شد که مقطع منتخب برای برداشت اطلاعات مناسب است. در آزمایش های انجام شده، از لوله پیتوت استاتیکی^۱ یک بعدی برای اندازه گیری سرعت های نقطه ای در عمق روی هر فاصله مشخص است. سپس از سرعت های نقطه ای در عمق روی هر فاصله مشخص از جریان میانگین گیری به عمل آمد و به عنوان سرعت متوسط عمقی در آن نقطه منظور و با نتایج تئوری مقایسه شد.

۴- نتایج و بحث

شکل های ۳- الف و ۳- ب نتایج حاصل از سه روش نام برده را در مقایسه با اطلاعات آزمایشگاهی و روش ویلکرسون و مک گاهان برای نیمه سمت راست مقطع بهینه دوزنقه ای با $\theta=60^\circ$ و $\theta=45^\circ$ نشان می دهند. از مقایسه این روشها با اطلاعات آزمایشگاهی می توان قضاوت کرد که روش دوم از دقت مناسب تری نسبت به دیگر روشها برخوردار است. روش سوم در مرتبه دوم قرار می گیرد که به دلیل استفاده از یک نقطه به جای دو نقطه از روش دوم دقت

¹ Static pitot tube

نقشه برداری استفاده شود. شکل ۴ توزیع سرعت متوسط عمقی را برای گوشه سمت راست کلیه مقاطع نام برده به روش دوم نشان می دهد.



شکل ۴- توزیع سرعت متوسط عمقی به روش دوم برای نیمه سمت راست مقاطع بهینه دوزنقه ای و مستطیلی

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، توزیع سرعت متوسط عمقی با استفاده از منحنی لگاریتمی سرعت و مرزهای فرضی جداکننده کف از دیواره، به سه روش برای چهار مقطع بهینه دوزنقه ای و مستطیلی به دست آمد. هر سه روش بر پایه رابطه لگاریتمی سرعت هستند. در روش اول، از انتگرال این رابطه روی عمق در هر فاصله مشخص از مبدأ استفاده می شود. در روش دوم، از میانگین گیری سرعت های نقطه ای روی اعماق $0.2H$ و $0.8H$ بهره گیری می شود و در روش سوم، در هر فاصله مشخص از مبدأ، سرعت نقطه ای $0.6H$ منظور می شود. منحنی های به دست آمده با اطلاعات آزمایشگاهی و پژوهش ویلکرسون و مک گاهان در سال ۲۰۰۵ مقایسه شد. نتایج حاصل از روش اول به دلیل نامشخص بودن وضعیت سرعت بیشینه در مقاطع غیر از محور تقارن، دقت کمتری داشت. روش سوم دقت بهتری نسبت به روش اول داشت، ولی این روش، شرط عدم لغزش را در نقطه انتهایی خود که به جداره متصل می شود، ارضا نمی کند. نتایج حاصل از روش دوم نسبت به روشهای دیگر بهتر بود که دلیل آن، متأثر بودن کلیه مقاطع از آثار هم زمان کف و دیواره است. در این روش مقدار متوسط سرعت های نقطه ای در عمقهای $0.2H$ و $0.8H$ در هر مقطع (فاصله مشخص از مبدأ)، محاسبه و به عنوان سرعت متوسط عمقی روی آن منظور می شود. پس از آنالیز حساسیت مشخص شد که یکی از علل مهم تفاوت نتایج تئوری با اطلاعات آزمایشگاهی، تنظیم دقیق شیب در فلوم آزمایشگاهی است. نتایج حاصل از پژوهش ویلکرسون و مک گاهان نشان می دهد که رابطه پیشنهادی آنها برای مقاطع غیر عریض مناسب نیست.

که آنها در روش خود، پارامترهای مربوط به رابطه پیشنهادی را با اطلاعات میدانی کانال های عریض واسنجی کرده اند، در حالی که در کانال عریض، مدل جریان های ثانویه با کانال های غیر عریض، کاملاً متفاوت است. باید توجه داشت که مقطع بهینه دوزنقه ای با $\theta = 45^\circ$ ، به دلیل شرایط هندسی که بهترین مقطع هیدرولیکی به آن تحمیل می کند، دارای سطح آزاد بزرگ تری است و مشابهت بیشتری با شرایط کانال های عریض پیدا می کند. بنابراین روش ویلکرسون و مک گاهان روی این مقطع جوابهای بهتری دارد که این مطلب به خوبی در شکل ۳-ب نمایان است.

به دلیل مناسب تر بودن روش دوم نسبت به بقیه روشها، توابع خطای $NRMSE$ ، WQD ، و R^2 برای روش دوم نسبت به اطلاعات آزمایشگاهی محاسبه شد که این مقادیر به ترتیب در حدود 0.15 ، 0.19 ، و 0.94 به دست آمد که حاکی از دقت مناسب روش دوم است. توابع خطای نام برده به شکل زیر تعریف می شوند

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum [f(x) - F(x)]^2}}{\sqrt{\sum [f(x) - \bar{f}(x)]^2}} \quad (17)$$

$$WQD = \frac{\sqrt{\sum [f(x)F(x)[f(x) - F(x)]^2]}}{\sum [f(x)F(x)]} \quad (18)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum [f(x) - F(x)]^2}{\sum [f(x) - \bar{f}(x)]^2} \quad (19)$$

که در این روابط

$f(x)$ ، $\bar{f}(x)$ و $F(x)$ به ترتیب داده های اندازه گیری شده آزمایشگاهی، مقادیر میانگین آنها و مقادیرهای تخمین زده شده تئوری هستند. با وجود نزدیکی روند اطلاعات به نتایج تئوری لازم است برای پارامترهای مؤثر بر نتایج آنالیز حساسیت انجام شود. به این شکل که با دیفرانسیل گیری از رابطه های ارائه شده و وارد کردن مقدار خطای اندازه گیری هر پارامتر می توان تعیین نمود که نتایج به اندازه گیری دقیق کدام پارامتر حساس تر هستند و خطای احتمالی می تواند ناشی از اندازه گیری چه پارامتری باشد. با آنالیز حساسیت رابطه های تنش برشی و توزیع سرعت متوسط عمقی مشخص شد که هنگام بی بعد سازی با تغییر ۲ تا ۳ درصدی شیب کف کانال، نتایج تا ۴ درصد تغییر می یابد. بنابراین در محاسبه شیب کانال باید بسیار دقت شود و مخصوصاً برای تنظیم و تعیین شیب کانال های آزمایشگاهی با طول کوتاه از دوربین های دقیق

¹ Normalized Root Mean Square Error

² Weighted Quadratic Deviation

³ Residential Coefficient

- 1- Ghosh, S.N., and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow." *J. Hyd. Div.*, 96(4), 967-994.
- 2- Knight, D.W., AlHamid, A.A.I., and Yuen, K.W.H. (1992). "Boundary shear in differentially roughened trapezoidal channels." Falconer, K., and Shiono, R.G.S. (Eds.) *Hydraulic and environmental modeling: Estuarine and river waters*.
- 3- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., and Nakagawa, H. (1989). "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows." *J. Hyd. Res.*, 27(11), 149-173.
- 4- Guo, J., and Julien, P.Y., (2001). "Turbulent velocity profiles in sediment laden flows." *J. Hyd. Res.*, 39, (1), 11-23.
- 5- Guo, J., and Julien, P.Y. (2005). "Shear stress in smooth rectangular open-channel flows." *J. Hydr.Eng.*, 131(1), 30-37.
- 6- Riahi Modvar, H., and Ayyoubzadeh, S. A. (2008). "Estimating longitudinal dispersion coefficient pollutants using adaptive neuro-fuzzy inference system." *J. Water and Wastewater*, 67, 34-47 (In Persian).
- 7- Farshi, F. (2011). "Depth-averaged velocity and boundary shear stress in channels with the best trapezoidal and rectangular hydraulic sections using conformal mapping method." MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian)
- 8- Farshi, F., Kabiri- Samani, A. R., and Chamani, M. R. (2011). "Mean bed and side-wall shear stress on smooth trapezoidal open channels with the best hydraulic sections using conformal mapping method." 6th National Congress on Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran. (In Persian)
- 9- Sooky, A.A. (1969). "Longitudinal dispersion in open channels." *J. Hydr. Div.*, 95 (4),1327-1346.
- 10- Wark, J.B., Samuels, P.G., and 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.
- 11- Seo, I.W., and Baek, K.O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams." *J. Hyd. Eng.*, 130(3), 227-236.
- 12- Shiono, K., and Knight, D.W. (1988). "Two-dimensional analytical solution for a compound channel." *Proc., 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan.
- 13- Shiono, K., and Knight, D.W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel." *J. Fluid Mech.*, 222, 617-646.
- 14- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. (2000). "Two dimensional solution for straight and meandering over bank flows." *J. Hyd. Eng.*, 126(9), 653-669.
- 15- Maghrebi, M.F. (2003). "Discharge estimation in flumes using a new technique for the production of isovel contours." *Proceeding of International Conference on Civil and Environment Engineering ICCEE*, Hiroshima, Japan, 147-156.
- 16- Wilkerson, G.V., and McGahan, J.L. (2005). "Depth-averaged velocity distribution in straight trapezoidal channels." *J. Hyd. Eng.*, 131(6), 509-512.
- 17- Knight, D.W., Omran, M., and Tang, X. (2007). "Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows." *J. Hydr. Eng.*, 133(1), 39-47.
- 18- Tang, X., and Knight, D.W. (2008). "A general model of lateral depth-averaged velocity distributions for open channel flows." *J. Advances in Water Resources*, 31, 846-857.
- 19- Rezaei, B., and Knight, D.W. (2009). "Application of the Shiono and Knight method in compound channels with non-prismatic floodplains." *J. Hyd. Res.*, 47(6), 716-726.
- 20- Givehchi, M., and Maghrebi, M.F. (2009). "Estimation of depth-averaged velocity and boundary shear stress in a triangular open channel." *J. Water and Wastewater*, 2, 71-80. (In Persian)
- 21- Givehchi, M., Maghrebi, M.F., and Abrishami, J. (2009). "Application of depth-averaged velocity profile for estimation of longitudinal dispersion in rivers." *J. Water and Wastewater*, 72, 91-96. (In Persian)
- 22- Lundgren, H., and Jonsson, I.G. (1964). "Shear and velocity distribution in shallow channels." *J. Hyd. Div.*, 90(1), 1-21.
- 23- Einstein, H. A. (1942). "Formulas for the transformation of bed-load." *Trans. ASCE*, 107, 561-597.
- 24- Chiu, C.L., and Chiou, J.D. (1986). "Structure of 3-D flow in rectangular open-channels." *J. Hyd. Eng.*, 112(11), 1050-1068.
- 25- Chamani, M.R., Dehghani, A.A., Beirami, M.K., and Gholipour, R.A. (2010). *Fluid Mechanics*, Isfahan University of Technology., Isfahan. (In Persian)
- 26- Yang, S.Q. (2010). "Depth-averaged shear stress and velocity in open channel flows." *J. Hyd. Eng.*, 136 (11) 952-958.