

ارزیابی روش تعادل مومنتم در تعیین تنش برشی آبراهه‌های سیلاب‌دستی پیچانی

وحیده مرتضوی امیری (دانشجوی دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۲، صص. ۱۲-۲۲، (پژوهشی)

با توجه به ماهیت سه‌بعدی و پیچیده‌ی جریان در آبراهه‌های سیلاب‌دستی پیچانی و به‌ویژه براساس نقش مؤثر جریان‌های ثانویه و انتقال مومنتم در قوس‌ها، محاسبه‌ی پارامتر تنش برشی توسط روش‌های ارائه‌شده برای کانال‌های مستقیم با چالش‌هایی مواجه است. روش تعادل مومنتم، که براساس حل معادله‌ی تعادل مومنتم برای نقاط جریان کار می‌کند، می‌تواند در تعیین پارامتر تنش برشی در کانال‌های پیچانی استفاده شود. در یک مدل فیزیکی، شامل یک آبراهه‌ی آزمایشگاهی مستطیلی، مجرای پیچانی همراه با دو سیلاب-دشت، 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 به‌ترتیب ۵/۴۳ و ۷/۲۴ در مقطع چهارم و ۶/۰۵ در مقطع اول بوده است. 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

در واقع، در چنین جریان‌هایی، افزایش تنش برشی ناشی از ترکیب جریان عمقی و جریان ثانویه است (لیاقت و همکاران، ۲۰۲۰).^[۳] تبادل مومنتم زیادی که بین جریان سریع‌تر در کانال اصلی و جریان آرام‌تر در سیلاب‌دشت در کانال‌های باز اتفاق می‌افتد، موجب تولید لایه‌ی برشی عرضی بین دو نوع جریان در حد فاصل مجرای اصلی و سیلاب‌دشت می‌شود. انتقال مومنتم فقط به‌دلیل آشفتگی بستر اتفاق نمی‌افتد، بلکه آشفتگی ناشی از تنش برشی سطح آزاد و جریان‌های ثانویه هم مؤثر هستند. ساختار آشفتگی در لایه‌های برشی عرضی 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 کند (شکری و مهدی‌پور، ۲۰۲۱).^[۵] در دهه‌های اخیر، مطالعات فراوانی برای تعیین تنش برشی در کانال‌های مستقیم و مرکب (نایت و شیونو ۱۹۹۰، ژو و ژولین، ۲۰۰۵،^[۶] ینگ و همکاران، ۲۰۰۷،^[۷] استرلینگ^۵ و همکاران، ۲۰۰۸،^[۸] اورسیک، ۲۰۱۲،^[۹]

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های جریان در کانال‌های باز، توزیع تنش برشی است. 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 آبراهه‌های مذکور در این مقطع‌ها، تنش برشی تحت تأثیر عوامل مختلف، بسیار تأثیرگذار باشد. مانند: جریان ثانویه، انتقال مومنتم، هندسه‌ی مقطع، عمق نسبی، و هم‌زمان تأثیر-مجاری روباز، پذیری این عوامل از یکدیگر است. یکی از پیچیده‌ترین جریان‌ها در جریان آشفته در کانال‌های سیلاب‌دستی پیچانی است (سوگیاما، ۲۰۰۶).^[۱۱] در کانال‌های باز، علاوه بر نیروی گریز از مرکز، تنش برشی عرضی بین جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز مهم است و قدرت جریان ثانویه را تشدید می‌کند. این مکانیزم، افت انرژی را افزایش و دبی جریان را کاهش می‌دهد (ظهیری،

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵.

استناد به این مقاله:

مرتضوی امیری، وحیده و اسماعیلی، کاظم، ۱۴۰۳. ارزیابی روش تعادل مومنتم در تعیین تنش برشی آبراهه‌های سیلابی دستی پیچانی. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص. ۱۲-۲۲. DOI:10.24200/j30.2023.62710.3239

^۴ Yang

^۵ Sterling

^۱ Sugiyama

^۲ Knight & Shiono

^۳ Guo & Julien

(۲۰۲۱)^[۲۰]، یک مدل تحلیلی برای ارزیابی تنش برشی مرزی در قوس کانال-های باز توسعه دادند. نتایج حاکی از انطباق مناسب داده‌های آزمایشگاهی و مدل ارائه‌شده بود.

یکی از روش‌های ارائه‌شده برای محاسبه پارامتر ذکرشده، روش تعادل مومنت است، که توسط ینگ و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۱] انجام شد. ایشان روش تعادل مومنت را برای محاسبه 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 روش تعادل مومنت با دیگر روش‌ها اعلام کردند که روش مذکور تطابق خوبی با دیگر روش‌ها دارد و احتمالاً می‌تواند برای بازه‌ی وسیعی از محدوده‌های مرزی استفاده شود. هن^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۲] از مدل تعادل مومنت برای محاسبه‌ی تنش در داده‌های آزمایشگاهی استفاده کردند و دریافتند که روش تعادل مومنت بدون اعمال ضریب تجربی، قادر به پیش‌بینی مقادیر تنش برشی در کانال‌های مستقیم خواهد بود. همچنین مقایسه‌ی روش تعادل مومنت با دیگر روش‌ها نشان داد که روش تعادل مومنت با بالاترین میزان خطای ۱۵/۵٪ در مجاور بستر (۰/۵- Z/h)، مطابقت خوبی با دیگر روش‌های اندازه‌گیری تنش برشی دارد.

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. بنابر آنچه اشاره شد، با توجه به ماهیت سه‌بعدی و پیچیده‌ی جریان در رودخانه‌های پیچانی، روش‌هایی که با به-کارگیری تأثیر جریان‌های ثانویه و نوسان‌های سرعت در سه بُعد، تنش برشی را محاسبه می‌کنند، می‌توانند در این زمینه نتایج دقیق‌تری تولید کنند. بر این اساس، در پژوهش حاضر، روش تعادل مومنت به دلیل در نظر گرفتن ترم-های جریان‌های ثانویه و تبادل مومنت، به‌عنوان روش مؤثر برای تعیین تنش برشی در مدل‌های پیچانی و در کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. بنابراین با بررسی پیشینه‌ی پژوهشی و توجه به اینکه روش تعادل مومنت به‌ویژه در مقطع‌های مرکب کاربرد دارد، اما هنوز در مقطع‌های پیچانی استفاده نشده است، به‌نظر می‌رسد کاربرد آن در پژوهش حاضر و مقایسه با روش‌های دیگر، می‌تواند توانایی روش یادشده را برای برآورد تنش برشی در این شرایط، ارزیابی کند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش، از کانال بتنی با مقطع اصلی پیچانی و مستطیل و سیلاب-دشت‌های مستطیلی، که بستر صلب داشتند، استفاده شده است. در شکل ۱،

با روش‌های توزیع لگاریتمی سرعت (LLM)^۱، انرژی جنبشی آشفتگی (TKE)^۲، و تنش برشی رینولدز (RSS)^۳ به دو صورت مطالعات عددی و آزمایشگاهی در شرایط جریان یکنواخت و غیریکنواخت انجام شده است. فضلی و همکاران (۱۳۸۸)^[۱۰] به بررسی نتایج روش‌های مختلف تعیین تنش برشی در قوس ۹۰ درجه پرداختند. صفرزاده و همکاران (۱۳۹۰)^[۱۱] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت و تنش، روش‌های قانون لگاریتمی سرعت، درگ، رینولدز، TKE و TKEW' را با یکدیگر مقایسه کردند و نتایج حاکی از تناسب دو روش تنش برشی رینولدز و انرژی جنبشی اصلاح‌شده با اختلاف به ترتیب ۱۸/۳ و ۲۴/۴ درصد بود. برد^۴ (۲۰۰۴)^[۱۲] روش درون‌یابی خطی را برای محاسبه‌ی تنش برشی با استفاده از داده‌های ADV ارائه کرد. عمران و نایت^۵ (۲۰۱۰)^[۱۳] با استفاده از چهار سری داده‌ی آزمایشگاهی در کانال مستقیم با مقطع مستطیل، با استفاده از یک روش بهبودیافته‌ی مدل میانگین عمقی تلاش کردند تا در مقایسه با مدل SKM، که فاقد تأثیر جریان-های ثانویه در تعیین تنش برشی بود، به نتایج دقیق‌تری برای تعیین توزیع سرعت و تنش برشی دست یابند. نقوی و همکاران (۱۳۹۹)^[۱۴] با استفاده از مدل عددی FLOW ۳D، توزیع سرعت و تنش برشی در یک کانال مرکب پیچانی را تحت تأثیر سینوسیته‌ی‌های مختلف بررسی کردند و نتایج حاکی از کاهش ۵۰ درصدی تنش برشی در اثر افزایش ۶۴ درصدی میزان سینوسیته بود.

زراتی^۷ و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۵] با استفاده از روش تنش برشی رینولدز، توزیع تنش برشی را در یک کانال مستقیم مرکب با در نظر گرفتن تأثیر لایه‌ی برشی ایجادشده توسط جریان ثانویه تعیین کردند. الفدهلی^۸ و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۶] در پژوهشی نشان دادند شتاب جریان و کاهش یا افزایش سرعت جریان می‌تواند تأثیر مهمی در توزیع رینولدز برشی در جریان‌های دائمی و غیردائمی داشته باشد. کوفتیس و پرینوس^۹ (۲۰۱۸)^[۱۷] با بررسی تنش برشی رینولدز در کانال مرکب دوزنقه‌یی با سیلاب‌دشت همراه با پوشش گیاهی نشان دادند که به‌دلیل تبادل مومنت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت دارای پوشش گیاهی، با افزایش میزان آشفتگی و تنش، نفوذ آشفتگی در محدوده‌ی کانال اصلی و سیلاب‌دشت مشاهده می‌شود. خاتوا و پاترا^{۱۰} (۲۰۰۷)^[۱۸] توزیع تنش برشی را در کانال اصلی و سیلاب‌دشت مقطع مرکب مستقیم و پیچانی با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها رابطه‌ی برای توزیع تنش در سیلاب-دشت‌های مقطع‌های مرکب پیچانی با استفاده از پارامترهای عمق نسبی، نسبت ارتفاع به عرض، ضریب زبری سیلاب‌دشت نسبت به کانال اصلی و عرض نسبی ارائه کردند. کای-ها^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۹] با ایزاری جدید به نام MEMS^{۱۲}، که دارای حسگر تنش برشی است، توزیع تنش برشی مرزی را در یک کانال پیچانی طبیعی بررسی و فاصله‌ی موقعیت مکانی پیشینه‌ی تنش برشی دیواره نسبت به کف کانال را تعیین کردند. فرشی و همکاران

^۸ Alfadhli

^۹ Koftis & Prinos

^{۱۰} Khatua & Patra

^{۱۱} Kai-hua

^{۱۲} Micro-Electro-Mechanical System

^{۱۳} Han

^۱ Log-Law Method

^۲ Turbulent Kinetic Energy

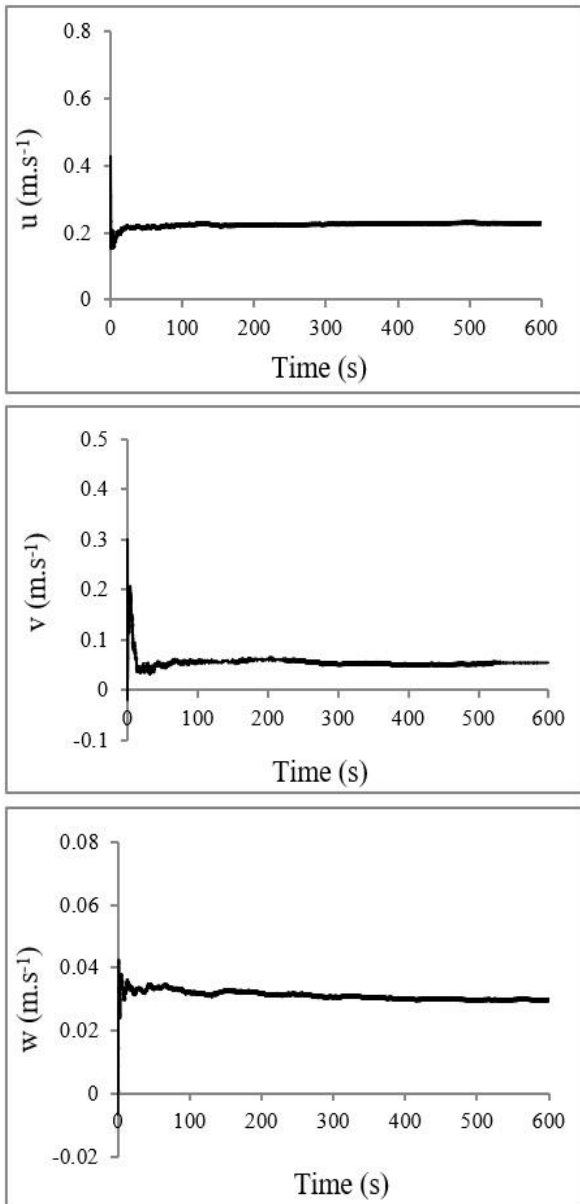
^۳ Reynolds Shear Stress

^۴ Baird

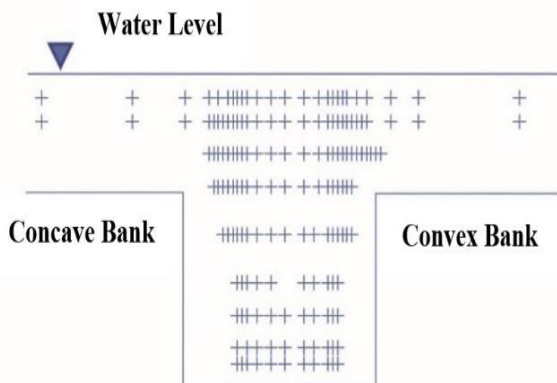
^۵ Omran & Knight

^۶ sinuosity

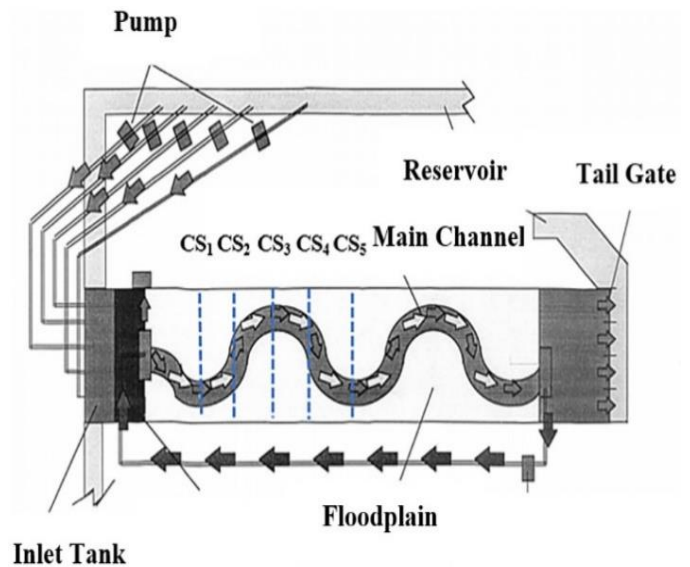
^۷ Zarrati



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



شکل ۳. نقاط اندازه گیری سرعت در مقطع اصلی کانال بیچانی.



شکل ۱. شماتیک مدل آزمایشگاهی در پژوهش حاضر.

نمایی شماتیک از مدل فیزیکی مشاهده می‌شود. عرض کانال ۱۲۰ سانتی‌متر، مجرای اصلی ۲۰ سانتی‌متر و سیلاب‌دشت‌ها در مسیر جریان بین ۰/۰۵ تا ۰/۹۵ متغیر بودند. طول مدل ۱۰ متر و در ورودی مدل، به‌منظور استهلاک تلاطم بین ۵ تا ۹۵ سانتی‌متر جریان، یک مجموعه از شبکه‌های فلزی و گراول استفاده شده است. دبی ۲۲/۳ لیتر بر ثانیه توسط پمپ در یک سیستم بازچرخانی تأمین شد و سه دریچه در پایین‌دست کانال، تنظیم عمق جریان را ممکن می‌ساخت. شیب طولی کانال، ۰/۰۰۰۲ بود.

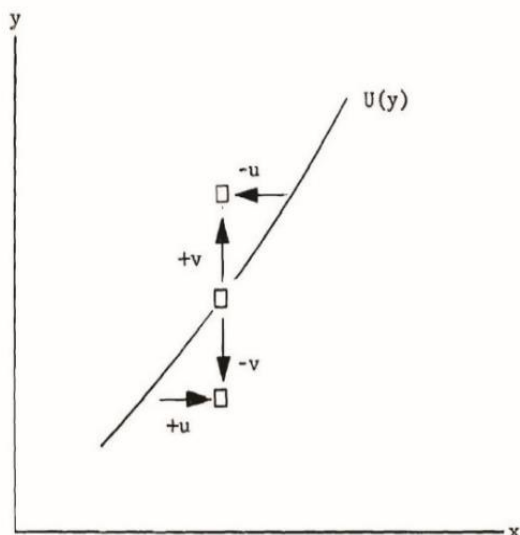
برای اندازه‌گیری سرعت در نقاط مشخص‌شده‌ی مقطع اصلی جریان، از یک سرعت‌سنج صوتی (ADV)^۱ با بسامد ۲۵ هرتز استفاده شد،^[۲۳] که به‌صورت پایین‌نگر^۲ بود و امکان اندازه‌گیری سرعت در سه بُعد را فراهم می‌کرد. ایستایی سری‌های زمانی در دو نقطه در طول توسعه‌یافته‌ی جریان بررسی شد. سپس، در دو نقطه‌ی اخیر، در عمق میانه و بستر کانال، در هر سه بُعد جریان، نمودار سری زمانی سرعت به مدت ۶۰۰ ثانیه ثبت شد (شکل ۲)، که با توجه به ثبات تغییرات سرعت بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه، این مدت زمان برای ثبت داده‌های سرعت در نقاط شبکه‌ی مشخص‌شده در نظر گرفته شد.

داده‌های سرعت اندازه‌گیری‌شده توسط نرم‌افزار Vectrino ثبت شدند و سپس مرحله‌ی فیلترکردن داده‌ها در محیط نرم‌افزار WinADV با شرایط $\text{Minimum SNR} > 15$ و $\text{Minimum correlation} > 70$ و همچنین مدل آماری Phase-space threshold despiking انجام شد.

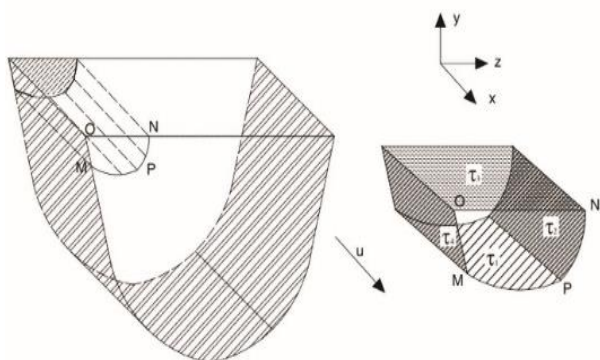
در شکل ۳، الگوی نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع اصلی (CS_۲) کانال مشاهده می‌شود، که با توجه به نقاط اندازه‌گیری، شبکه‌ی محاسباتی تنش برشی برای نقاط مختلف در عرض کانال تعیین و برای محاسبه‌ی تنش برشی، معادله‌ی معرفی‌شده در هر کدام از نقاط مذکور حل شده است. همچنین در جدول ۱، ویژگی‌های هندسی مدل فیزیکی ارائه شده است.

^۱ Acoustic Doppler Velocimeter

^۲ Down-looking



شکل ۴. انتقال مومنتم ناشی از تغییرات سرعت آشفته (تربسی)، [۲۴].(۱۹۶۳)



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

PM و MO)، τ تنش برشی روی محدوده‌ی OMNP، S_f شیب خط انرژزی، τ_1 تا τ_3 تنش‌های برشی به ترتیب روی محدوده‌های MP، NO و NP، τ تنش برشی مرزی، و $\rho g A_{OMNP} S_f$ جزء نیروی گرانش در جهت جریان هستند.

تنش برشی روی محدوده، به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

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

که در آن، n جهت نرمال روبه، $-\rho u v_n$ شار مومنتم ناشی از جریان‌های ثانویه، و v_n جزء نرمال جریان ثانویه روی محدوده هستند. در سیستم دستگاه مختصات کارترین، معادله‌ی ۲ به صورت روابط ۳ و ۴ نوشته می‌شود:

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

$$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} - \rho u w - \overline{\rho u' w'} \quad (4)$$

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	۴
۱۰	نسبت شعاع به عرض	۲/۷۵

۲.۲. روش تعادل مومنتم (MBM) ^۱

روش MBM، براساس 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 نقطه‌ی می‌رود که به صورت میانگین، سرعت متوسط در آن نقطه بزرگ‌تر از نقطه‌ی پیشین است، اگر فرض شود ذره با سرعت اولیه‌ی خود جابجا 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 است. در واقع، اگر گرادیان سرعت متوسط، صفر در نظر گرفته شود، این شکل نشان می‌دهد حرکت به سمت بالا می‌توانست همان میزان جابجایی به سمت پایین را موجب شود. بنابراین، وجود گرادیان متوسط سرعت برای صفر نشدن مقدار میانگین زمانی اجزاء آشفته‌گی ضروری است. در شکل ۴، محور X در راستای جریان و محور Y عمود بر راستای جریان است. همچنین $U(y)$ سرعت متوسط طولی در هر نقطه از عمق کانال، u مقادیر لحظه‌ی تغییرات سرعت موازی با جریان و v مقادیر لحظه‌ی تغییرات سرعت عمود بر جریان هستند.

بر این اساس، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در یک جریان یکنواخت دائمی و توسعه‌یافته، معادله‌ی تعادل مومنتم به صورت رابطه‌ی 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.

$$\rho g A_{OMNP} S_f = \iint \tau ds = \int_M^P \tau_1 ds + \int_P^N \tau_2 ds + \int_N^O \tau_3 ds + \int_O^M \tau_4 ds \quad (1)$$

که در آن، ρ چگالی جریان، g شتاب گرانش، A_{OMNP} مساحت ناحیه‌ی OMNP که در شکل ۵ مشاهده می‌شود. S طول محدوده‌ی 2 (ON, NP).

^۲ Interface

^۱ Momentum Balance Method

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

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

که در آن‌ها، تنش برشی آشفته‌گی است، که در امتداد محور Y عمل می‌کند و با تغییرات سرعت در جهت محور X تولید می‌شود؛ تنش برشی آشفته‌گی است، که در امتداد محور Y عمل می‌کند و با تغییرات سرعت در جهت محور X تولید می‌شود؛ ρ چگالی؛ $COVXY$ کوواریانس دو متغیر X و Y است (معادله ۹)؛ $COVZX$ کوواریانس دو متغیر X و Z است (معادله ۱۱)؛ $COVZY$ کوواریانس دو متغیر X و Y است (معادله ۱۳)؛ همچنین 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 هستند.

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 ضروری است. در شکل ۶، پروفیل عمقی سرعت در راستای جریان، در نقاط مختلف در مقطع اصلی، به ترتیب در مقطع‌های CS_1 تا CS_5 مشاهده می‌شود. با توجه به شکل مذکور، مقطع CS_4 با وجود دامنه‌ی تغییرات کمتر در سیلاب-دشت‌ها 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^[۲۸] (۱۹۹۸)، و ماریون و زاراملا^[۲۹] (۲۰۰۶)، منطبق است. در مقطع‌های CS_1 ، CS_3 و CS_5 ، بیشترین مقادیر سرعت طولی، در سطح و عمق جریان در قوس داخلی مشاهده می‌شود؛ در حالی که در نواحی قوس خارجی، مقادیر کمینه‌ی سرعت طولی مشاهده می‌شود. همچنین تفاوت مقادیر بیشینه‌ی سرعت در سطح جریان، در مقطع‌های CS_1 و CS_5 در مقایسه با عمق و مجاورت کف کانال محسوس تر است. در مقطع‌های CS_2 و CS_4 ، جریان تحت تأثیر نیروی شتابی، بیشترین سرعت را در سطح و مایل به قوس خارجی داشته است. همچنین مقدار کمینه‌ی سرعت طولی در مقطع CS_2 نسبت به مقدار-های مشابه در مقطع CS_4 کمتر بوده است.

۳.۲. توزیع تنش برشی در مقطع‌های منتخب با استفاده از روش

MBM

با توجه به توضیحات اشاره‌شده در بخش ۲.۲، مقدار تنش برشی به روش MBM، در ۵ مقطع موردنظر محاسبه شده است و نتایج در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در ورودی قوس اول (CS_1)، تنش برشی بستر در قوس خارجی بیشترین مقادیر را داشته است و به تدریج هنگام خروج از قوس اول و رسیدن به قوس دوم (CS_2)، توزیع بیشینه‌ی تنش برشی مایل به مرکز مقطع و نیز

که در آن‌ها، τ_{xy} و τ_{xz} به ترتیب تنش‌های برشی روی میان‌رویه‌های عمودی و افقی، و u ، u' ، v ، v' و w و w' سرعت متوسط و تغییرات سرعت در جهت‌های X ، Y و Z هستند.

بنابراین، برای یک حجم کنترل نشان داده‌شده 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) است و معادله ۱ به‌صورت رابطه‌ی ۵ نوشته می‌شود:

$$\rho g A S_f = \int \tau ds = \int \tau_{xy} dz + \int \tau_{xz} dz + \int_y^{y+\Delta y} \tau_{xz} dy + \int_0^M \tau_{(y+\Delta y)} dy \quad (5)$$

که در آن، A مساحت هاشورخورده در شکل ۵، τ_{xy1} و τ_{xy2} تنش‌های برشی روی محدوده‌های افقی از نقطه‌ی (Z, Y) تا نقطه‌ی $(Z, Y+\Delta Y)$ ترم پایانی معادله ۵ را می‌توان با استفاده از معادله‌ی تعادل مومنتم (با استفاده از رابطه‌ی ۶) 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)

یکی از روش‌های رایج در تعیین تنش برشی در کانال‌های باز، استفاده از قانون توزیع لگاریتمی سرعت (LLM) است، که به‌صورت معادله ۷ نوشته می‌شود (نزو و ناکاگاوا^[۱]، ۱۹۹۳):^[۲۵]

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5.5 \quad (7)$$

که در آن، u_* سرعت برشی و ν گرانروی سینماتیک هستند.

۳.۲. روش تنش برشی رینولدز (RSM)

مدل تنش برشی رینولدز (RSM)، به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند محاسبه‌ی تنش برشی در طبیعت، براساس معادلات انتقال برای همه‌ی اجزاء تانسورهای تنش رینولدز و نرخ اتلاف کار می‌کند. اگر بخش مماسی تنش در نظر گرفته شود، با عنوان تنش برشی رینولدز شناخته می‌شود، که شامل ۶ جزء است: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ، $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ و $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ (ژولین^[۲]، ۱۹۹۸).^[۲۶] برای محاسبه-ی ۶ جزء تنش برشی رینولدز با استفاده از داده‌های ADV، به‌علت وجود تلاطم، از پارامتر آماری کوواریانس استفاده شده است (وال^[۳]، ۲۰۰۰).^[۲۷] در هر کدام از روابط ۸ الی ۱۳، از دو جزء سرعت جریان از میان سه جزء V_X ، V_Y و V_Z استفاده شده است.

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

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

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

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

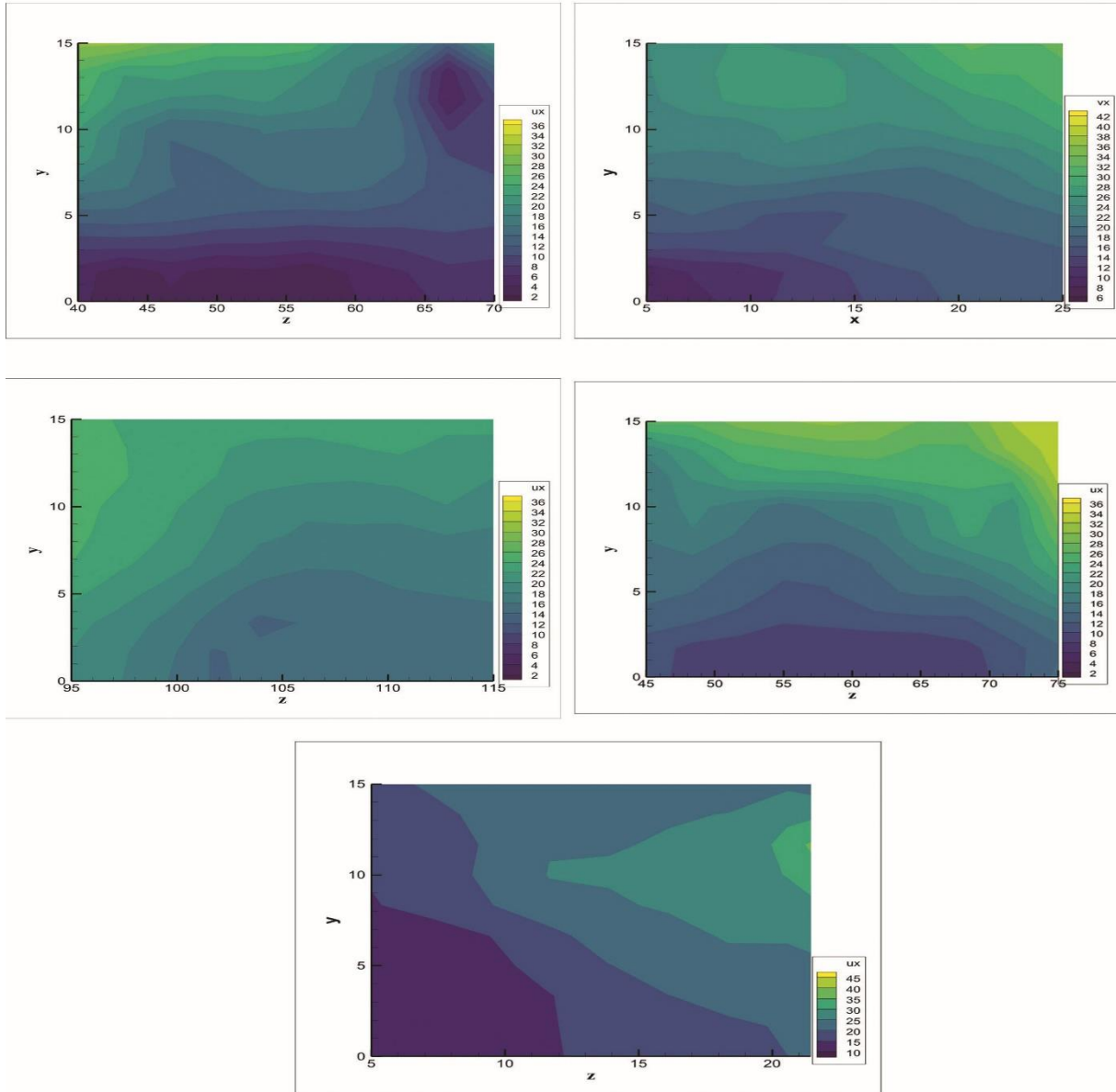
^۲ Shiono & Muto

^۵ Marion & Zaramella

^۱ Nezu & Nakagawa

^۲ Julien

^۳ Wahl

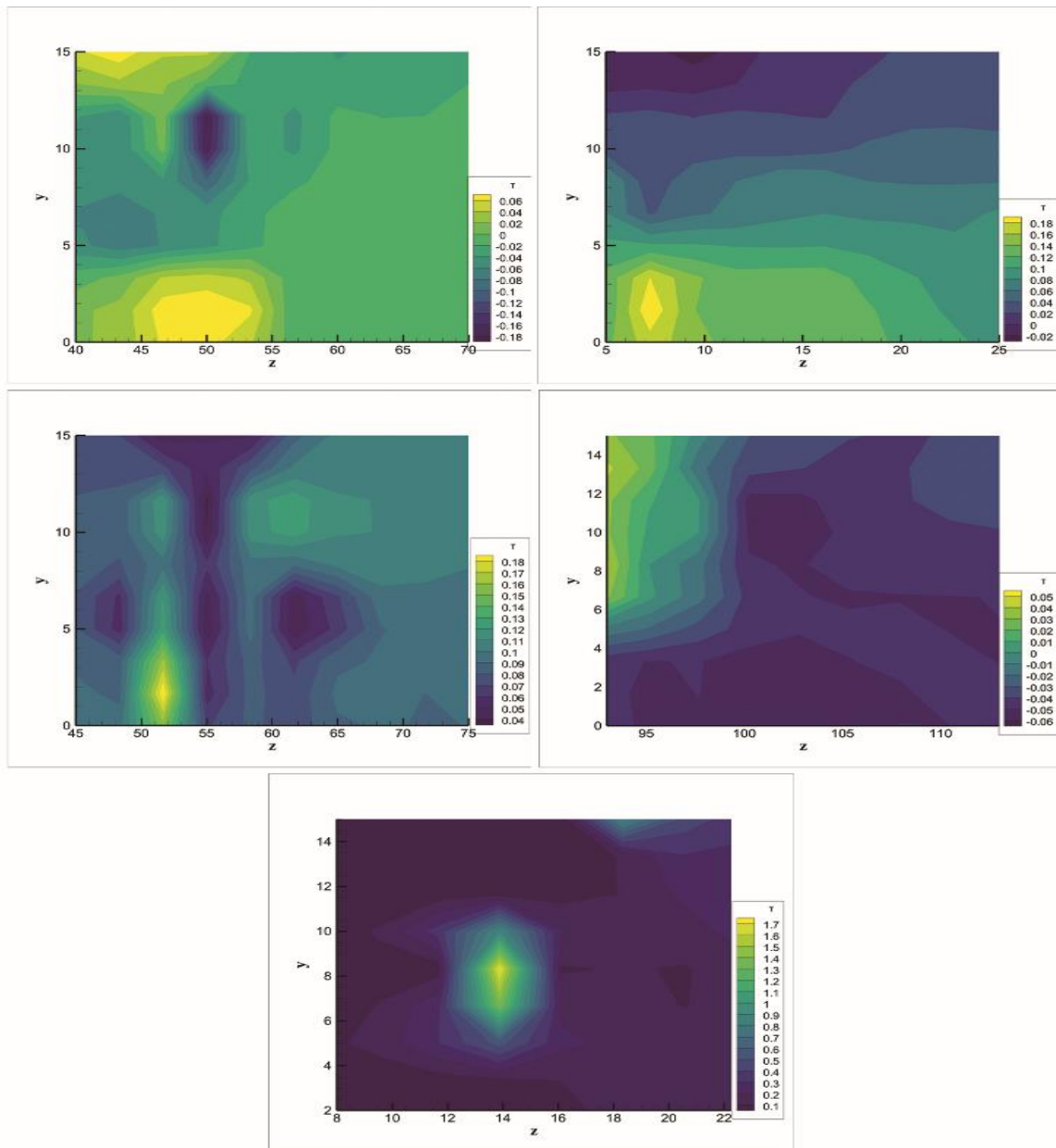


شکل ۶. توزیع عرضی u_x در مقطع‌های $CS_1 - CS_5$.

در سطح جریان، در سیلاب‌دشت سمت چپ مشاهده می‌شود، که با نتایج لیاقت و همکاران (۱۳۹۸) و کای‌ها و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. با پیشروی جریان به سمت قوس دوم (CS_2)، بیشینه‌ی تنش برشی به قوس داخلی کشیده شده است. پیش از ورود به قوس سوم همچنان تمرکز بیشینه‌ی تنش در نزدیک بستر و ساحل راست بوده است، که در قوس سوم (CS_5)، با کاهش محسوس مقادیر تنش در سراسر مقطع اصلی، به سمت مرکز کانال متمایل شده است. همچنین مطابق با روش RSM، کمترین مقادیر توزیع تنش در مقطع CS_5 مشاهده می‌شود که این نتیجه با توجه به موقعیت قرارگیری مقطع CS_5 و اتلاف انرژی در دو قوس اول (CS_1) و دوم (CS_3) مورد انتظار بوده است.

در شکل ۸، توزیع عمقی تنش در ۴ عمق مختلف جریان در مقطع اصلی در مسیر جریان مشاهده می‌شود. این نقاط براساس شبکه‌ی محاسباتی مرتبط با نقاط اندازه‌گیری سرعت تعیین شده است. به این صورت که در هر مقطع، در ۴ نقطه در راستای محور y و در نقاط مختلف عرضی (راستای محور Z) مقادیر تنش برشی محاسبه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش MBM کمترین مقادیر را در بیشینه‌ی عمق مجرای اصلی محاسبه کرده است، که علت آن، قرارگرفتن در محدوده‌ی انتقال مومنتم^۱ است، که به دلیل تلاطم

^۱ Momentum Exchange



شکل ۷. توزیع عرضی تنش برشی در مقطع‌های $CS_1 - CS_5$.

به صورت نواحی هم‌تراز در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، به تدریج از مقادیر تنش برشی در مسیر کاسته شده است، به طوری که مقطع CS_5 ، کمترین میزان توزیع تنش را دارد، که دلیل آن اتلاف انرژی در طول مسیر به دلیل حضور دو قوس در بالادست مقطع CS_5 است. میزان بیشینه 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 شده است. همین‌طور می‌توان الگوی مشابه بیشینه تنش در کف قوس خارجی و سطح جریان قوس داخلی را در سه مقطع CS_1 ، CS_3 ، و CS_5 مشاهده کرد.

۴.۳. مقایسه‌ی بیشینه‌ی تنش برشی در مقطع‌های منتخب

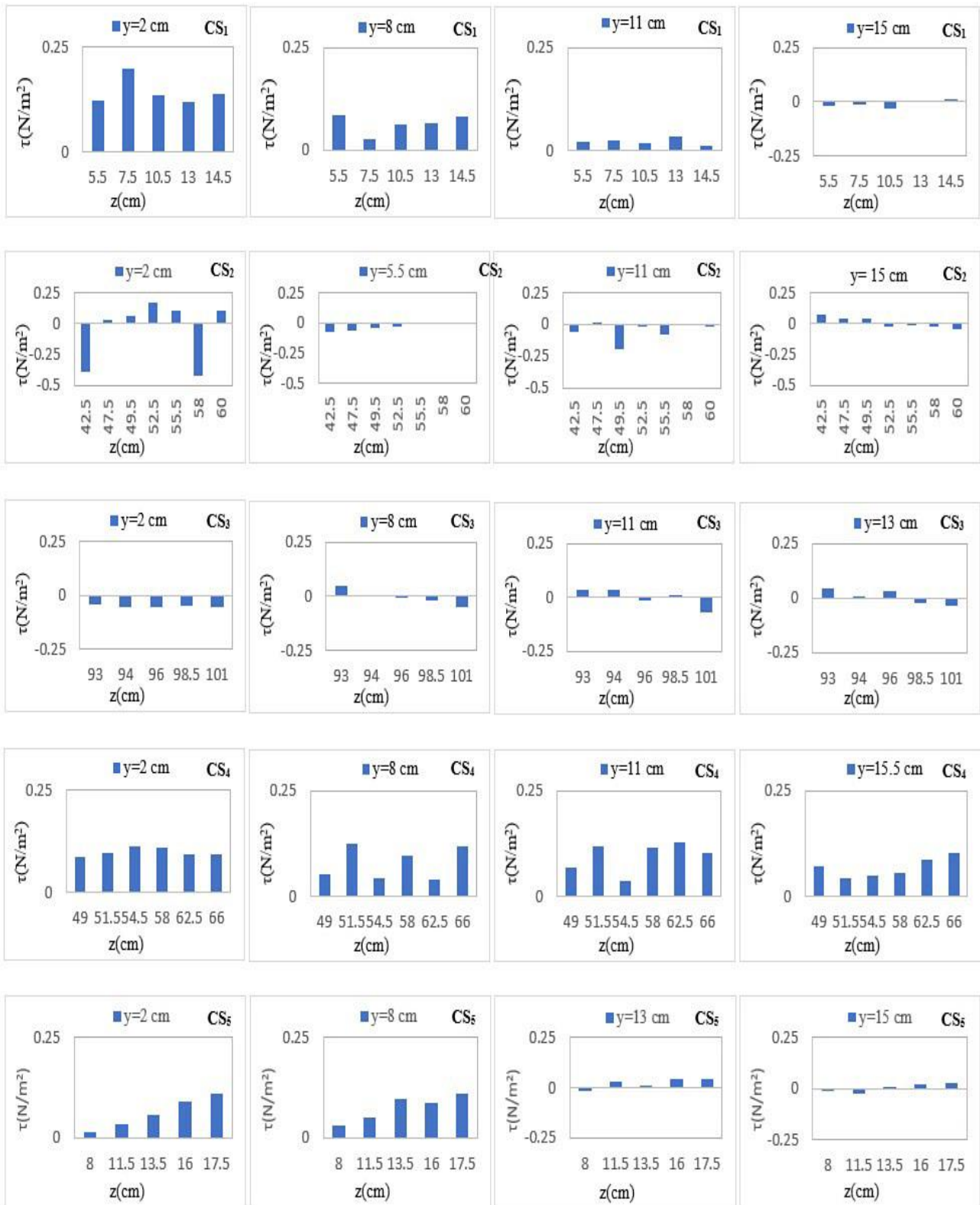
تعیین نواحی بیشینه‌ی تنش برشی می‌تواند در مطالعات جریان و رسوب و مسائل مرتبط با نگهداری رودخانه، مانند فرسایش بستر به‌ویژه در قوس‌ها تأثیرگذار باشد. بنابراین، مقادیر بیشینه‌ی محاسباتی تنش برشی با توجه به موقعیت مکانی آن‌ها بررسی شد، که نتیجه در ۴ عمق نسبی منتخب در هر

جریان، مقادیر اجزاء 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 رأس قوس دوم و جریان ورودی به قوس دوم، که جریان در مقطع پیچانی در حال توسعه است، در مقایسه با دیگر مقطع‌ها، اجزاء 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، مقادیر تنش را در عمق بیشتر نشان می‌دهد.

۳.۳. توزیع تنش برشی در مقطع‌های منتخب با استفاده از روش

تنش برشی رینولدز (RSM)

با توجه به توضیحات اشاره‌شده در بخش ۴.۲، مقادیر تنش برشی در نقاط مختلف مجرای اصلی جریان در ۵ مقطع $CS_1 - CS_5$ محاسبه شد و نتایج

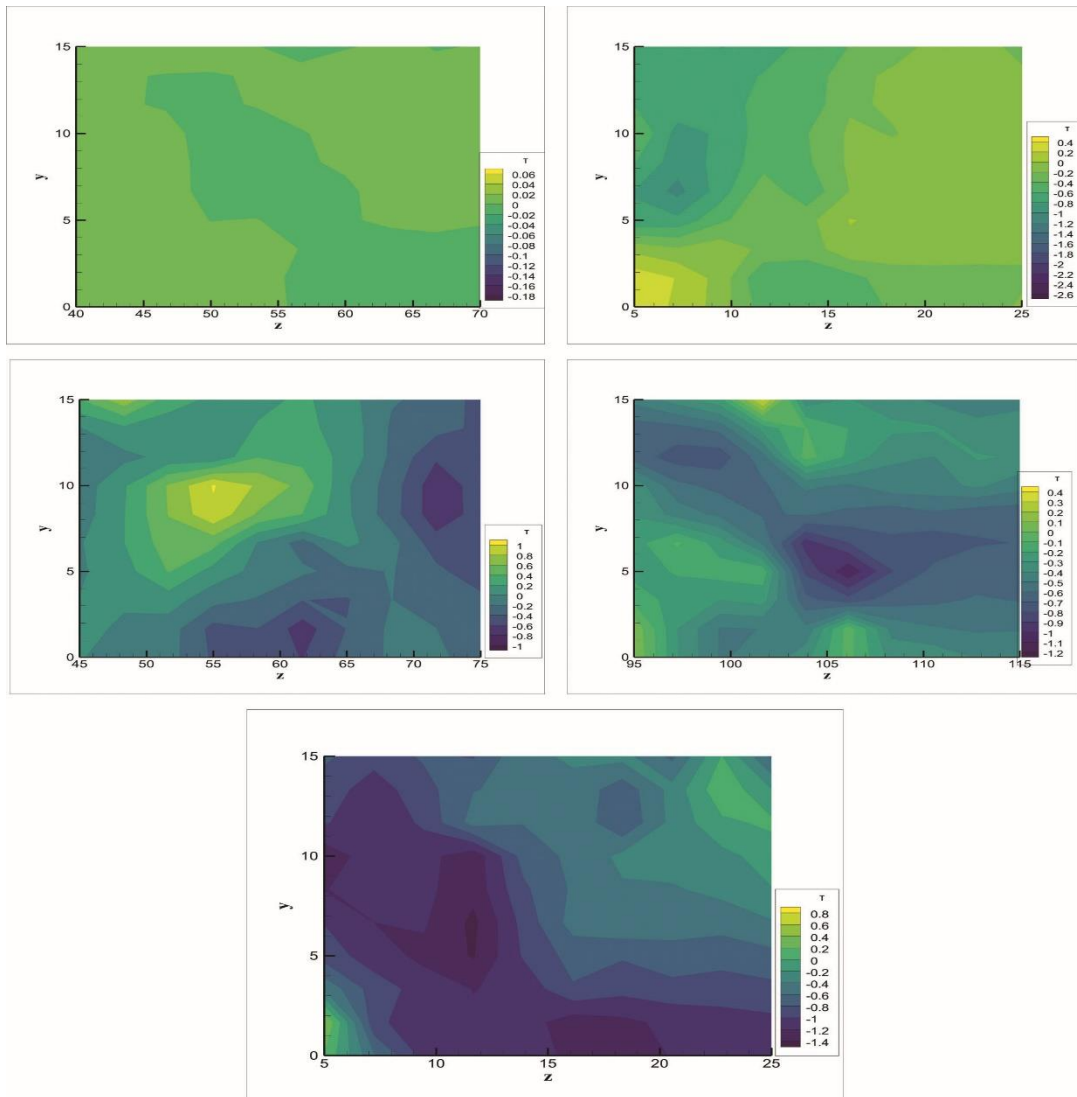


شکل ۸. توزیع عمقی تنش برشی در مقطع‌های CS_۱ - CS_۵.

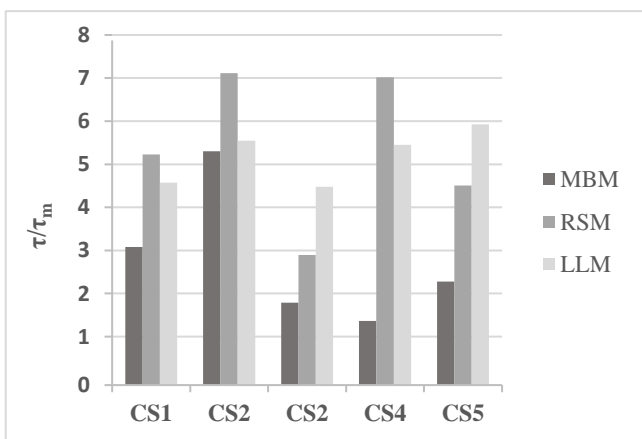
محاسبه می‌کند، که می‌تواند به علت عدم توانایی برآورد دقیق توزیع سرعت در جریان آشفته‌ی مقطع‌های مذکور باشد (یانگ، ۲۰۱۰).^[۳۰] همین‌طور نتیجه‌ی اخیر با مطالعه‌ی ایماگبه^۱ (۲۰۲۱)،^[۳۱] منطبق است. در مورد روش RSM

کدام از ۵ مقطع در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نمودار مقایسه‌ی روش-های مذکور را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد. روش توزیع لگاریتمی سرعت، مقادیر تنش برشی را در بستر جریان در رأس قوس‌ها بیشتر از سایر روش‌ها

^۱ Imagbe



شکل ۹. توزیع عرضی تنش برشی در مقطع های CS_۱ - CS_۵.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی تنش برشی نسبی در مقطع‌های CS_۱ - CS_۵.

برای اندازه‌گیری تنش برشی در آبراهه‌های پیچانی در عمق‌های مختلف ارزیابی شده است. به این صورت که مقادیر اجزاء سرعت در ۵ مقطع یک مدل فیزیکی آبراهه سیلاب دشتی پیچانی اندازه‌گیری شد. سپس براساس روش MBM، توزیع عرضی تنش در مجرای اصلی جریان و نیز توزیع عمقی در ۴ عمق نسبی مختلف و در مقطع‌های منتخب بررسی شد. همچنین با توجه به عملکرد روش

جدول ۲. مقدار بیشینه‌ی نسبی تنش برشی در کانال اصلی مقطع‌های CS_۱ - CS_۵ (τ/τ_m).

نام روش	CS _۱	CS _۲	CS _۳	CS _۴	CS _۵
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

مقطع های CS_۲ و CS_۴، بیشترین برآورد تنش نسبی محاسبه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت برآورد مقادیر تنش برشی در رودخانه‌ها، روش‌های ارائه‌شده برای تعیین پارامتر تنش برشی بررسی شده است، از بین این روش‌ها، با توجه به ماهیت مکانیسم سه‌بعدی و پیچیده‌ی جریان در آبراهه‌های طبیعی، روش MBM که برای کانال‌های مستقیم معرفی شده بود،

همچنین مقادیر تنش در هر دو روش RSM و MBM با اتلاف انرژی در مسیر جریان، در مقطع CS_5 کاهش محسوسی یافته است. مقدار بیشینه‌ی نسبی تنش برشی نسبی در ۵ مقطع انتخابی نیز برای سه روش MBM، RSM، و LLM، $5/43$ ، $7/24$ ، 4 در مقطع 4 ، و $6/05$ در مقطع ۱ بوده است. بنابراین، می‌توان از روش MBM در تعیین تنش برشی در پیچان‌رودها استفاده کرد.

RSM که در زمینه‌ی برآورد توزیع تنش در جریان‌های آشفته‌ی سه‌بعدی، نتایج مطلوبی ارائه می‌کند، توزیع تنش عرضی تعیین شد. روش کلاسیک محاسبه‌ی تنش‌ها در کانال‌های مستقیم (LLM)، علاوه بر روش متداول سه-بعدی تنش برشی رینولدز، برای مقایسه در نظر گرفته شدند. نتایج حاکی از روند افزایشی تنش از ورودی قوس اول است، که بیشینه‌ی آن در بستر قوس خارجی مشاهده و به تدریج در قوس سوم به سمت مرکز کانال کشیده می‌شود.

منابع-References

- Sugiyama, H., Hitomi, D. and Saito, T., 2006. Numerical analysis of turbulent structure in compound meandering open channel by algebraic Reynolds stress model, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 51, pp. 791–818. <https://doi.org/10.1002/flid.1159>
- Zahiri, A., Amini, R. and Kordi, H., 2012. Numerical simulation of velocity lateral distribution in meandering compound channels, *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(3), pp.201–218 <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1391.19.3.11.6> [In Persian].
- Liaghat, A., Adib, A. and Gafouri, H.R., 2019. Development of a method for determination of location of maximum shear stress in river bends (verification of report no. 592, Iranian Energy Ministry), *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35(2), pp.153–163 <https://doi.org/10.24200/j30.2018.2174.2120> [In Persian].
- Knight, D.W. and Shiono, K., 1990. Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel, *Journal of Hydraulic Research*, 28, pp. 175–196. <https://doi.org/10.1080/00221689009499085>
- Shokri, M. and Mehdipour, R., 2021. 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*, 7(3), pp. 454–464. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.250562.44>
- Guo, J. and Julien, P.Y., 2005. Shear stress in smooth rectangular open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), pp. 30–37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:1\(30\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:1(30))
- Yang, S.Q. and Lee, J.W., 2007. Reynolds shear stress distributions in a gradually varied flow in a roughened channel, *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), pp. 462–472. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.952170>
- Sterling, M., Beaman, F., Morvan, H. and Wright, N., 2008. Bed shear stress characteristics of a simple, prismatic, rectangular channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, pp. 1085–1094. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339399\(2008\)134:12\(1085\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339399(2008)134:12(1085))
- Ursic, M.E., 2012. Qualification of shear stress in a meandering native topographic channel using a physical hydraulic model. Colorado State University, Engineering Research Center.
- Fazli, M., Ghodsian, M. and Saleh Neyshabouri, A.A., 2008. Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend, *International Journal of Sediment Research*, 23, pp.56–68. [https://doi.org/10.1016/S10016279\(08\)600050](https://doi.org/10.1016/S10016279(08)600050)
- Gendeshmin, A.S., Neyshabouri, S.A.A.S., Zarrati, A.R. and Ghodsian, M., 2010. Investigation of wall shear stress distribution in open channel uniform flow using an accurate instrument and numerical simulation, *Journal of Hydraulic Research*, 5(1), pp. 51–70. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2010.85418>
- Baird, D.C., 2004. Turbulent flow and suspended sediment transport in a mobile, sand bed channel with riprap side slopes, Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of New Mexico.
- Omran, M. and Knight, D.W., 2010. Modelling secondary cells and sediment transport in rectangular channels, *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), pp. 205–212. <https://doi.org/10.1080/00221681003726288>
- Naghavi, M., Mohammadi, M. and Mahtabi, G., 2020. Turbulence intensity and boundary shear stress in meandering compound channel under the influence of sinusoidal changes, *Journal of Modeling in Engineering*, 18(60), pp. 53–69. <https://doi.org/10.22075/jme.2019.18692.1776> [In Persian].
- Zarrati, A.R., Jin, Y. and Karimpour, S., 2008. Semianalytical model for shear stress distribution in simple and compound open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), pp. 205–215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(205))

16. Alfadhli, I., Yang, S. and Sivakumar, M., 2013. Distribution of Reynolds shear stress in steady and unsteady flows, *SGEM: 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria*, pp. 109–116. <https://doi.org/10.5593/SGEM2013/BC3/S12.014>
17. Koftis, T. and Prinos, P., 2018. Reynolds stress modeling of flow in compound channels with vegetated floodplains, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 6(1), pp. 17–27. <https://doi.org/10.1080/23249676.2016.120947>
18. Khatua, K. and Patra, K.C., 2007. Boundary shear stress distributions in compound open channel flow, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 13(3), pp. 39–54. <https://doi.org/10.1080/09715010.2007.10514882>
19. Kai-hua, C., Yun-feng, X., Shi-zhao, Z., Yun-cheng, W. and Hua, X., 2018. Experimental research on boundary shear stress in typical meandering channel, *Journal of China Ocean Engineering*, 32(3), pp. 365–373. <https://doi.org/10.1080/09715010.2007.10514882>
20. Farshi, F., Kabiri-Samani, A. and Cjamani, M., 2021. Boundary shear stress distribution in curved compound open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(2), pp. 40020099. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.19437900.0001847](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0001847)
21. Yang, S.Q., Dharmasiri, N. and Han, Y., 2012. Momentum balance method and estimation of boundary shear stress distribution, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7), pp. 657–660. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.19437900.0000559](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0000559)
22. Han, Y., Yang, S. and Dharmasiri, N., 2012. Application of main flow data in the determination of boundary shear stress in smooth closed ducts, *World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 1175–1185. <https://doi.org/10.1061/9780784412312.119>
23. Sontek, 2001. Acoustic Doppler velocimeter (Field) technical documentation. Sontek/YSI, Inc., San Diego, CA.
24. Tracy, H.J., 1963. Turbulent flow in a three-dimensional channel, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
25. Nezu, I. and Nakagawa, H., 1993. Turbulence in open-channel flows. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
26. Julien, P.Y., 1998. Erosion and sedimentation. Cambridge University Press, New York, NY.
27. Wahl, T.L., 2000. Analysing ADV data using WinADV, *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, Minneapolis, Minnesota, USA.
28. Shiono, K. and Muto, Y., 1998. Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 376, pp. 221–261. <https://doi.org/10.1017/S0022112098002869>
29. Marion, A. and Zaramella, M., 2006. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(12), pp. 1295–1302. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(2006\)132:12\(1295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(2006)132:12(1295))
30. Imagbe, L.O., 2021. Sediment grains entrainment: Comparing bed shear stress estimation methods, *Journal of Geology & Geophysics*, 10(8), no.1001004.
31. Yang, S.Q., 2010. Depth-averaged shear stress and velocity in open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(11), pp. 952–958. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.19437900.0000271](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0000271)