



تعیین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال روباز مثلثی

علی بهداد^۱، محمود فنفور مغربی^۲، محمد گیوه چی^۳
^۱کارشناسی ارشد - سازه های هیدرولیکی - دانشگاه فردوسی مشهد
^۲دانشیار - گروه عمران - دانشگاه فردوسی مشهد
^۳استادیار - گروه عمران - دانشگاه سیستان و بلوچستان

Ali.Behdad@ymail.com
Maghrebi@ferdowsi.um.ac.ir
M.givehchi@eng.usb.ac.ir

خلاصه

کاربرد کانال های مثلثی در انتقال جریان های با دبی کم می باشد، اما به علت کاربرد های محدود، تحقیقات کاملی بر روی شناخت پارامترهای هیدرولیکی آن نظیر سرعت متوسط عمقی و توزیع تنش برشی صورت نگرفته است. برای این منظور از روش شیونو و نایت که برای تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، پارامترهای جریان را مد نظر قرار داده، استفاده شده است. پارامترهایی که در این رابطه نیاز به کالیبره شدن دارند، فاکتور اصطکاک k ، لزجت چرخشی عرضی λ و جریان ثانویه Γ می باشند. با ثابت در نظر گرفتن لزجت چرخشی عرضی بر اساس آزمایش های صورت گرفته و کالیبره کردن پارامترهای فاکتور اصطکاک و جریان ثانویه در رابطه شیونو و نایت، موقعیت و جهت چرخش سلول های جریان ثانویه را می توان تعیین نمود و بهترین تخمین از توزیع U_d و τ را بدست آورد.

کلمات کلیدی: جریان در کانال باز، سرعت متوسط عمقی، سلول جریان ثانویه، کانال مثلثی

۱. مقدمه

اغلب از کانال های مثلثی در دبی های کم و در جمع آوری آب های سطحی استفاده می گردد. به علت محدودیت استفاده از مقاطع مثلثی جهت انتقال و هدایت آب، محققین زیاد بدان نپرداخته اند و تحقیقات کمتری در این مقاطع صورت پذیرفته است و در نتیجه اطلاعات آزمایشگاهی و میدانی زیادی نیز در این زمینه وجود ندارد.

الگوهای جریان ثانویه در کانال های باز به دلیل وجود سطح آزاد سیال با کانال ها و مجاری بسته، متفاوت می باشد. وجود جریان های ثانویه، شکل و موقعیت آن در شناخت مسائل مختلفی در علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه مانند سرعت متوسط جریان، توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی حائز اهمیت می باشد. با این حال اندازه گیری مستقیم جریان های ثانویه به راحتی امکان پذیر نمی باشد. این جریان ها که مقدار آن ها در حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان می باشند، حاصل غیر همگن بودن آشفتگی سیال است [۱]. شناخت و بررسی الگوهای جریان ثانویه در کانال های باز مورد توجه محققین متعددی از جمله Knight و همکاران [۲]، Patel و Knight [۳]، Melling و Whitelaw [۴] قرار گرفته است. این پژوهشگران بر روی الگوی سلول های جریان های ثانویه مخصوصا در کانال های دوزنقه ای تحقیق نمودند و از زبری و توزیع آن بر روی بستر و دیواره ها، وجود سطح آزاد آب، هندسه کانال و ارتفاع آب به عنوان عوامل تاثیر گذار بر جریان های ثانویه نامبرده اند.

با بررسی تحقیقات محققین در زمینه های جریان ثانویه و اطلاعات آزمایشگاهی جریان های ثانویه و توزیع تنش، به ارائه الگوی سلول های جریان های ثانویه در مقاطع مثلثی و همچنین اثرات تغییرات غیر یکنواخت فاکتور اصطکاک داری - و سیباخ k در این مقطع پرداخته خواهد شد. از بررسی روش های موجود در تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، تنها روش Shiono and Knight Method (که به اختصار SKM خوانده

می شود) قادر به مدل سازی جریان با در نظر گرفتن پارامتر جریان ثانویه می باشد. لیکن دستیابی به جواب های مناسب از این روش نیازمند کالیبراسیون دقیق پارامترهای آن می باشد. در این مقاله به کمک اندازه گیری های آزمایشگاهی سرعت سعی می شود که کالیبراسیون با دقت مناسبی صورت گیرد. اما به علت عدم امکان برداشت سرعت های ناشی از جریان های ثانویه که نقشی اساسی در توزیع تنش برشی ایفا می کنند، با ارائه الگوهای جریان های ثانویه در مقطع، هم از نظر تعداد و هم از نظر قدرت و بزرگی سعی در تولید تنش های برشی با استفاده از SKM می شود و در نهایت با توزیع تنش برشی که از رابطه جهانی توزیع لگاریتمی سرعت در محدوده نزدیک به جدار، در دو حالت جداره زیر و صاف به صورت ذیل می باشد:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{u_* y_w}{\nu} \right) + 5.5 \quad \text{جداره صاف} \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{y_w}{k_s} \right) + 8.5 \quad \text{جداره زیر} \quad (2)$$

که در این معادلات u معرف سرعت در راستای طولی، u_* سرعت برشی بستر، ν لزجت سینماتیک سیال، k_s زبری معادل ماسه ای و y_w معرف فاصله عمود بر جداره می باشد. به کمک رابطه زیر می توان مقدار تنش برشی τ را به کمک سرعت برشی حاصل از روابط (۱) و (۲) محاسبه نمود:

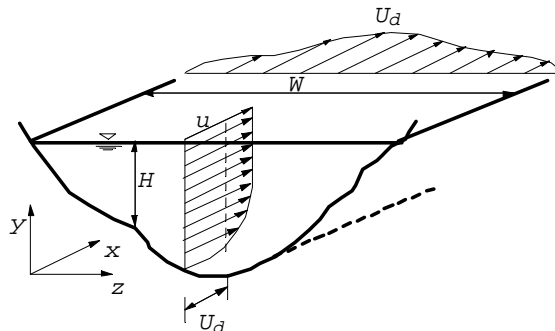
$$\tau = \rho u_*^2 \quad (3)$$

۲. روشی Shiono و Knight

Shiono و Knight با فرض جریان یکنواخت، دائمی و غیر قابل تراکم بودن سیال و با نوشتن معادله اندازه حرکت برای حجم کنترل، به این صورت که مجموع برآیند مومنتوم سیال در حجم کنترل بعلاوه نیروهای خارجی وارد بر آن برابر با نرخ تغییرات مومنتوم در حجم کنترل است، معادله را به صورت زیر بیان نمودند [۵]:

$$\rho g \sin \theta_0 dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz = \rho \left[\frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (4)$$

در رابطه بالا x ، y و z به ترتیب راستای طولی، قائم و عرضی و سرعت های منظر با هر راستا به ترتیب u ، v و w هستند (شکل ۱). τ_{yx} و τ_{zx} نیز تنش رینولدزی، به ترتیب در صفحه عمود بر راستای y ، z و در جهت x می باشد و ρ چگالی آب، g شتاب نقل و θ_0 زاویه کف مجرا در راستای طولی با محور افق است.



شکل ۱- مشخصات جریان در مجاری طبیعی

در شکل ۱، H ارتفاع آب، u سرعت در راستای جریان، U_d سرعت متوسط عمقی و W عرض سطح آزاد آب می باشند. اگر از معادله (۴) در امتداد y و با فرض $S_0 \approx \sin \theta_0$ ، انتگرال گرفته شود و ارتفاع آب را تابعی بر حسب z تعریف و با Φ نشان داده شود، با جایگذاری مقادیر و ساده سازی رابطه فوق، خواهیم داشت:

$$\rho g S_0 \Phi - \left(1 + \frac{1}{s^2} \right)^{1/2} \frac{1}{8} \rho f U_d^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho \lambda \Phi^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} U_d \frac{\partial U_d}{\partial z} \right\} = \Gamma \quad (5)$$

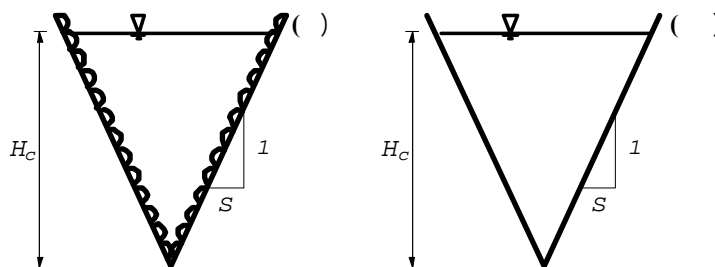


که در این معادله Γ معرف پارامتر جریان ثانویه، f فاکتور اصطکاک داریسی- ویسباخ، λ ویسکوزیته بی بعد گردابی است. Knight و Abril [۶] بر روی اثر ویسکوزیته بی بعد گردابی (λ) بررسی های وسیعی انجام دادند و دریافتند که توزیع سرعت متوسط عمقی به ویسکوزیته بی بعد گردابی حساسیت کمی داشته و می توان برای آن مقدار ثابتی در نظر گرفت. مقدار پیشنهادی توسط آن ها برای λ در بازه ۰/۰۷ تا ۰/۵ می باشد. در نهایت مقدار ۰/۰۷، به عنوان مقدار استاندارد ضریب بی بعد گردابی برای محاسبات پیشنهاد شده است.

۳. کارهای آزمایشگاهی

با توجه به این که هدف، تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال های مثلثی می باشد، یک سری اطلاعات جهت کنترل مقادیر تخمینی توسط روش SKM، مورد نیاز می باشد. بدین جهت در حدود ۴۰ آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. فلوام آزمایشگاهی که از آن برای ساخت فلوام با مقطع مثلثی استفاده شده است، کانالی مستطیلی می باشد که دارای عرض ۴۰ سانتیمتر، ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و طول ۸ متر است. دو دیواره کانال از شیشه و کف آن از ورق استیل گالوانیزه است. آب توسط پمپ از مخزن به مدخل ورودی کانال وارد می گردد. در مدخل ورودی کانال صفحات مشبکی تعبیه شده است تا جریان با حالت غیر آشفتنه و بدون تلاطم به کانال وارد گردد. در انتهای کانال نیز یک سرریز لبه تیز مستطیلی که قابلیت حرکت در راستای قائم جهت تنظیم ارتفاع آب را داراست، تعبیه گردیده است. دبی به دو صورت حجمی و با استفاده از اوریفیس اندازه گیری شده است. برداشت و اندازه گیری سرعت در فاصله ۴/۸ متری از ابتدای کانال که جریان توسعه یافته می باشد، صورت گرفت [۱]. در طی آزمایش های انجام گرفته در مقاطع مثلثی از دو سرعت سنخ (مولینه) استفاده گردید. با استفاده از سرعت سنخ، در هر نقطه اطلاعات سرعت در طول زمان ۳ دقیقه برداشت می گردد. سرعت متوسط در هر نقطه از متوسط گیری این اطلاعات حاصل می شود. سرعت آب در فاصله ۰/۶ تا ۱/۰ سانتیمتری از سطح آزاد سیال نیز توسط لوله پیتو که دارای قطر ۲ میلیمتر می باشد، اندازه گیری گردیده است. به جهت نزدیکی این نقاط برداشت به سطح آزاد سیال، این اطلاعات به عنوان سرعت سطحی آب در نظر گرفته شده است.

مقاطع مورد آزمایش از لحاظ هندسی متقارن می باشند. شکل ۲ زبری مقاطع فلوام در آزمایش ها را به صورت شماتیک بیان می کند. هر یک از پارامترهای نشان داده شده در شکل ۲، S شیب جداره، H_c ارتفاع آب در وسط مقطع و جنس جداره هر یک در سه حالت در آزمایش ها در نظر گرفته شده اند. شیب دیواره کانال $S=0/42$ ، $0/5$ و $0/7$ و ارتفاع آب در وسط مقطع $H_c=15$ cm، 25 و 35 سانتیمتر می باشند. از شیشه برای بستر صاف استفاده شد و با چسباندن دانه های شن و ماسه بر روی شیشه دو حالت زبری، به قطر متوسط $3/5$ و 11 میلیمتر ایجاد گردید. با توجه به ترکیب سه حالت زبری در دو دیواره، ۶ حالت زبری در آزمایش ها مورد بررسی قرار گرفت.

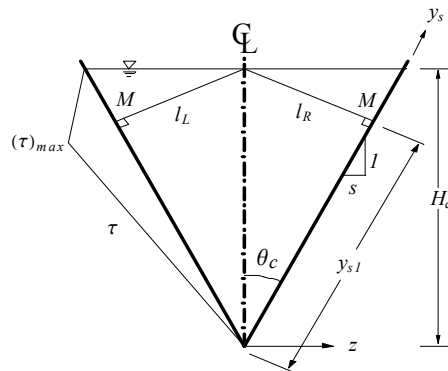


شکل ۲- مقاطع آزمایشگاهی فلوام مثلثی (الف) صاف، (ب) زبر

۴. الگوی پیشنهادی جریان های ثانویه در مقاطع مثلثی

وضعیت سلول های جریان ثانویه توسط محققین بسیاری بررسی شده است از جمله آن ها Knight و همکاران [۲] می باشند، که نتایج تحقیقات آن ها در مجاری باز با سطح مقطع دوزنقه ای به ارائه وضعیت سلول های ثانویه در مقطع عرضی از مجرا، منجر شده است. مجراهای مستطیلی شکل نیز در دو حالت بسته و باز توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. در مقطع مثلثی بسته تحقیقاتی در خصوص وضعیت سلول های جریان های ثانویه صورت پذیرفته، اما در خصوص الگوی سلول های جریان ثانویه در مقاطع مثلثی رو باز هیچگونه اظهار نظر و پیشنهادی ارائه نشده است. Aly و همکاران [۷] با ارائه الگوی سلول های جریان ثانویه در مجاری بسته مثلثی شکل تایید نمودند که وجود سطح آزاد سیال مهمترین عامل بر تغییر توزیع سرعت و الگوی جریان های ثانویه در مقطع است.

با بررسی روش های موجود در توزیع تنش برشی و مقایسه آن ها با مقادیر آزمایشگاهی، روش توزیع تنش برشی Yang و Lim که به اختصار YLM خوانده می شود، به دلیل نتایج بهتر، با تقریب مناسب از محل ایجاد تنش برشی در ارائه الگوی پیشنهادی استفاده می گردد. این روش بر اساس این ایده است که حرکت انرژی حمل شده معمولاً به گونه ای است که کمترین فاصله نسبی از مبداء تولید تا کرانه مجرا را طی می کند. فاصله نسبی نیز نسبت فاصله فیزیکی به توانایی بستر در اتلاف انرژی توسط ارتفاع زبری Δ بیان می گردد. با بکارگیری منطبق در نظر گرفته شده توسط Yang و Lim [۸]، سطح مقطع جریان را به نواحی کوچکتری بر اساس شکل سطح مقطع و توزیع زبری پیرامون مرطوب تقسیم نمودند و به تخمین تنش برشی با استفاده از تکنیکی که در ادامه توضیح داده می شود، پرداختند. آنان همچنین جریان را دائمی، یکنواخت و توسعه یافته فرض کردند. خطوط تقسیم با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می گردند (شکل ۳):



شکل ۳- توزیع تنش برشی تخمینی به روش YLM

$$\frac{l_R}{l_L} = \frac{\Delta_R}{\Delta_L} \quad (6)$$

که در آن l_L و l_R به ترتیب طول عمود از خط تقسیم بر دیواره سمت راست و چپ کانال و Δ_L و Δ_R به ترتیب زبری دیواره سمت راست و چپ کانال است. در صورتی که $\Delta_R = \Delta_L$ گردد، $l_R = l_L$ نتیجه می گردد.

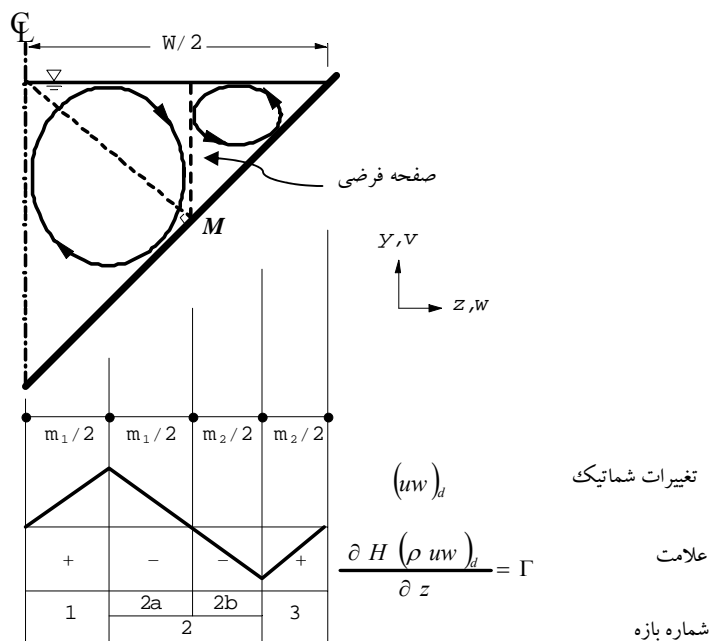
بر اساس این روش، حداکثر تنش برشی بر روی جداره کانال مثلثی در محل نقطه M رخ می دهد. این نقطه حاصل برخورد خطی عمود بر جداره کانال است که از محل برخورد خط تقسیم سطح مقطع جریان با سطح آزاد سیال نیز می گذرد. فاصله نقطه M از مبداء و در امتداد جداره کانال برابر $y_{s1} = H_c \cos \theta_c$ می باشد. از این رو موقعیت ماکزیمم تنش برشی با کاهش θ_c که معرف نصف زاویه داخلی راس کانال می باشد، به سمت سطح آب میل خواهد نمود. محل تنش برشی بیشینه بدست آمده از روش YLM با نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده توسط Lane، تطابق خوبی دارد. بر اساس تحقیقات Tominaga و همکاران [۱] در ارائه الگوی سلول های جریان ثانویه تخمین مناسب محل تنش برشی بیشینه از اهمیت زیادی برخوردار می باشد، بدین جهت از روش YLM استفاده شده است. Tominaga و همکاران [۱] -توزیع تنش برشی و جریان های ثانویه در مقاطع دوزنقه ای و مستطیلی را در حالات مختلف مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند هر گاه جهت جریان های ثانویه به سمت جداره کانال باشد تنش برشی بر روی جداره افزایش می یابد و در صورت حرکت جریان های ثانویه به گونه ای که از دیواره کانال دور شوند، تنش برشی بیشترین کاهش در طول دیواره را خواهد داشت. بنابر این می توان با توجه به توضیحات داده شده و شکل ۴، نتیجه گرفت که سلول های اصلی جریان ثانویه بر روی هر یک از دیواره ها دو عدد بوده و الگوی شماتیکی مطابق شکل ۴ را به خود اختصاص می دهند. جهت حرکت این دو سلول به سمت دیواره و نقطه M خواهد بود که تنش برشی در آن نقطه حداکثر است. این دو سلول در امتداد صفحه ای فرضی هستند که از نقطه M می گذرد. سلول اول که سلول محدود به خط میانی مقطع و صفحه فرضی گذرنده از نقطه M می باشد، سلول اصلی و دارای تاثیر بیشتر در مشخصه های هیدرولیکی جریان است. سلول دوم محدود به صفحه فرضی و کرانه کانال می باشد و از شدت تاثیر کمتری نسبت به سلول اصلی برخوردار است. معادله (۷) بیان می نماید که پارامتر جریان ثانویه (Γ) از تغییرات پارامتر $(uw)_d$ نسبت به Z بدست می آید:

$$\frac{\partial H(\rho uw)_d}{\partial z} = \Gamma \quad (7)$$

از این رو علامت تغییرات $(uw)_d$ مطابق با علامت پارامتر جریان ثانویه Γ است. سرعت u در راستای طولی جریان و به سمت پایین دست دارای علامت مثبت است بنابراین $(uw)_d$ مثبت خواهد بود (جهت چرخش سلول در جهت حرکت عقربه های ساعت) هر گاه w مثبت باشد و منفی است



(جهت چرخش سلول در خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت) هر گاه W منفی باشد. در شکل (۴) موقعیت سلول های جریان های ثانویه نشان داده شده است. بر اساس الگوی در نظر گرفته شده برای سلول ها، در نیمی از مقطع مثلثی، سه بازه جهت تعریف پارامتر جریان ثانویه مورد نیاز است. پهنای هر یک از سلول ها، m_1 و m_2 ، تابعی از زاویه داخلی مثلث و عمق آب در کانال است. فرض می گردد که فاصله مرکز سلول اصلی از خط میانه مثلث برابر با $0.5m_1$ و فاصله مرکز سلول دوم تا کرانه کانال $0.5m_2$ باشد.



شکل ۴- الگوی شماتیک سلول های جریان ثانویه در مقطع مثلثی، تعداد بازه ها و علامت پارامتر جریان ثانویه Γ

با توجه به شکل ۴ دیده می شود که محور تقارن کانال بر کرانه سلول اصلی جریان ثانویه منطبق می باشد، در نتیجه در این موقعیت $W=0$ بوده که مترادف با $(uw)_d = 0$ است. سلول اصلی جریان ثانویه، چرخشی در جهت حرکت عقربه های ساعت دارد از این رو در مرکز این سلول $(uw)_d$ دارای بیشترین مقدار مثبت خواهد بود. دومین سلول دارای چرخشی خلاف جهت عقربه های ساعت است و بنابراین $(uw)_d$ دارای بیشترین مقدار منفی در مرکز این سلول می باشد. علامت و نحوه تغییرات $(uw)_d$ در هر بازه در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به یکسان بودن الگوی توزیع تنش برشی در مقاطع مثلثی و همچنین اصول ذکر شده در ارائه الگوی جریان های ثانویه در این نوع مقطع، نتیجه می گردد که این الگو با تغییر زبری جداره ها تغییر نمی یابد.

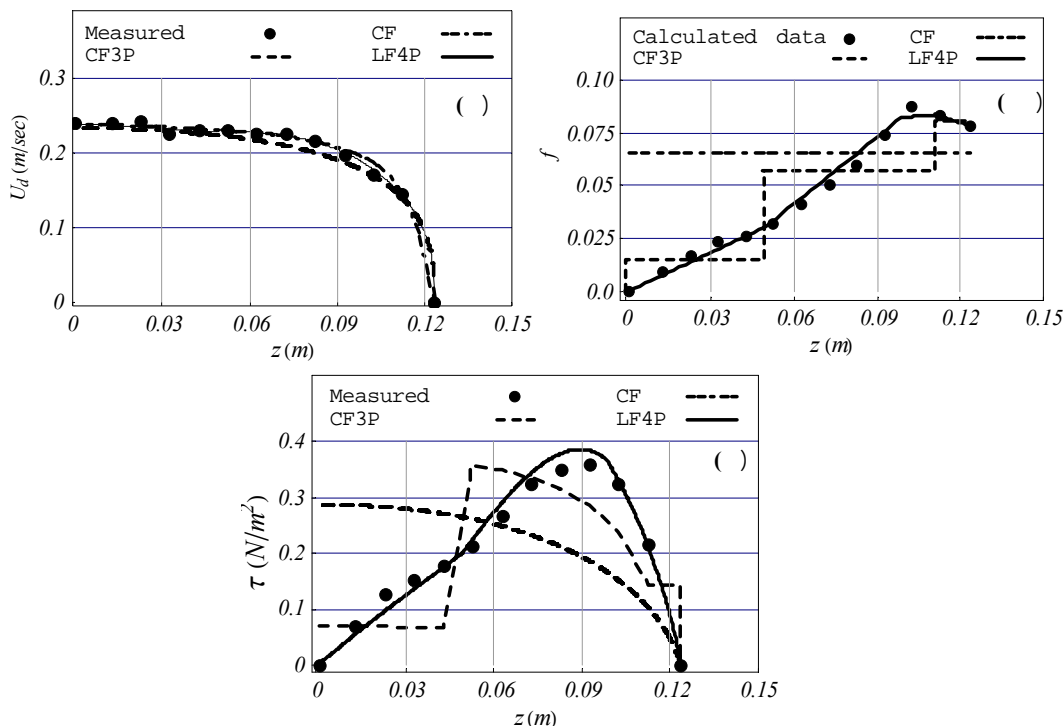
۵. تغییرات فاکتور اصطکاک در مقاطع مثلثی

با استفاده از رابطه موجود بین فاکتور اصطکاک و تنش برشی و سرعت متوسط عمقی می توان مقدار فاکتور اصطکاک را با جایگذاری مقادیر آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی U_d و تنش برشی τ (اشکال ۵-ب و پ)، در معادله $f = 8\tau / (\rho U_d^2)$ محاسبه نمود. مقادیر فاکتور اصطکاک که در شکل (۵-الف) با دایره های توپر نشان داده شده است، بیانگر نحوه تغییرات این پارامتر بر روی دیواره های مقطعی مثلثی است. در شکل (۵-الف) به مقایسه و بررسی حساسیت توزیع تنش برشی و سرعت متوسط عمقی به مقدار فاکتور اصطکاک پرداخته شده است. برای ارائه الگوی تغییرات تنش برشی و سرعت متوسط عمقی از آزمایش های انجام شده در دانشگاه فردوسی استفاده می گردد. در این جا از نتایج دو آزمایش برای بیان تغییرات فاکتور اصطکاک در مقاطع مثلثی استفاده می شود، که در اشکال ۵ و ۶ آورده شده اند. در آزمایش اول مشخصات مقطع مثلثی مورد آزمایش به قرار زیر است: زبری بستر ۰.۳۵ سانتیمتر، ارتفاع آب در محور تقارن ۲۴.۷ سانتیمتر، شیب کف کانال ۰.۰۰۱ و شیب دیواره کانال ۰.۵ می باشد. دبی عبوری از مقطع ۶.۶ لیتر بر ثانیه است. برای مدل نمودن صحیح زبری در روش SKM، استفاده از روش سعی و خطا در قالب در نظر گرفتن الگوهای مختلف توزیع فاکتور اصطکاک، ملاک عمل در این تحقیق است. در اولین الگو فاکتور اصطکاک یک مقدار متوسط و ثابت فرض گردیده است. در



این الگو علی رغم آن که برآورد سرعت متوسط عمقی از انطباق خوبی برخوردار می باشد ولی تغییرات تنش برشی بر عکس تنش موجود در مقطع است. در شکل (۵-ب) مشاهده می گردد در نقطه واقع بر محور تقارن مقطع تنش برشی بجای آن که صفر شود، مقدار بیشینه می دهد و در لبه انتهایی مقطع، عکس آن رخ می دهد. مقدار پارامتر جریان ثانویه Γ در برآورد سرعت متوسط عمقی که انطباق نسبتاً خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی دارد برابر صفر است، که این نیز صحیح نمی باشد زیرا طبق آزمایش های انجام شده در کانال های با بستر صاف نیز جریان های ثانویه وجود دارند. در نتیجه با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای فاکتور اصطکاک، تخمین پروفیل سرعت متوسط عمقی و به ویژه تنش برشی با روش SKM به درستی امکان پذیر نمی باشد. در دومین الگوی در نظر گرفته شده، فرض می گردد که مقدار فاکتور اصطکاک در بازه های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۴ ثابت باشد:

$$f^1 = 0.015, \quad f^2 = 0.057, \quad f^3 = 0.083 \quad (8)$$



شکل ۵- (الف) تغییرات فاکتور اصطکاک (ب) پروفیل سرعت متوسط عمقی و (پ) پروفیل تنش برشی

این الگو CF3P نامیده می شود (شکل ۵-الف). فاکتورهای اصطکاک فوق الذکر با استفاده از مقادیر فاکتورهای اصطکاک که در شکل (۵-الف) با دایره های توپر نشان داده شده اند، محاسبه گردیده اند. در هر سه بازه $\lambda = 0.07$ در نظر گرفته می شود [۶]. از این رو تخمین پروفیل سرعت متوسط عمقی که بهترین انطباق را با مقادیر آزمایشگاهی داشته باشد، فقط با کالیبراسیون پارامتر جریان ثانویه Γ ، امکان پذیر می گردد. مقادیر Γ ای که به روش سعی و خطا برای سه بازه محاسبه گردیده تا بهترین انطباق صورت پذیرد، عبارتند از:

$$\Gamma^1 = 0.95, \quad \Gamma^2 = -0.15, \quad \Gamma^3 = 0.21 \quad (N/m^2) \quad (9)$$

در اشکال (۵-ب و پ) به ترتیب پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی تخمین زده شده به روش SKM و با استفاده از مقادیر ذکر شده برای سه پارامتر λ ، f و Γ نشان داده شده است. پروفیل سرعت متوسط عمقی تخمینی از انطباق خوبی بر اطلاعات آزمایشگاهی برخوردار است، اما در پروفیل تنش برشی جهش دیده می شود و پروفیل پیوسته نبوده و دارای انطباق مناسب بر مقادیر آزمایشگاهی نمی باشد. این موضوع گویای عدم صحت فاکتور اصطکاک است. در سومین الگو بازه دوم به دو قسمت و مقدار فاکتور اصطکاک در طول هر یک از چهار بازه خطی در نظر گرفته می شود:

$$f^1 = 0.615z, \quad f^2a = -0.022 + 1.054z, \quad f^2b = 0.072 + 0.104z, \quad f^3 = 0.131 + 0.429z \quad (10)$$

این الگو LF4P نام گذاری می گردد (شکل ۵-الف). مقادیر پارامتر جریان های ثانویه نیز بر اساس انطباق هر چه بیشتر سرعت متوسط عمقی تخمین زده با مقدار آزمایشگاهی محاسبه می گردد:

$$\Gamma^1 = 1.2, \quad \Gamma^2a = -0.25, \quad \Gamma^2b = -0.01, \quad \Gamma^3 = 0.01 \quad (N/m^2) \quad (11)$$



پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی تخمین زده شده با استفاده از روش SKM و بکارگیری الگوی LF4P در اشکال (ب و پ) نشان داده شده است. شکل (د-۵) نشان می دهد که علاوه بر انطباق خوب مقادیر تنش برشی تخمین زده شده بر نتایج آزمایشگاهی، مشکل وجود جهش های ناگهانی نیز با خطی در نظر گرفتن توزیع فاکتور اصطکاک در جداره ها برطرف شده است. دبی و سرعت متوسط تخمینی با این فرضیات به ترتیب ۶/۹۵ لیتر بر ثانیه و ۰.۲۲ متر بر ثانیه که ۵/۳٪ درصد بیشتر از مقادیر واقعی دبی و سرعت متوسط می باشد و گویای تخمین دقیق دبی و سرعت متوسط با در نظر گرفتن الگوی پیشنهادی جهت سلول های جریان ثانویه و تغییرات خطی فاکتور اصطکاک بر روی دیواره ها است.

همانگونه که در شکل (د-۵) دیده می شود معادلات f_{2b} و f_{2a} که جهت تعریف تغییرات فاکتور اصطکاک در بازه های z_a و z_b استفاده گردیده است، دارای کمی عدم انطباق بر اطلاعات فاکتور اصطکاک محاسبه شده بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی است. این موضوع سبب گردیده است که توزیع تنش برشی تخمینی بر اساس الگوی LF4P از تطابق خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی در بازه ۲ بر خوردار نباشد و منحنی برآورد شده با مقادیر آزمایشگاهی تنش برشی فاصله دارد (شکل د-۵).

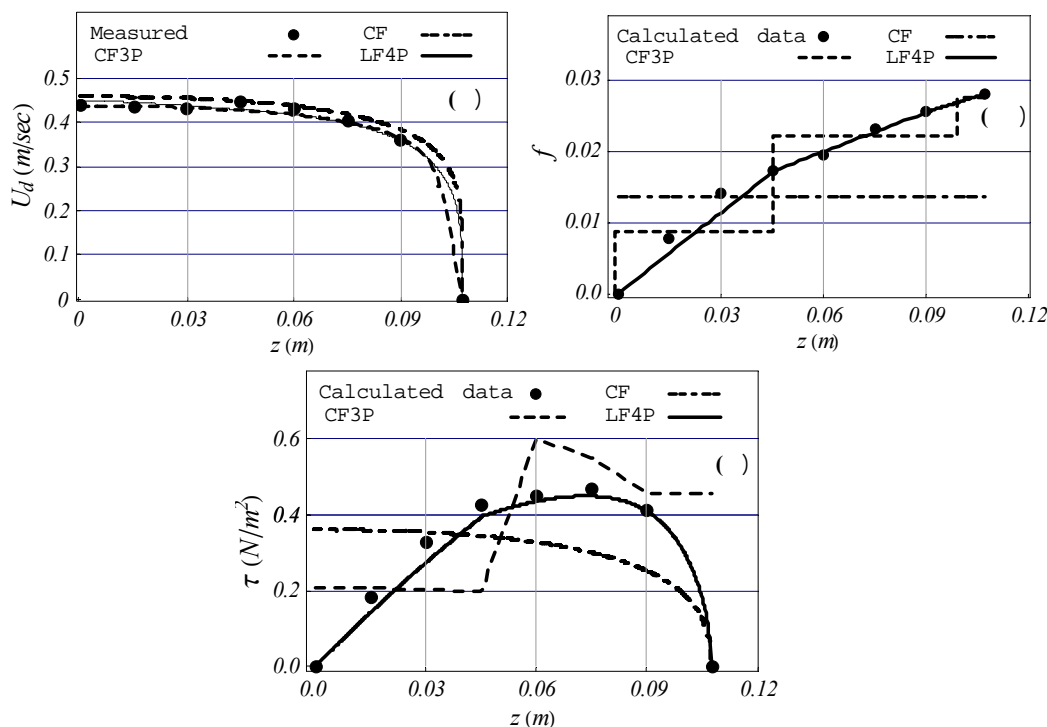
در آزمایش دوم مشخصات مقطع مثلثی مورد آزمایش به شرح زیر است: دیواره ها از جنس شیشه بوده، ارتفاع آب در محور تقارن ۲۵/۳ سانتیمتر، شیب کف کانال ۰.۰۰۱ و شیب دیواره کانال ۰.۴۲ می باشد. دبی عبوری از مقطع ۱۱.۷۱ لیتر بر ثانیه است. این آزمایش نیز مانند آزمایش قبل برای حالت های مختلف از مدل نمودن فاکتور اصطکاک بررسی می گردد. در این آزمایش نیز اولین الگوی فاکتور اصطکاک یک مقدار متوسط و ثابت فرض می گردد، همانند آزمایش پیشین علی رغم آن که برآورد سرعت متوسط عمقی انطباق خوبی دارد ولی تغییرات تنش برشی بر عکس تنش موجود در مقطع است (شکل ۶-پ). مقدار پارامتر جریان ثانویه Γ در برآورد سرعت متوسط عمقی که انطباق و همپوشانی نسبتاً خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی دارد برابر صفر است که این نیز صحیح نمی باشد زیرا طبق آزمایش های انجام شده در کانال های با بستر صاف نیز جریان های ثانویه وجود دارند. در نتیجه با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای فاکتور اصطکاک، تخمین پروفیل سرعت متوسط عمقی و به ویژه تنش برشی با روش SKM به درستی امکان پذیر نمی باشد. در دومین الگوی که مقدار فاکتور اصطکاک در بازه های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۴ ثابت باشد:

$$f^1 = 0.009, \quad f^2 = 0.022, \quad f^3 = 0.027 \quad (12)$$

این الگو که CF3P نامیده و با خط چین نشان داده می شود (شکل ۶-الف). مقادیر Γ ای که به روش سعی و خطا برای سه بازه محاسبه

گردیده تا بهترین انطباق صورت پذیرد، عبارتند از:

$$\Gamma^1 = 0.5, \quad \Gamma^2 = -0.4, \quad \Gamma^3 = 0.7 \quad (N/m^2) \quad (13)$$



شکل ۶- (الف) تغییرات فاکتور اصطکاک (ب) پروفیل سرعت متوسط عمقی و (پ) پروفیل تنش برشی



در این حالت نیز پروفیل سرعت متوسط عمقی تخمینی از انطباق خوبی بر اطلاعات آزمایشگاهی برخوردار است، اما در پروفیل تنش برشی جهش دیده می شود و پروفیل پیوسته نبوده و دارای انطباق مناسب بر مقادیر آزمایشگاهی نمی باشد. این موضوع گویای عدم صحت فاکتور اصطکاک است. در سومین الگو بازه دوم به دو قسمت و مقدار فاکتور اصطکاک در طول هر یک از چهار بازه، خطی در نظر گرفته می شود:

$$f_1 = 0.378Z, \quad f_2a = -0.09 + 0.184Z, \quad f_2b = 0.12 + 0.148Z, \quad f_3 = 0.12 + 0.148Z \quad (14)$$

این الگو که LFP نام دارد (شکل ۶- الف). مقادیر پارامتر جریان های ثانویه نیز بر اساس انطباق هر چه بیشتر سرعت متوسط عمقی تخمین زده با مقدار آزمایشگاهی محاسبه می گردد:

$$\Gamma_1 = 0.82, \quad \Gamma_2a = -0.3, \quad \Gamma_2b = -0.15, \quad \Gamma_3 = 0.01 \quad (N/m^2) \quad (15)$$

مشابه آزمایش قبل با خطی در نظر گرفتن توزیع فاکتور اصطکاک در جداره ها و بکارگیری الگوی LFP، از جهش های ناگهانی جلوگیری می گردد. دبی و سرعت متوسط تخمینی با این فرضیات به ترتیب ۱۱/۶۷ لیتر بر ثانیه و ۰/۴۲ متر بر ثانیه که ۰/۲۵٪ درصد کمتر از مقادیر واقعی دبی و سرعت متوسط می باشند و گویای تخمین دقیق تر دبی و سرعت متوسط با در نظر گرفتن الگوی پیشنهادی جهت سلول های جریان ثانویه و تغییرات خطی فاکتور اصطکاک بر روی دیواره ها است.

۶. نتیجه گیری

در مجموع با بررسی نتایج بدست آمده از سه الگوی تغییرات فاکتور اصطکاک در نظر گرفته شده، نتیجه می گردد با ثابت در نظر گرفتن فاکتور اصطکاک، توزیع تنش برشی تخمینی توسط SKM، عکس مقدار اندازه گیری شده می باشد ولی سرعت متوسط عمقی به این پارامتر حساس نمی باشد. بدین ترتیب نحوه مدل نمودن توزیع فاکتور اصطکاک اثر بسزائی در تخمین تنش برشی به روش SKM داشته و با در نظر گرفتن توزیع خطی از فاکتور اصطکاک می توان از بروز جهش ناگهانی در پروفیل تنش برشی اجتناب نموده و نتایج مناسبی بدست آورد. پروفیل سرعت متوسط عمقی دارای حساسیت کمتری به توزیع فاکتور اصطکاک نسبت به پروفیل تنش برشی است و پارامتر جریان ثانویه که گویای الگوی جریان و شدت آشفتگی است، بیشتر در آن موثر است. پارامتر هایی که در این رابطه نیاز به کالیبره شدن دارند، فاکتور اصطکاک f ، لزجت چرخشی عرضی λ و جریان ثانویه Γ می باشند. لزجت چرخشی عرضی λ ثابت و برابر ۰/۰۷ است و با در نظر گرفتن توزیع خطی از فاکتور اصطکاک و با تخمین پارامتر جریان ثانویه به کمک الگوی جریان ثانویه پیشنهادی، می توان به نتایج قابل قبولی از تخمین تنش برشی و سرعت متوسط عمقی به روش SKM نائل شد. این روش برای تمامی آزمایش کنترل گردیده و مقدار انطباق بالای حاصله بیانگر قابلیت مدل در تخمین تنش برشی و سرعت متوسط عمقی می باشد.

۷. مراجع

- [۱] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. (۱۹۸۹). "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows." J. Hyd. Res. ۲۷(۱۱), ۱۴۹-۱۷۳
- [۲] Knight, D. W., Omran, M. and Tang, X. (۲۰۰۷). "Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows." J. Hyd. Eng. ۱۳۳(۱), ۳۹-۴۷.
- [۳] Knight, D. W., and Patel, H. S. (۱۹۸۵a). "Boundary shear in smooth rectangular ducts." J. Hyd. Eng., ۱۱۱(۱), ۲۹-۴۷.
- [۴] Melling, A., and Whitelaw, J.H., (۱۹۷۶). "Turbulent flow in a rectangular duct." J. of Fluid Mechanics, ۷۸(۲), pp. ۲۸۹-۳۱۵.
- [۵] Shiono, K., and Knight, D. W. (۱۹۸۸). "Two-dimensional analytical solution for a compound channel." Proc., ۳rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Tokyo, Japan, ۵۰۳-۵۱۰.
- [۶] Knight, D. W., and Abril, J. B. (۱۹۹۶). "Refined calibration of a depth averaged model for turbulent flow in a compound channel." Proc., Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy, London, Paper ۱۱۰۱۷, ۱۱۸, ۱۵۱-۱۵۹
- [۷] Aly, A.M.M., Trupp, A.C. and Gerrard A.D., ۱۹۷۸. "Measurements and prediction of fully developed turbulent flow in an equilateral triangular duct." J. Fluid. Mech. ۱۹۷۸, Vol ۸۵, part ۱. pp ۵۷-۸۳.
- [۸] Yang, S.Q., Lim, S.Y. (۲۰۰۵). "Boundary shear stress distributions in trapezoidal channels." J. Hyd. Res. ۴۳(۱), ۹۸-۱۰۲.