

ارزیابی روش تعادل مومنتم در تعیین تنش برشی مقطع T-های مرکب پیچان رودی

وحیده مرتضوی امیری^۱، کاظم اسماعیلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
v.mortazavi@mail.um.ac.ir

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده ی مسئول)*
esmaili@um.ac.ir

باتوجه به ماهیت سه بعدی و پیچیده‌ی جریان در کانال‌های مرکب پیچان رودی و به‌ویژه براساس نقش موثر جریان‌های ثانویه و انتقال مومنتم در قوس‌ها، محاسبه‌ی پارامتر تنش برشی توسط روش‌های ارائه شده برای کانال‌های مستقیم، با چالش‌هایی مواجه می‌باشد. روش تعادل مومنتم که بر اساس حل معادله‌ی تعادل مومنتم برای نقاط جریان کار می‌کند، می‌تواند در تعیین این پارامتر در کانال‌های پیچانی مورد استفاده قرار گیرد. در یک مدل فیزیکی، شامل یک آبراهه‌ی آزمایشگاهی مستطیلی، مجرای پیچانی همراه با دو سیلاب‌دشت، تنش برشی در طول جریان با استفاده از روش تعادل مومنتم محاسبه و نتایج با روش توزیع لگاریتمی سرعت و تنش برشی رینولدز مقایسه شد. مقادیر بیشینه‌ی تنش برشی نسبی در روش‌های RSM، MBM و LLM به ترتیب ۵/۴۳ و ۷/۲۴ در مقطع چهارم و ۶/۰۵ در مقطع اول می‌باشد. باتوجه به بررسی نتایج، روش MBM می‌تواند به‌عنوان روشی کاربردی در ارزیابی مقادیر تنش برشی در پیچان‌رودها معرفی شود.

واژگان کلیدی: انتقال مومنتم، تنش برشی رینولدز، RSM، MBM، کانال پیچانی سیلاب‌دستی.

۱. مقدمه

پذیری این عوامل از یکدیگر می‌باشد. یکی از پیچیده‌ترین جریان‌ها در مجاری روباز، جریان آشفته در کانال‌های مرکب پیچانی- است (سوگیاما، ۲۰۰۶)^[۱] در این کانال‌ها، علاوه بر نیروی گریزازمرکز، تنش برشی عرضی بین جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز مهم بوده و قدرت جریان ثانویه را تشدید می‌کند. این مکانیزم، افت انرژی را افزایش داده و دبی جریان را کاهش می‌دهد (ظهوری، ۱۳۹۱)^[۲]. در واقع در چنین جریان‌هایی، افزایش تنش برشی ناشی از ترکیب جریان عمقی و جریان ثانویه می‌باشد (لیاقت و همکاران، ۱۳۹۸)^[۳]. تبادل مومنتم زیادی که بین جریان سریع‌تر در کانال اصلی

یکی از مهمترین مشخصه‌های جریان در کانال‌های باز، توزیع تنش برشی می‌باشد. در کانال‌های مرکب، به‌علت اختلاف سرعت میان کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، پدیده‌ی انتقال مومنتم شکل می‌گیرد که به‌همراه جریان‌های ثانویه می‌تواند در توزیع تنش برشی و موقعیت اعمال مقادیر بیشینه‌ی آن در این آبراهه‌ها بسیار تاثیرگذار باشد. در این مقطع T-های، تنش برشی تحت تاثیر عوامل مختلف مانند جریان ثانویه، انتقال مومنتم، هندسه‌ی مقطع، عمق نسبی و همزمان تاثیر-

کاهش ۵۰ درصدی تنش برشی در اثر افزایش ۶۴ درصدی میزان سینوسیتهی بود.

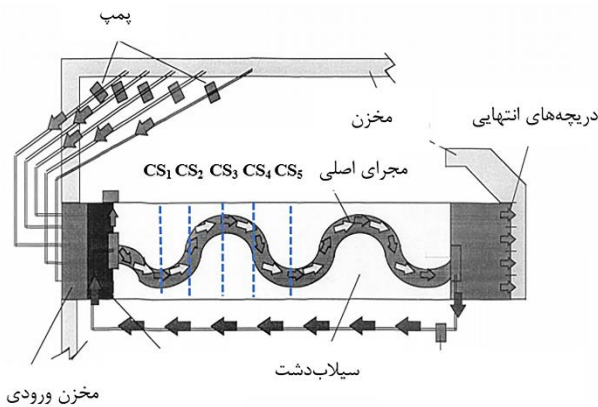
زراتی و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۶] با استفاده از روش تنش برشی رینولدز، توزیع تنش برشی را در یک کانال مستقیم مرکب با در نظر گرفتن تاثیر لایه‌ی برشی ایجاد شده توسط جریان ثانویه تعیین نمودند. الفدهلی و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۷] در پژوهشی نشان دادند شتاب جریان و کاهش یا افزایش سرعت جریان می‌تواند تاثیر مهمی بر روی توزیع رینولدز برشی در جریان‌های دائمی و غیردائمی داشته باشد. کوفتیس و پرینوس (۲۰۱۶)^[۱۸] با بررسی تنش برشی رینولدز در کانال مرکب دوزنقه‌ای با سیلاب‌دشت همراه با پوشش گیاهی، نشان دادند که به دلیل تبادل مومنتم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت دارای پوشش گیاهی، با افزایش میزان آشفتگی و تنش، نفوذ آشفتگی در محدوده‌ی کانال اصلی و سیلاب دشت دیده می‌شود. خاتوا و پاترا (۲۰۰۸)^[۱۹] توزیع تنش برشی را در کانال اصلی و سیلاب‌دشت مقطع مرکب مستقیم و پیچانی با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها رابطه‌ای برای توزیع تنش در سیلاب‌دشت‌های مقطع‌های مرکب پیچانی با استفاده از پارامترهای عمق نسبی، نسبت ارتفاع به عرض، ضریب زبری سیلاب‌دشت نسبت به کانال اصلی و عرض نسبی، ارائه نمودند. کای ها و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۰] با ابزاری جدید به نام MEMS^۴ که دارای حسگر تنش برشی می‌باشد، توزیع تنش برشی مرزی را در یک کانال پیچانی طبیعی بررسی کردند. در این پژوهش، فاصله‌ی موقعیت مکانی بیشینه‌ی تنش برشی دیواره نسبت به کف کانال تعیین شد. فرشی و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۱] یک مدل تحلیلی را برای ارزیابی تنش برشی مرزی در قوس کانال‌های باز توسعه دادند. نتایج حاکی از انطباق مناسب داده‌های آزمایشگاهی و مدل ارائه شده بود.

یکی از روش‌های ارائه شده برای محاسبه‌ی این پارامتر، روش تعادل مومنتم می‌باشد که توسط ینگ و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۲] انجام شد. ایشان روش تعادل مومنتم را برای محاسبه‌ی تنش برشی در یک کانال مستقیم با جریان یکنواخت به کار گرفتند و ضمن ارائه‌ی یک رابطه بین تنش برشی مرزی و پارامترهای جریان اولیه، با مقایسه‌ی نتایج این روش با دیگر روش‌ها، اعلام کردند که این روش تطابق خوبی

و جریان آرام‌تر در سیلاب‌دشت در این کانال‌ها اتفاق می‌افتد، موجب تولید لایه‌ی برشی عرضی بین دو نوع جریان در حد فاصل مجرای اصلی و سیلاب‌دشت می‌گردد. انتقال مومنتم تنها به دلیل آشفتگی بستر اتفاق نمی‌افتد، بلکه آشفتگی ناشی از تنش برشی سطح آزاد و جریان‌های ثانویه هم مؤثر هستند. ساختار آشفتگی در این لایه‌های برشی بسیار پیچیده است (نایت و شیونو، ۱۹۹۰)^[۴]. تعیین تنش برشی در رودخانه‌ها می‌تواند محل سلول‌های جریان ثانویه و نقاط مستعد فرسایش و رسوب را آشکار نماید (شکری و مهدی‌پور ۱۴۰۰)^[۵].

در دهه‌های اخیر، مطالعات فراوانی برای تعیین تنش برشی در کانال‌های مستقیم و مرکب (نایت و شیونو ۱۹۹۰)^[۶]، ژو و ژولین ۲۰۰۵^[۷]، ینگ و همکاران ۲۰۰۷^[۸]، استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۸^[۹]، اورسیک ۲۰۱۲^[۱۰] با روش‌های توزیع لگاریتمی سرعت^۱، TKE^۲ و تنش برشی رینولدز^۳ به دو صورت مطالعات عددی و آزمایشگاهی، در شرایط جریان یکنواخت و غیریکنواخت انجام شده است. فضلی و همکاران (۱۳۸۸)^[۱۱] به بررسی نتایج روش‌های مختلف تعیین تنش برشی در قوس ۹۰ درجه پرداختند. صفرزاده و همکاران (۱۳۹۰)^[۱۲] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت و تنش، روش‌های قانون لگاریتمی سرعت، درگ، رینولدز، TKE و TKEw^۷ را با یکدیگر مقایسه کردند و نتایج حاکی از تناسب دو روش تنش برشی رینولدز و انرژی جنبشی اصلاح شده با اختلاف به ترتیب ۱۸/۳ و ۲۴/۴ درصد بود. برد (۲۰۰۴)^[۱۳] روش درون‌یابی خطی را برای محاسبه‌ی تنش برشی با استفاده از داده‌های ADV ارائه نمود. عمران و نایت (۲۰۱۰)^[۱۴] با استفاده از چهار سری داده‌ی آزمایشگاهی در کانال مستقیم با مقطع مستطیل، با استفاده از یک روش بهبود یافته‌ی مدل میانگین عمقی، تلاش کردند تا در مقایسه با مدل SKM که فاقد تاثیر جریان‌های ثانویه در تعیین تنش برشی بود، به نتایج دقیق‌تری برای تعیین توزیع سرعت و تنش برشی دست یابند. نقوی و همکاران (۱۳۹۹)^[۱۵] با استفاده از مدل عددی FLOW^۳D، توزیع سرعت و تنش برشی در یک کانال مرکب پیچانی را تحت تاثیر سینوسیتهی‌های مختلف بررسی کردند و نتایج حاکی از

با دیگر روش‌ها دارد و احتمالاتی می‌تواند برای بازه‌ی وسیعی از محدوده‌های مرزی مورد استفاده قرار بگیرد. هن و همکاران (۲۰۱۲) [۲۳] از مدل تعادل مومنتم برای محاسبه‌ی تنش در داده‌های آزمایشگاهی بهره بردند. نتایج نشان داد این روش بدون اعمال ضریب تجربی، قادر به پیش‌بینی مقادیر تنش برشی در کانال‌های مستقیم خواهد بود. همچنین مقایسه‌ی این روش با دیگر روش‌ها نشان داد با بالاترین میزان خطای ۵/۱۵٪ در مجاور بستر ($z/h=0.1-0.5$) مطابقت خوبی با دیگر روش‌های اندازه‌گیری تنش برشی دارد.



شکل ۱. شماتیک مدل آزمایشگاهی پژوهش حاضر.

روش‌های متفاوتی برای بررسی و تعیین پارامتر تنش برشی در کانال‌ها وجود دارد اما روش‌های آزمایشگاهی تعیین تنش برشی، به‌ویژه در نواحی مرزی و در مجاری طبیعی، بسیار دشوار است. بنابراین اشاره شد، با توجه به ماهیت سه‌بعدی و پیچیده‌ی جریان در رودخانه‌های پیچانی، روش‌هایی که با به‌کارگیری تاثیر جریان‌های ثانویه و نوسانات سرعت در سه بعد، تنش برشی را محاسبه می‌کنند، می‌توانند در این زمینه نتایج دقیق‌تری تولید کنند. براین اساس، در پژوهش حاضر، روش تعادل مومنتم به دلیل در نظر گرفتن ترم‌های جریان‌های ثانویه و تبادل مومنتم، به‌عنوان روش موثر برای تعیین تنش برشی در مدل‌های پیچانی و در کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. بنابراین با بررسی پیشینه‌ی پژوهشی و توجه به این که روش تعادل مومنتم به‌ویژه در مقطع‌های مرکب کاربرد دارد، اما هنوز در مقطع‌های پیچانی به‌کار گرفته نشده است، به‌نظر می‌رسد کاربرد آن در این پژوهش و مقایسه با روش‌های دیگر، می‌تواند توانایی روش یادشده را برای برآورد تنش برشی در این شرایط، مورد ارزیابی قرار دهد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تجهیزات آزمایشگاهی

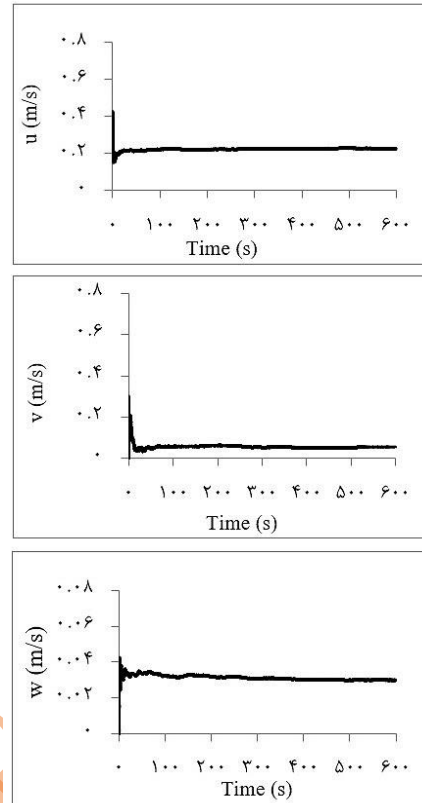
در انجام این پژوهش، از کانال بتنی با مقطع اصلی پیچانی و مستطیل و سیلاب‌دشت‌های مستطیلی که دارای بستر صلب بودند، استفاده شد. شکل ۱ نمایی شماتیک از مدل فیزیکی را نشان می‌دهد. عرض کانال ۱۲۰ سانتیمتر، مجرای اصلی ۲۰ سانتیمتر و سیلاب‌دشت‌ها در مسیر جریان بین ۰/۰۵ تا ۰/۹۵ متغیر بودند. طول مدل

جدول ۱. جزئیات ویژگی‌های هندسی کانال آزمایشگاهی

شماره	آیتم توصیفی	ویژگی
۱	نوع کانال	سیلاب‌دستی پیچانی
۲	ابعاد کانال	۰/۷*۲۰*۱/۲ متر
۳	هندسه‌ی مجرای اصلی	مستطیلی (شیب جانبی صفر)
۴	نوع سیلاب‌دشت	نامتقارن
۵	عرض مجرای اصلی	۲۰ سانتیمتر
۶	عرض سیلاب‌دشت	۰/۹۵-۰/۰۵ متر
۷	عمق مجرای اصلی (H)	۱۵ سانتیمتر
۸	شیب کانال	۰/۰۰۰۲
۹	تعداد قوس‌ها	۵
۱۰	نسبت شعاع به عرض	۲/۷۵

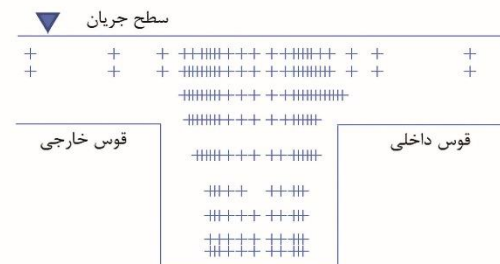
۲.۲. روش تعادل مومنتم (MBM) ۵

این روش بر اساس حل معادله‌ی تعادل مومنتم برای هر نقطه از جریان کار می‌کند. به این صورت که با در نظر گرفتن یک ذره در جریان، هنگامی که ذره‌ی آب به علت نوسان سرعت به سمت بالا حرکت می‌کند، به نقطه‌ای می‌رود که به صورت میانگین، سرعت متوسط در آن نقطه بزرگ‌تر از نقطه‌ی پیشین می‌باشد، اگر فرض کنیم ذره با سرعت اولیه‌ی خود جابه‌جا شود، لذا برای حفظ تعادل مومنتم نیاز است به سمت پایین حرکت کند، به این صورت که در نهایت میانگین مجموعه‌ی سرعت بیش از صفر می‌باشد. در واقع اگر گرادیان سرعت متوسط، صفر در نظر گرفته شود، این شکل نشان می‌دهد حرکت به سمت بالا می‌توانست همان میزان جا به جایی به سمت پایین را موجب شود. بنابراین، وجود گرادیان متوسط سرعت برای صفر نشدن مقدار میانگین زمانی اجزای آشفتگی، ضروری است. در شکل ۴، محور X در راستای جریان و محور Y عمود بر راستای جریان می‌باشد. همچنین $U(y)$ سرعت متوسط طولی در هر نقطه از عمق کانال، u مقادیر لحظه‌ای تغییرات سرعت موازی با جریان و v مقادیر لحظه‌ای تغییرات سرعت عمود بر جریان است.



شکل ۲. نمودارهای سری زمانی سرعت در راستای x، y و z.

شکل ۳ الگوی نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع اصلی (CS_۲) کانال را نشان می‌دهد که با توجه به نقاط اندازه‌گیری، شبکه‌ی محاسباتی تنش برشی برای نقاط مختلف در عرض کانال تعیین شده و برای محاسبه‌ی تنش برشی، معادله‌ی معرفی شده در هر کدام از این نقاط حل می‌گردد. همچنین جدول ۱ ویژگی‌های هندسی مدل فیزیکی را ارائه می‌دهد.



سحل ۱. نقاط اندازه‌گیری سری سرعت در مقطع اصلی کانال پیچانی.

تنش برشی روی محدوده‌ی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{xn} = \mu \frac{\partial u}{\partial n} - \rho uv_n - \overline{\rho u'v'_n} \quad (2)$$

که n جهت نرمال رویه را نشان می‌دهد، $-\rho uv_n$ شار مومنتم ناشی از جریان‌های ثانویه و v_n جز نرمال جریان ثانویه روی محدوده می‌باشد. در سیستم دستگاه مختصات کارتزین، معادله‌ی شماره ۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho uv - \overline{\rho u'v'} \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} - \rho uv - \overline{\rho u'v'}$$

که τ_{xy} و τ_{xz} به ترتیب تنش‌های برشی روی میان‌رویه‌های عمودی و افقی، u و u' ، v و v' و w و w' سرعت متوسط و تغییرات سرعت در جهت‌های x ، y و z می‌باشد.

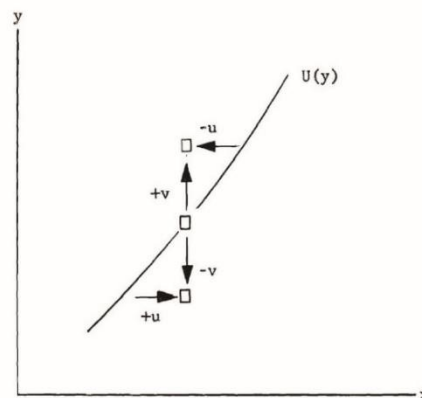
بنابراین برای یک حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۵، تنش برشی متوسط دیواره $\bar{\tau}(y+\Delta y)$ (که بر روی دیواره، از تراز y تا $y+\Delta y$ روی محور y اعمال می‌شود) می‌باشد و معادله‌ی شماره ۱ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho g A_{OMNP} S_f = \iint \tau ds = \int_0^z \tau_{xy_1} dz + \int_0^z \tau_{xy_2} dz + \int_y^{y+\Delta y} \tau_{xz} dy + \int_0^M \tau_{(y+\Delta y)} dy \quad (5)$$

که A مساحت هاشورزده در شکل ۵، τ_{xy_1} و τ_{xy_2} تنش‌های برشی روی محدوده‌های افقی از نقطه‌ی (Z, y) تا نقطه‌ی $(Z, y+\Delta y)$ ، τ_{xz} تنش برشی پایانی معادله‌ی ۵ را با استفاده از معادله‌ی تعادل مومنتم (۶) می‌توان جایگزین کرد.

$$\tau_{xz}(y + \Delta y / 2) \approx \frac{\int_y^{y+\Delta y} \tau_{xz}(y + \Delta y) dy}{\Delta y} \quad (6)$$

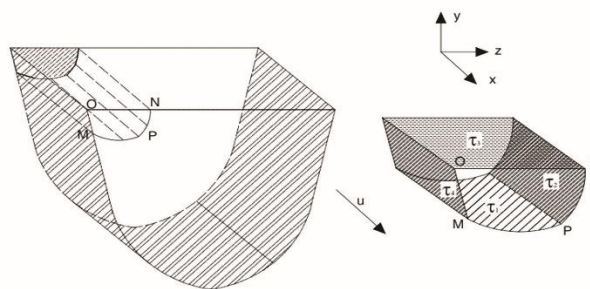
۳.۲. روش قانون لگاریتمی سرعت (LLM)



شکل ۴. انتقال مومنتم ناشی از تغییرات سرعت آشفته (تریسی، ۱۹۶۳) (۱۲۵).

براین اساس، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در یک جریان یکنواخت دائمی و توسعه یافته، معادله‌ی تعادل مومنتم به صورت (۴) رابطه ۱ نوشته می‌شود که در آن با در نظر گرفتن المان OMPN، نیروی گرانشی در جهت x برای یک واحد طول، با نیروی اصطکاک روی محدوده‌ی OMNP در تعادل قرار می‌گیرد.

$$\rho g A_{OMNP} S_f = \iint \tau ds = \int_M^P \tau ds + \int_P^N \tau ds + \int_N^O \tau ds + \int_O^M \tau ds \quad (1)$$



شکل ۵. شبکه‌ی محاسباتی یک مقطع از کانال و سیستم مختصات (ینگ و همکاران، ۲۰۱۲)

در این معادله، ρ چگالی جریان، g شتاب گرانش، A_{OMNP} مساحت ناحیه‌ی OMNP که در شکل ۵ نشان داده شده است. S طول محدوده $OMNP$ ، τ تنش برشی روی محدوده (ON، NP، PM، MO)، S_f شیب خط انرژی، τ_1 تا τ_4 تنش برشی به ترتیب روی محدوده‌های MP، NO، NP و NM، τ_4 تنش برشی مرزی و $\rho g A_{OMNP} S_f$ جز نیروی گرانش در جهت جریان می‌باشد.

کوواریانس دو متغیر X و Z که با معادله ی ۱۱ محاسبه می‌شود، COV-ZY کوواریانس دو متغیر X و y که با معادله ی ۱۳ محاسبه می‌شود، V_X سرعت جریان در راستای محور X، V_Y سرعت جریان در راستای محور y، V_Z سرعت جریان در راستای محور Z و n تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری سرعت می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. پروفیل‌های توزیع سرعت در مقطع‌های منتخب

از آنجا که شناخت الگوی سرعت جریان برای تعیین توزیع تنش برشی در رودخانه‌ها بسیار حائز اهمیت است، بررسی پروفیل‌های توزیع سرعت جریان ضروری‌ست. در شکل ۶، پروفیل عمقی سرعت در راستای جریان، در نقاط مختلف در مقطع اصلی، به ترتیب در مقاطع CS_1 تا CS_5 نشان داده شده است. باتوجه به شکل، مقطع CS_2 با وجود دامنه‌ی تغییرات کمتر در سیلاب‌دشت‌ها نسبت به دو مقطع دیگر، بیشترین مقادیر سرعت را دارد و کمترین تغییرات عمقی سرعت در مقطع CS_5 وجود دارد که با مطالعات شیونو و موتو (۱۹۹۸) [۲۹] و ماریون و زاراملا (۲۰۰۶) [۳۰] منطبق است. در مقطع‌های CS_1 ، CS_3 و CS_4 ، بیشترین مقادیر سرعت طولی، در سطح و عمق جریان، در قوس داخلی مشاهده می‌شود در حالی که در نواحی قوس خارجی شاهد مقادیر کمینه‌ی سرعت طولی می‌باشیم. همچنین تفاوت مقادیر بیشینه‌ی سرعت در سطح جریان، در مقطع‌های CS_1 و CS_5 در مقایسه با عمق و مجاورت کف کانال محسوس‌تر است. در مقطع‌های CS_2 و CS_4 ، جریان تحت‌تاثیر نیروی شتابی، بیشترین سرعت را در سطح و مایل به قوس خارجی دارد. همچنین مقدار کمینه‌ی سرعت طولی در مقطع CS_2 نسبت به مقدارهای مشابه در مقطع CS_4 کمتر است.

یکی از روش‌های رایج در تعیین تنش برشی در کانال‌های باز استفاده از قانون توزیع لگاریتمی سرعت می‌باشد که به صورت معادله ی ۷ نوشته می‌شود (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳) [۲۶]:

$$\frac{u}{u_0} = 2.5 \ln \frac{u_0 y}{v} + 5.5 \quad (7)$$

در این معادله، u سرعت برشی و v گرانروی سینماتیک می‌باشد.

۴.۲. روش تنش برشی رینولدز (RSM)

مدل تنش برشی رینولدز به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرت‌مند محاسبه‌ی تنش برشی در طبیعت، براساس معادلات انتقال برای همه‌ی اجزای تانسورهای تنش رینولدز و نرخ اتلاف کار می‌کند. اگر بخش مماسی تنش را در نظر بگیریم، با عنوان تنش برشی رینولدز شناخته می‌شود که شامل شش جزء می‌باشد: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ، $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ، $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ (ژولین ۱۹۹۸) [۲۷]. برای محاسبه‌ی شش جزء تنش برشی رینولدز با استفاده از داده‌های ADV، به‌علت وجود تلاطم، از پارامتر آماری کوواریانس استفاده شد (وال ۲۰۰۰) [۲۸]. در هر کدام از روابط ۸ تا ۱۳ از دو جزء سرعت جریان از میان سه جزء V_X ، V_Y و V_Z استفاده شده است.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \times (COV - XY) \quad (8)$$

$$COV - XY = \frac{\sum V_x V_y}{n-1} - \frac{\sum V_x \sum V_y}{n(n-1)} \quad (9)$$

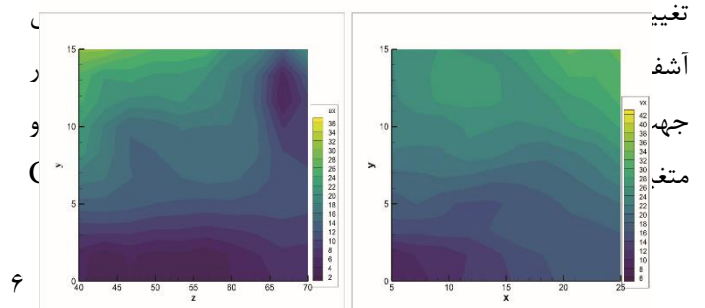
$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = -\rho \times (COV - XZ) \quad (10)$$

$$COV - XZ = \frac{\sum V_z V_x}{n-1} - \frac{\sum V_z \sum V_x}{n(n-1)} \quad (11)$$

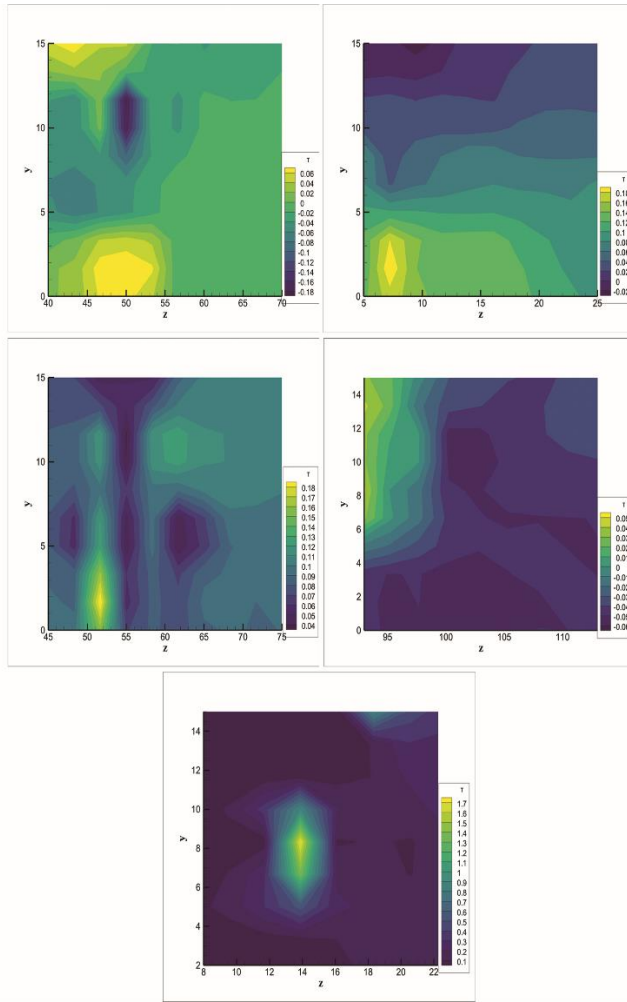
$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = -\rho \times (COV - YZ) \quad (12)$$

$$COV - ZY = \frac{\sum V_y V_z}{n-1} - \frac{\sum V_y \sum V_z}{n(n-1)} \quad (13)$$

که τ_{xy} تنش برشی آشفته‌گی که در امتداد محور y عمل می‌کند و با



موقعیت قرارگیری مقطع CS_5 و اتلاف انرژی در دو قوس اول (CS_1) و دوم (CS_2) مورد انتظار بود.



شکل ۶. توزیع عرضی u_x در مقطع‌های CS_1 - CS_5

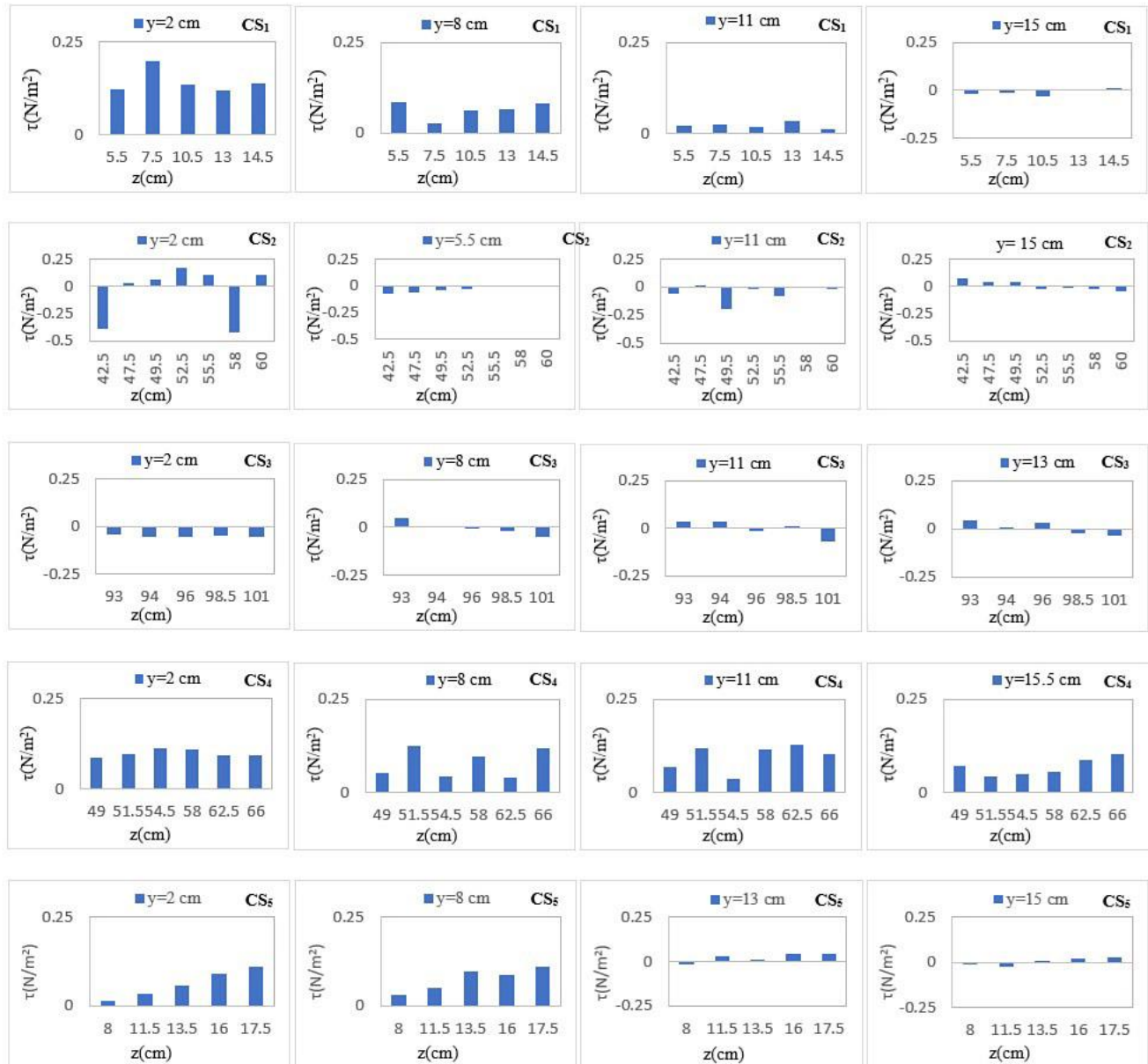
۳.۲. توزیع تنش برشی در مقطع ۶-های منتخب با استفاده از روش MBM

باتوجه به توضیحات اشاره شده در بخش ۲-۲، مقدار تنش برشی به روش MBM، در پنج مقطع مورد نظر محاسبه شده و نتایج در شکل ۷ آورده شده است. در ورودی قوس اول (CS_1)، تنش برشی بستر در قوس خارجی بیشترین مقادیر را دارد و به تدریج هنگام خروج از قوس اول و رسیدن به قوس دوم (CS_2) توزیع بیشینه‌ی تنش برشی را میل به مرکز مقطع و نیز در سطح جریان، در سیلاب‌دشت سمت چپ مشاهده می‌کنیم که با نتایج لیاقت و همکاران (۱۳۹۸) و کای‌ها و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. با پیشروی جریان به سمت قوس دوم (CS_3)، بیشینه‌ی تنش برشی به قوس داخلی کشیده می‌شود. پیش از ورود به قوس سوم همچنان تمرکز بیشینه‌ی تنش در نزدیک بستر و ساحل راست می‌باشد که در قوس سوم (CS_5)، با کاهش محسوس مقادیر تنش در سراسر مقطع اصلی، به سمت مرکز کانال متمایل می‌شود. همچنین مطابق با روش RSM، کمترین مقادیر توزیع تنش در مقطع CS_5 مشاهده می‌شود. که این نتیجه باتوجه به

شکل ۷. توزیع عرضی تنش برشی در مقطع‌های CS_1 - CS_5 با استفاده از روش MBM.

در شکل ۸ توزیع عمقی تنش در چهار عمق مختلف جریان در مقطع اصلی در مسیر جریان آورده شده است. این نقاط براساس شبکه-ی محاسباتی مرتبط با نقاط اندازه‌گیری سرعت تعیین شد. به این-صورت که در هر مقطع، در چهار نقطه در راستای محور Y و در نقاط مختلف عرضی (راستای محور Z) مقادیر تنش برشی محاسبه شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش MBM کمترین مقادیر را در بیشینه‌ی عمق مجرای اصلی محاسبه می‌کند. علت این امر قرار گرفتن در محدوده‌ی انتقال مومنتم γ می‌باشد که به دلیل تلاطم جریان، مقادیر

اجزای معادله‌ی ۵ با اعمال ضرایب مثبت و منفی، مقادیر کوچک‌تری از تنش را محاسبه می‌کنند. این امر با ماهیت جریان متلاطم مطابقت دارد. بیشترین مقادیر منفی تنش در مقطع‌های CS_2 و CS_3 و در عمق جریان نزدیک به کف مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد در راس قوس دوم و جریان ورودی به قوس دوم، که جریان در مقطع پیچانی در حال توسعه است، در مقایسه با دیگر مقطع‌ها، اجزای تنش برشی مقادیر منفی بیشتری محاسبه می‌کنند. همچنین مقطع چهارم با توجه به عرض برابر جریان در سیلاب‌دشت‌ها و کاهش تنش ناشی از جریان در قوس، بیشتر مقادیر تنش را در عمق نشان می‌دهد.



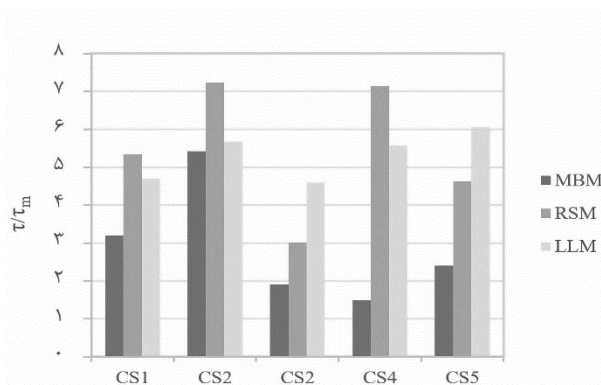
شکل ۸. توزیع عمقی تنش برشی در مقطع‌های CS_1 - CS_5 با استفاده از روش MBM

۳.۲. توزیع تنش برشی در مقطع‌های منتخب با استفاده از روش تنش برشی رینولدز (RSM) با توجه به توضیحات اشاره شده در بخش ۴/۲، مقادیر تنش برشی در نقاط مختلف مجرای اصلی جریان در پنج مقطع CS_1 - CS_5 محاسبه شد و نتایج به صورت نواحی هم‌تراز در شکل ۹ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، به تدریج از مقادیر تنش برشی در مسیر کاسته می‌شود به طوری که مقطع CS_5 کمترین میزان توزیع تنش را دارد و دلیل این امر اتلاف انرژی در طول مسیر به دلیل حضور دو قوس در بالادست این مقطع می‌باشد. میزان بیشینه‌ی تنش برشی در مقطع CS_1 ، در قوس خارجی و در کف بستر و به تدریج در مقطع CS_4 به مرکز جریان و با فاصله از بستر منتقل می‌شود. همین‌طور می‌توان الگوی مشابه بیشینه‌ی تنش در کف قوس خارجی و سطح جریان قوس داخلی را در سه مقطع CS_1 ، CS_2 و CS_3 مشاهده نمود.

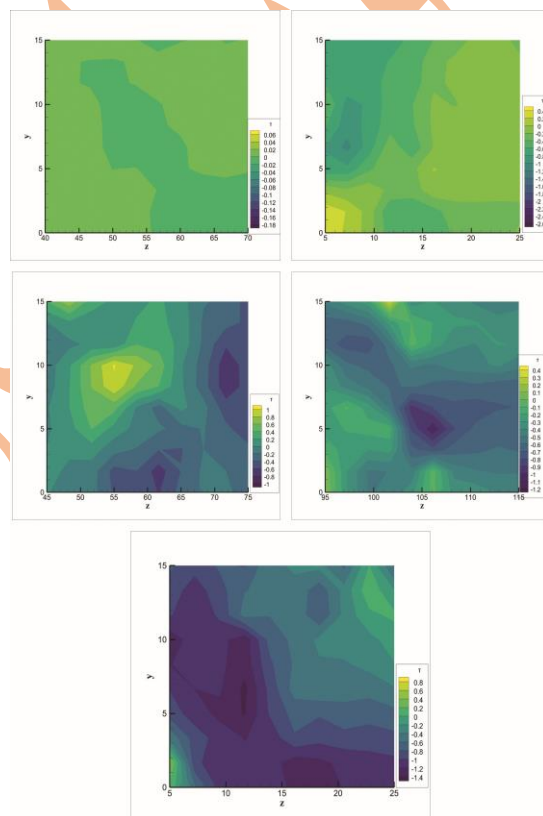
جدول ۲. مقدار بیشینه‌ی نسبی تنش برشی در کانال اصلی مقطع های CS_1 تا CS_5 (τ/τ_m)

نام روش	CS_1	CS_2	CS_3	CS_4	CS_5
MBM	۲,۴۰	۱,۴۹	۱,۹۱	۵,۴۳	۳,۲۰
RSM	۴,۶۳	۷,۱۵	۳,۰۲	۷,۲۴	۵,۳۵
LLM	۶,۰۵	۵,۵۸	۴,۶۰	۵,۶۷	۴,۷۰



۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به اهمیت برآورد مقادیر تنش برشی در رودخانه‌ها، بررسی روش‌های ارائه شده برای تعیین این پارامتر مورد توجه قرار گرفت که از این بین، با توجه به ماهیت مکانیسم سه بعدی و پیچیده‌ی جریان در آبراهه‌های طبیعی، روش MBM که برای کانال‌های مستقیم معرفی شده بود، برای اندازه‌گیری تنش برشی در آبراهه‌های پیچان رودی در عمق‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت. به این صورت که مقادیر اجزای سرعت در پنج مقطع یک مدل فیزیکی کانال مرکب پیچانی، اندازه‌گیری شد. سپس بر اساس روش MBM،



شکل ۹. توزیع عرضی تنش برشی در مقطع‌های CS_1 - CS_5 با استفاده از روش RSM.

۳.۴. مقایسه‌ی بیشینه‌ی تنش برشی در مقطع‌های منتخب تعیین نواحی بیشینه‌ی تنش برشی می‌تواند در مطالعات جریان و رسوب و مسائل مرتبط با نگهداری رودخانه، مانند فرسایش بستر به ویژه در قوس‌ها تاثیرگذار باشد. بنابراین، مقادیر بیشینه‌ی محاسباتی تنش برشی با توجه به موقعیت مکانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه در چهار عمق نسبی منتخب در هر کدام از پنج مقطع در

- compound meandering open channel by algebraic Reynolds stress model”, Int. J. Numer. Meth. Fluids; ۵۱:۷۹۱-۸۱۸, (۲۰۰۶).
۲. Zahiri, A. Amini, R. and Kordi, H. “Numerical simulation of velocity lateral distribution in meandering compound channels”. J. of Water and Soil Conservation, Vol. ۱۹(۳), (In Persian) (۲۰۱۲).
 ۳. Liaghat, A. Adib, A. and Gafouri, H. R. “Development of a Method for Determination of Location of Maximum Shear Stress in River Bends” (Verification of Report NO. ۵۹۲, Iranian Energy Ministry. (In Persian) (۲۰۲۰).
 ۴. Knight, D.W. & Shiono, K.” Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel”. J. Hydraul. Res. ۲۸, ۱۷۵-۱۹۶, (۱۹۹۰).
 ۵. Shokri, M. and Mehdipour, R. “Numerical Study of the Effects of Non-Prismatic Floodplain Divergence Angle on Flow Velocity in the Cross Section of Compound Channels”, Journal of Environment and Water Engineering, ۷(۳), ۴۵۴-۴۶۴ (۲۰۲۱).
 ۶. Knight, D.W. and Shiono, K. “Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel”, Journal of Hydraulic Research ۲۸(۲):۱۷۵-۱۹۶, (۱۹۹۰).
 ۷. Guo, J. and Julien, P. Y. “Shear stress in smooth rectangular open-channel flows”, Journal of Hydraulic Engineering, ۱۳۱(۱): ۳۰-۳۷ (۲۰۰۵).
 ۸. Yang, S. Q. and Lee, J. W. “Reynolds shear stress distributions in a gradually varied flow in a roughened channel”, Journal of Hydraulic Research, ۴۵(۴), ۴۶۲-۴۷, (۲۰۰۷)
 ۹. Sterling, M., Beaman, F., Morvan, H., and Wright, N. “Bed shear stress characteristics of a simple, prismatic, rectangular channel”. Journal of Hydraulic Engineering ۱۳۴: ۱۰۸۵-۱۰۹۴, (۲۰۰۸).
- توزیع عرضی تنش در مجرای اصلی جریان و نیز توزیع عمقی در چهار عمق نسبی مختلف و در مقطع ۳-های منتخب بررسی شد. سپس با توجه به عملکرد روش RSM که در زمینه‌ی برآورد توزیع تنش در جریان‌های آشفتگی سه بعدی، نتایج مطلوبی ارائه می‌کند، توزیع تنش عرضی تعیین شد. روش کلاسیک محاسبه‌ی تنش‌ها در کانال‌های مستقیم (LLM)، علاوه بر روش متداول سه‌بعدی تنش برشی رینولدز، برای مقایسه در نظر گرفته شدند. نتایج حاکی از روند افزایشی تنش از ورودی قوس اول می‌باشد که بیشینه‌ی آن در بستر قوس خارجی دیده می‌شود و به تدریج در قوس سوم به سمت مرکز کانال کشیده می‌شود. همچنین مقادیر تنش در هر دو روش RSM و MBM با اتلاف انرژی در مسیر جریان، در مقطع دCS کاهش محسوسی می‌یابد.
- مقدار بیشینه‌ی نسبی تنش برشی نسبی در پنج مقطع انتخابی نیز برای سه روش مورد بررسی، به ترتیب در روش‌های RSM, MBM و LLM، ۵/۴۳، ۷/۲۴ و ۴/۰۵ در مقطع شماره ۴ و ۶/۰۵ در مقطع شماره ۱ بوده است. بنابراین می‌توان از روش MBM در تعیین تنش برشی در پیچان‌رودها بهره برد.

پانوشتها

۱. Log-Law Method
۲. Turbulent Kinetic Energy
۳. Reynolds Shear Stress
۴. Down-looking
۵. Momentum Balance Method
۶. Interface
۷. Momentum Exchange

منابع (References)

۱. Sugiyama, H., Hitomi, D. and Saito, T. “Numerical analysis of turbulent structure in
۱۰. Ursic, M. E. “Qualification of Shear Stress in A Meandering Native Topographic Channel Using a Physical Hydraulic Model”, Colorado State University, Engineering Research Center, (۲۰۱۲).

۱۱. Fazli M, Ghodsian M, Saleh Neyshabouri, AA. "Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend". *Int J Sediment Res*; ۲۳: ۵۶-۶۸, (۲۰۰۸).
۱۲. Gendeshmin AS, Neyshabouri SAAS, Zarrati AR, Ghodsian M. "Investigation of Wall Shear Stress Distribution in Open Channel Uniform Flow using an Accurate Instrument and Numerical Simulation". *J Hydraul.*, ۵(۱): ۵۱ (۲۰۱۰).
۱۳. Baird, D. C. "Turbulent flow and suspended sediment transport in a mobile, sand bed channel with riprap side slopes." Ph.D. dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of New Mexico (۲۰۰۴).
۱۴. Omran, M. and Knight, D. W. "Modelling secondary cells and sediment transport in rectangular channels", *Journal of Hydraulic Research* Vol. ۴۸(۲), ۲۰۵-۲۱۲, (۲۰۱۰).
۱۵. Naghavi, M., Mohammadi, M. and Mahtabi, Gh., "Turbulence Intensity and Boundary Shear Stress in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Changes", ۱۸(۶۰), ۵۳-۶۹. (In Persian) (۲۰۲۰).
۱۶. Zarrati, A. R., Jin, Y. and Karimpour, S., "Semianalytical Model for Shear Stress Distribution in Simple and Compound Open Channels". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ۱۳۴(۲), pp ۲۰۵-۲۱۵. (In Persian) (۲۰۰۸).
۱۷. Alfadhli, I., Yang, S. & Sivakumar, M. "Distribution of Reynolds shear stress in steady and unsteady flows", *SGEM: ۱۳th International Multidisciplinary Scientific Geo conference*, Bulgaria, pp. ۱۰۹-۱۱۶ (۲۰۱۳).
۱۸. Koftis, T. and Prinos, P. "Reynolds stress modeling of flow in compound channels with vegetated floodplains", *Journal of Applied Water Engineering and Research*, ۶:۱, ۱۷-۲۷, (۲۰۱۸).
۱۹. Khatua, K., K. & Patra, K., C. "Boundary shear stress distributions in compound open channel flow", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, ۱۳:۳, ۳۹-۵۴, (۲۰۰۷).
۲۰. Kai-hua, C., Yun-feng, X., Shi-zhao, Z., Yun-cheng, W and Hua, X. "Experimental Research on Boundary Shear Stress in Typical Meandering Channel", *Journal of China Ocean Eng.*, Vol. ۳۲, No. ۳, P. ۳۶۵-۳۷۳, (۲۰۱۸).
۲۱. Farshi, F., Kabiri-Samani, A. and Cjamani, M. "Boundary Shear Stress Distribution in Curved Compound Open Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ۱۴۷(۲), ۴۰۰۲۰۰۹۹ (۲۰۲۱).
۲۲. Yang, S.Q., Dharmasiri, N. and Han, Y." Momentum balance method and estimation of boundary shear stress distribution", *Journal of Hydraulic Engineering*, ۱۳۸(۷), ۶۵۷-۶۶۰, (۲۰۱۲).
۲۳. Han, Y., Yang, S. & Dharmasiri, N. (۲۰۱۲). "Application of main flow data in the determination of boundary shear stress in smooth closed ducts", *World Environmental and Water Resources Congress*, (pp. ۱۱۷۵-۱۱۸۵) (۲۰۱۲).
۲۴. Sontek, "Acoustic Doppler Velocimeter (Field) Technical Documentation". Sontek/YSI, Inc., San Diego, CA, (۲۰۰۱).
۲۵. Tracy, H., J. "Turbulent flow in a three-Dimensional channel", PhD thesis, Georgia Institute of Technology, (۱۹۶۳).
۲۶. Nezu, I., and Nakagawa, H. Ed. "Turbulence in open-channel flows", Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands, (۱۹۹۳).
۲۷. Julien, P.Y. "Erosion and Sedimentation". Cambridge University Press, New York, NY, (۱۹۹۸).
۲۸. Wahl, T.L., "Analysing ADV Data Using WinADV". Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management"– Minneapolis, Minnesota, (۲۰۰۰).
۲۹. Shiono, K., & Muto, Y. "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow". *Journal of fluid mechanics*, ۳۷۶, ۲۲۱-۲۶۱, (۱۹۹۸).
۳۰. Marion A. and Zaramella M. "Effects of Velocity Gradients and Secondary Flow on the Dispersion of Solutes in a Meandering

- Channel”, Journal of Hydraulic Engineering, ۱۳۲: ۱۲۹۵-۱۳۰۲, (۲۰۰۶).
۳۱. Imagbe, L. O. “Sediment Grains Entrainment: Comparing Bed Shear Stress Estimation Methods”, Journal of Geology & Geophysics, ۱۰(۸), ۱۰۰۱۰۰۴ (۲۰۲۱).
۳۲. Yang, S.Q. “Depth-averaged shear stress and velocity in open-channel flows”, Journal of Hydraulic Engineering, ۱۳۶(۱۱), pp.۹۵۲-۹۵۸, (۲۰۱۰).

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی عمران