

مقایسه روشهای کارمایه و اندازه‌ی حرکت در بررسی انتقال اندازه‌ی حرکت بین زیر مقاطع یک مقطع مرکب

مه‌دی به‌داروندی عسکر^{1*}، منوچهر فتحی مقدم²، سید حبیب موسوی جهرمی³
تاریخ دریافت: 1391/4/22 تاریخ پذیرش: 1391/12/15

چکیده

مقطع مرکب به مقطعی گفته می‌شود که سطح آن شامل چند قسمت (زیرمقطع) با صفات متفاوت جریان، مانند: زبری سطح، عمق جریان و غیره باشد. یک رود طبیعی، که هنگام وقوع سیل از روی زمینهای سواحل آن عبور می‌کند، مثالی از مقاطع مرکب (نهرهای مرکب) است. مسیر جریان در یک رود به هنگام وقوع سیل، شامل یک نهر اصلی⁴ و دو نهر ساحلی⁵ است. اصولاً، تفاوت عمق آب و سرعت متوسط بین آبراه اصلی و نهرهای ساحلی در یک مقطع مرکب باعث بروز پدیده‌ی کمتر شناخته شده‌ی انتقال اندازه‌ی حرکت بین آبراه اصلی و نهرهای ساحلی (دشتهای سیلابی) می‌گردد، که باعث بروز پیچیدگیهایی در هیدرولیک جریان این مقاطع می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان گفت که با ورود جریان به نهرهای ساحلی، یک مقطع مرکب بر هم کنشهایی میان جریان در آبراه اصلی و نهرهای ساحلی به وجود می‌آید، درست مثل این‌که جریان موجود در نهرهای ساحلی باعث کند شدن جریان در آبراه اصلی می‌گردد که نشانی از انتقال اندازه‌ی حرکت در عرض یک مقطع عرضی می‌باشد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که پدیده‌ی انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی باعث تغییرات عمده در سرعت جریان، تنش برشی مرزی، و ویژگیهای جریان آشفته می‌گردد. بررسی تنش برشی مرزی نه تنها برای مباحث انتقال رسوب و حفاظت سواحل بسیار اهمیت دارد، بلکه می‌توان از بررسی آن در مقاطع مرکب، و مقایسه‌ی آن در آبراه اصلی و نهرهای ساحلی (سیلاب دشتهای) برای پی بردن به ماهیت پدیده‌ی انتقال اندازه‌ی حرکت و تاثیرات آن بر توزیع خود تنش برشی مرزی، و دیگر ویژگیهای هیدرولیکی جریان، از جمله تشکیل جریانهای ثانویه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: نهر اصلی و نهر ساحلی، نیروی برشی ظاهری، روش اندازه‌ی حرکت، حسگر نیرو، حفاظت سواحل

¹ - دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

² - استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

³ - دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

* - نویسنده مسئول: sazehenteghal@yahoo.com

⁴ - Main channel

⁵ - Flood plain

مقدمه

نهرهای مرکب مقاطع هیدرولیکی می‌باشند که از دو بخش نهر اصلی و نهر ساحلی تشکیل یافته‌اند. نهر اصلی بخشی است که تراز کف آن پایینتر است، و عموماً دارای مقطع کلی نزدیک به مستطیل یا دوزنقه می‌باشد. این بخش، روانابهای معمول و بده‌ی پایه را، که در بیشتر مواقع در رود جریان دارد، منتقل می‌کند. اما نهر ساحلی (دشت سیلابی) در مقابل، قسمتی از مقطع مرکب است که دارای تراز کف به مراتب بالاتر از نهر اصلی است، و در یک یا دو طرف نهر اصلی واقع می‌شود. این بخش در شرایط معمول در انتقال جریان نقشی نداشته و تنها در شرایط سیلابی (بده‌های بیشتر از بده جریان لبریز) وارد عمل می‌شود. لذا، عموماً از نظر هیدرولیکی، از زبری به مراتب بیشتری نسبت به نهر اصلی برخوردار است. با توجه به تعاریف فوق روشن است که مقطع مرکب، مقطع هیدرولیکی معمول بسیاری از رودها در دشتهای آبرفتی می‌باشد، یعنی مناطقی که از دیرباز مهد زندگی بشر و توسعه مدنیت او بوده است. شرایط هندسی خاص مقاطع مرکب موجب بروز شرایط هیدرولیکی ویژه‌ای می‌شود که مستلزم توجیحات خاصی در آنهاست. هندسه‌ی خاص مقاطع مرکب توأم با اختلاف معمولاً قابل توجهی زبری نهر اصلی و نهرهای ساحلی، منجر به بروز اختلاف سرعت قابل توجه بین زیر مقاطع این نهر می‌گردد، که همین امر سبب شده است که بیشتر روشهای اندازه‌گیری اندازه‌ی حرکت انتقالی از طریق پیمایش مستقیم سرعت باشد (2). این اختلاف سرعت و عمق به نوبه خود سبب شکل‌گیری یک ناحیه اندرکنشی¹ در مرز بین زیر مقاطع می‌شود که از دیدگاه هیدرولیکی، تبادل تنش داخلی جریان در این ناحیه باعث بروز افت کارمایه چشمگیری می‌گردد. همچنین، از منظر دیگر، این شیب سرعت قابل توجه بین زیر مقاطع موجب بروز تنش برشی درونی بین جریان در زیر مقاطع می‌شود، که علاوه بر تنش برشی بستر و جداره‌های نهر بوده، و عموماً به آن تنش برشی ظاهری² نام دارد. در نهرهای معمولی یا منظم، آنچه به‌عنوان افت کارمایه یا اصطکاک طولی در نظر گرفته می‌شود، اکثراً

ناشی از اندرکنش جریان با بستر و جداره‌های جامد نهر می‌باشد؛ این در حالی است که عوامل مزبور بخشی از اصطکاک و افت کارمایه طولی در نهرهای مرکب را شامل می‌شود، و از آثار متناظر درونی جریان در این مقاطع نمی‌توان صرف نظر کرد (1). تمایز اصلی مقاطع مرکب با مقاطع منظم و معمولی نیز ناشی از همین پدیده است؛ از این رو، به‌کارگیری روابط متعارف هیدرولیکی مربوط به نهرهای منظم، در نهرهای مرکب، توأم با بروز خطاهای قابل توجهی می‌شود، در نتیجه، بررسی هیدرولیک این مقاطع از چند دهه قبل آغاز شده و همچنان ادامه دارد. بررسی تنش برشی مرزی نه تنها برای مباحث انتقال رسوب و حفاظت سواحل بسیار اهمیت دارد، بلکه می‌توان با مطالعه‌ی آن در مقاطع مرکب، و مقایسه آن در آبراه‌های اصلی و نهرهای ساحلی (سیلاب دشتهای) برای پی بردن به ماهیت پدیده انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی و تاثیرهای آن بر توزیع خود تنش برشی مرزی و دیگر ویژگیهای هیدرولیکی جریان استفاده کرد.

پیشینه تحقیق

با توجه به نزدیکی گفتگوی انتقال اندازه‌ی حرکت با مباحث تنش برشی و نیروی برشی، طیف وسیعی از تحقیقات بطور مستقیم و غیر مستقیم پیرامون این مسأله شکل گرفته که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد: سلین (1964) از روش عکسبرداری برای بدست آوردن اطلاعاتی در مورد ساز و کار و طبیعت پدیده تبادل اندازه‌ی حرکت استفاده کرد. او پودر آلومینیوم را که قدرت انعکاس بالایی دارد را روی سطح آب یک نهر با مقطع مرکب پاشید و با یک دوربین، که دقیقاً بالای سطح آب نصب شده بود، از الگوی سطحی به وجود آمده به‌وسیله‌ی جریان فیلمبرداری و عکسبرداری کرد. برای دقت بیشتر و تحت پوشش قراردادن جریانهای ثانویه، دوربین با سرعتی مساوی با سرعت متوسط جریان در محل اتصال نهر اصلی و نهر ساحلی حرکت داده می‌شد. تامای و کاواهارا (1982) از روش مشابهی سلین، یعنی عکسبرداری و برداشت فیلم برای مشاهده و محاسبه‌ی اندازه‌ی حرکت انتقالی در عرض و در طول نهر استفاده کردند، آنها همچنین، برای محاسبه‌ی سرعت جریان در نهرهای ساحلی از روش حباب هیدروژن بهره بردند. ژلزنیکوف

¹ - mixing region

² - apparent shear stress

دست یافتند. همچنین، آنها دو نوع تنش برشی ظاهری عمودی و افقی را مورد بررسی قرار دادند. رایس و پوسی (1963) روش متفاوتی را در محاسبه بدهی مقاطع مرکب ارائه نمودند. آنها مقطع را به مقاطع کوچکتر تقسیم کردند و پس از محاسبه‌ی بده هر کدام بیان کردند که بدهی کل از مجموع بدهی مقاطع مختلف بدست می‌آید. آنها در پایان دریافتند که هر گونه خطا در کارشان به علت نادیده گرفتن و صرف نظر از اندازه‌ی حرکت انتقالی بین مقطع اصلی و سیلاب دشتهای می‌باشد. استفانسون و کولوپولوس (1990) تاثیر انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی را بر هیدرولیک نه‌های مرکب مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم و جالب توجه آنها این بود که دریافتند انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی درست در بالای حالت جریان لبریز باعث کاهش بدهی و سرعت جریان در مقایسه با نه‌ر منظم می‌شود. ورملیتون و همکاران (1982) جریان در نه‌های مرکب را با حضور زبری در دشتهای سیلابی مورد بررسی قرار دادند. آنها تنش برشی ظاهری را برای چندین برخورد فرضی میان آبراهه‌ی اصلی و دشت سیلابی را نیز مطالعه کردند. همچنین، آنها شاخصی را معرفی نمودند که چنانچه آن شاخص زیر 2 بود، این امر اثر مهم تلقی می‌گردید. در شرایط مساوی سطح فرضی بر همکنش افقی بهترین جواب را می‌داد (6).

انگاره‌ی حاکم

به علت وجود بی‌نظمیهای موجود در جریان آشغته، که خود به دلیل وجود نوسانهای سرعت در جهات سه گانه حرکتی است، علاوه بر تنش برشی موجود در جهت جریان، تنشهایی در جهات دیگر به وجود می‌آید که به تنش برشی ظاهری معروفند. با در نظر گرفتن معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت در راستای جریان X خواهیم داشت:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} \right) = \rho g_s + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2)$$

که در آن I : جرم مخصوص آب، g : شتاب گرانش، S : شیب نه‌ر، و t_{yx} و t_{zx} : به ترتیب تنشهای برشی در راستای محور X در صفحات $Z-X$ و $Y-X$ می‌باشند. معادله‌ی اندازه‌ی حرکت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

(1971) تحقیقات خود را در یک مقطع مرکب متقارن، که متشکل از یک آبراهه‌ی اصلی به شکل سهمی، که از طرفین به وسیله‌ی دو دشت سیلابی به همان شکل احاطه می‌شد، انجام داد. او دریافت که سرعت متوسط و موضعی در نه‌ر اصلی در عمقهای کم دشت سیلابی دچار افت می‌شود؛ این در حالی است که سرعت موضعی در محل اتصال آبراهه‌ی اصلی و دشت سیلابی درست در همان زمان افزایش می‌یابد، که این پدیده نیز به وسیله‌ی محققان دیگر نیز مشاهده شده بود. او همچنین در مقالات بعدی خود موفق به معرفی یک عامل بسیار مهم و موثر در تحقیقات مقاطع مرکب گردید، که عبارت بود از نسبت عمق در آبراهه‌ی اصلی به عمق در نه‌ر ساحلی (سیلاب دشت) $\eta = \frac{2t}{2f}$ که بعدها آن را عمق مؤثر نامیدند. راجا رانام و احمدی (1979) تغییرات سرعت را در نه‌ر با مقاطع مرکب مورد بررسی قرار دادند. نخست آزمایشهای خود را در نه‌ری با مقطع اصلی بریک و دو دشت سیلابی پهن، و در حالت دوم آزمایشهای خود را در نه‌ری با مقطع اصلی پهن و یک دشت سیلابی پهن انجام داده و به نتایج در مورد لگاریتمی بودن توزیع سرعت عمودی رسیدند. شینیو و نایت (1991) با انجام یک گروه آزمایشهای در یک نه‌ر پایه‌دار معروف به FCF¹، متعلق به دانشگاه بیرمنگام، به طول 56 و عرض 10 متر با قابلیت تغییرپذیری در عرض سیلاب دشتهای با مقطع عرضی مرکب دوزنقه‌ای در نه‌ر اصلی و سیلاب دشتهای به گروهی نتایج قابل توجه دست یافتند. میر (1975) گوش (1971) توزیع تنش برشی در نه‌های متقارن و نامتقارن را مورد بررسی قرار دادند. (5) آنها اظهار داشتند که انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی به شدت باعث کاهش تنش برشی در نه‌ر اصلی، و افزایش تنش برشی در سیلاب دشتهای می‌شود. همچنین اندازه‌ی حرکت انتقالی بین دشت سیلابی و مقطع اصلی را به صورت فراسنجی از تنش برشی در آوردند. نایت و دیمتریو (1983) با به کار بردن نیروی برشی که از تنش برشی بدست می‌آید، تاثیرات انتقال اندازه‌ی حرکت عرضی را بین دشت سیلابی و نه‌ر اصلی مورد بررسی قرار دادند و به نتایج جالب توجهی

¹ - flood channel facility

(کساب، 1993 و زاگرولا و همکاران، 2001) با این وجود، معادله‌ی پتل به عنوان مشهورترین روش برای تعیین تنش برشی موضعی مورد استفاده قرار می‌گیرد (نایت و همکاران، 1994 و لشکرآرا و همکاران، 2010). در تحقیق حاضر روش واسنجی وو و راجاراتنام نیز بطور همزمان برای مقایسه با منحنی پتل و روش حسگر نیرو به کار گرفته شده است. بر پایه‌ی این روش، سرعت برشی از طریق روابط تعیین می‌گردد. بدین ترتیب که ابتدا عدد رینولدز برشی طبق رابطه‌ی (9) مشخص می‌شود:

$$R_s = \frac{R_p - b}{A + a} \quad (9)$$

که در آن R_p عدد رینولدز لوله‌ی پرستون می‌باشد. A عدد ثابت $5/75$ و a و b به ترتیب به عنوان تخمین اولیه‌ی $8/3$ و $19/5$ می‌باشد؛ بنابراین، عدد رینولدز برشی محاسبه می‌شود. چنانچه عدد رینولدز برشی بین 1 تا $14/1$ باشد، a و b به ترتیب برابر با $9/94$ و $4/7$ می‌باشد؛ چنانچه عدد رینولدز برشی بین $14/1$ تا 70 باشد، مقدار a و b به ترتیب برابر با $8/3$ و $19/5$ می‌باشد؛ چنانچه عدد رینولدز برشی بزرگتر از 70 باشد، مقدار a و b به ترتیب برابر با $8/5$ و 0 می‌باشد. در نهایت مقدار نهایی سرعت برشی از رابطه‌ی (10) بدست می‌آید: پس از تعیین سرعت برشی، تنش برشی از رابطه‌ی $t = ru *^2$ در بستر زبر حاصل می‌گردد.

$$u^* = \frac{u_p - b \frac{u}{k_s}}{A + a} \quad (10)$$

که در آن u_p سرعت در لوله‌ی پرستون، u لزجت جنبشی و k_s ارتفاع معادل زبری می‌باشد. فراسنجهای دیگر قبلاً تعریف شده‌اند. در این تحقیق، پس از محاسبه‌ی تنش برشی از روشهای مختلف کارمایه و در نهایت استفاده از رابطه‌ی زیر اقدام به محاسبه نیروی برشی ظاهری خواهد شد:

$$\frac{fgAmcSt}{2} = \int \tau_0 dp + A \quad (11)$$

که در رابطه‌ی فوق منظور از A (سطح مقطع جریان در کل نهر اصلی است. اشکال اصلی این رابطه از یک سو در طولانی بودن حجم محاسبات، و به تبع آن بروز خطاهای بیشتر به علت حجم محاسبات بالا، و از

$$\frac{\partial(puv)}{\partial y} + \frac{\partial(puv)}{\partial z} = pgs + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} \quad (3)$$

روشهای اندازه‌گیری تنش برشی را می‌توان به دو دسته‌ی مستقیم (وینتر، 1977؛ فرنهولز و همکاران، 1996) و غیر مستقیم (چاو، 1959؛ پرستون، 1954؛ پورتر و همکاران، 2000 و بوکلمن و همکاران، 2008) تقسیم‌بندی کرد. از بین انواع روشهای اندازه‌گیری تنش برشی، می‌توان از لوله‌ی پرستون به عنوان متداولترین نام برد، که با بهره‌گیری از تنش برشی محاسبه شده از آن، و کمک گرفتن از روابط زیر اقدام به محاسبه تنش برشی ظاهری و یا اندازه‌ی حرکت انتقالی می‌شده است (3). لوله‌ی پرستون در حقیقت شکل اصلاح شده لوله پیتو است که به وسیله‌ی پرستون (1954) برای اندازه‌گیری تنش برشی به صورت غیر مستقیم ابداع شده و بر روی دیوار و یا بستر قرار می‌گیرد. پاتل (1965) معادله‌ی واسنجی زیر را ارائه داد:

$$Y^* < 1.5 \quad Y^* = .5X^* + .037 \quad (4)$$

$$1.5 < Y^* < 3.5 \quad \text{اگر} \quad (5)$$

$$Y^* = 0.8287 - 1.1381X^* + 0.1437X^{*2} - .0060X^{*3} \\ 3.5 < Y^* < 5.3 \quad \text{اگر} \quad (6)$$

$$X^* = Y^* + 2\text{Log}(1.95Y^* + 4.1)$$

که X^* و Y^* با کاربرد معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$x^* = \log_{10} \left(\frac{\Delta P d^2}{4 r u^2} \right) \quad (7)$$

$$y^* = \log_{10} \left(\frac{t_0 d^2}{4 r u^2} \right) \quad (8)$$

بدین ترتیب، ابتدا X^* محاسبه شده و سپس Y^* محاسبه می‌گردد. در صورت احراز صحت فرض، مقدار Y^* مورد قبول قرار می‌گیرد. در روابط (7) و (8)، d : قطر خارجی لوله‌ی پرستون، t_0 : تنش برشی مرزی، r : جرم حجمی سیال، ΔP : اختلاف فشار پایا و پویا و u : لزجت جنبشی سیال می‌باشد. طریقه‌ی استفاده از معادله‌ی پاتل بدین صورت است که بعد از محاسبه X^* ، و به تبع آن، Y^* می‌بایست Y^* در محدوده‌ی مورد نظر برای شرط کاربرد قرار گیرد. واسنجی لوله‌ی پرستون و مسائل مربوط به دقت آن در شرایط مختلف مانند جریان در لوله‌ها و نهرها و یا جریانهای با شیب فشار معکوس باعث شده است معادلات مختلفی برای واسنجی پرستون ابداع گردد

به‌منظور قرار دادن حسگر بار پویای در نهر پایه‌دار KEF^2 در شرایط شروع لختی جریان، قبل از انجام آزمایش‌های به نهر مقداری شیب جزئی داده می‌شود، لذا از فراسنج شیب صرف‌نظر می‌گردد؛

بنابراین، متغیرهای موثر را در تعیین متوسط سرعت برشی جداره و کف می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

(12)

$$f(\bar{u}_{*b}, \bar{u}_{*w}, \bar{u}_*, \mathbf{r}, \mathbf{u}, g, V, h, H, b, K_s) = 0$$

با استفاده از قضیه‌ی باکینگهام می‌توان رابطه‌ی فوق را به روابطی با چندین فراسنج بدون بعد تبدیل نمود. برای این منظور، با ترکیب سه متغیر تکراری \mathbf{r} و V و y با بقیه فراسنج متغیر روابط زیر، جهت تخمین متوسط سرعت برشی کل، متوسط سرعت برشی بستر و متوسط سرعت برشی جداره به‌دستی می‌آیند:

$$f\left(\frac{\bar{u}_*}{V}, \frac{\bar{u}_{*b}}{V}, \frac{\bar{u}_{*w}}{V}, \frac{u}{VH}, \frac{gH}{V^2}, \frac{b}{h}, \frac{k_s}{H}, \frac{H-h}{H}\right) = 0$$

$$\beta = \frac{H-h}{H} \quad (13) \text{ و } (14)$$

فراسنجهای مورد آزمایش

به منظور دستیابی به داده‌های کافی و قابل اطمینان، و پس از بررسی منابع مختلف، مقرر گردید که تغییرات فراسنجهای زیر مورد بررسی قرار گیرند. همانطور که از جدول (1) بر می‌آید فراسنج β عبارت است از عمق نسبی،³ که همان نسبت عمق در نهر ساحلی به عمق در نهر اصلی می‌باشد، دلیل این‌که از نسبت‌های بیشتر 0/5 صرف‌نظر گردیده این است که در نسبت‌های بالاتر از آن، عملاً نهر مرکب معنای هیدرولیکی نداشته و نهر اصلی مانند یک چاله در وسط نهر مستطیلی عمل می‌کند. فراسنج β همان‌طور که در شکل (2) مشخص شده، عبارت است از نسبت نصف عرض نهر اصلی به ارتفاع دیواره‌های نهر اصلی (اختلاف ارتفاع نهر اصلی از نهر ساحلی). همان‌طور که پیشتر گفته شد، عرض کف نهرهای اصلی و ساحلی در تمام آزمایش‌های ثابت می‌باشد، در حالی که فاصله‌ی ارتفاعی نهرهای اصلی و ساحلی در چهار اندازه‌ی مختلف 6، 9، 12 و 15 سانتی متر تغییر کردند. فراسنج مورد آزمایش دیگر اندازه زبری بود که به

سوی دیگر خطاهای زیاد و عدم جوابدهی مناسب در بسترهای زبر می‌باشد، زیرا در بسترهای مزبور به علت بهم خوردن لایه‌ی مرزی و عدم قرار گرفتن لوله‌ی پرستون در جایگاه مناسب، اعداد استخراجی از روش پرستون قابل استناد نخواهند بود. در این تحقیق از اندازه‌گیری تنش با استفاده از نیروی بازدارنده و جذب اندازه‌ی حرکت استفاده شده است. در این روش نیروی بازدارنده وارد از طرف سیال بر اجسام مستغرق با استفاده از انواع نیرو سنج‌ها از جمله بن‌پارهای بار پویا ثبت می‌گردد. فتحی‌مقدم و کاوون¹ در سالهای 1997 و 2000 از این روش به منظور جذب اندازه‌ی حرکت و اندازه‌گیری نیروی بازدارنده گرفته شده از سیال با کاربرد بن‌پارهای پوشش گیاهی استفاده کردند. از آن‌جا که در این روش بر خلاف روش کارمایه، اندازه‌گیری فقط در یک نقطه صورت می‌گیرد، خطای اندازه‌گیری بسیار کمتر و دقت داده‌برداری بالاتر است. در این تحقیق از روش مزبور برای اندازه‌گیری جذب اندازه‌ی حرکت و نیروی مالشی گرفته شده به‌وسیله‌ی زبری کف و جداره‌ی نهر استفاده شد. به منظور تحریک تنش برشی در این تحقیق چهار نوع زبری با اندازه‌های مختلف مورد بهره‌وری قرار گرفته‌اند.

تجزیه و تحلیل ابعادی

برای نهر مستقیم و با آب صاف، دارای جریان ماندگار و یکنواخت، بدون وجود موج در سطح آب، و بدون حرکت بار بستر، از فراسنجهای موثر در تنش برشی، می‌توان علاوه بر شکل مقطع، به فراسنجهای زیر اشاره کرد:

الف) خصوصیات جنبشی سیال شامل: جرم مخصوص \mathbf{r} ، لزوجت جنبشی u و سرعت متوسط جریان V
 ب) خصوصیات جنبشی جریان شامل: متوسط سرعت برشی جداره \bar{u}_{*w} ، متوسط سرعت برشی کف \bar{u}_{*b} و متوسط سرعت برشی کل \bar{u}_*
 ج) خصوصیات مرزی و هندسی جریان شامل: عمق جریان در نهر اصلی، h ، عمق جریان در دشتهای سیلابی جانبی به‌علاوه‌ی نهر اصلی، H ، نصف عرض کف نهر اصلی b ، ارتفاع زبری نهر اصلی K_s

²- knife edge flum

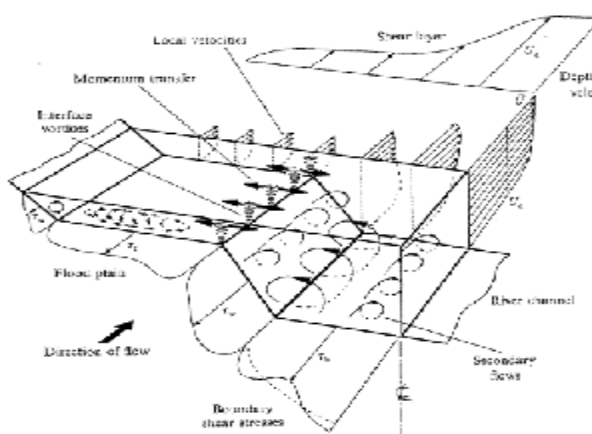
³- relative depth

¹- Fathi-Moghadam and Kouen 1997,2000

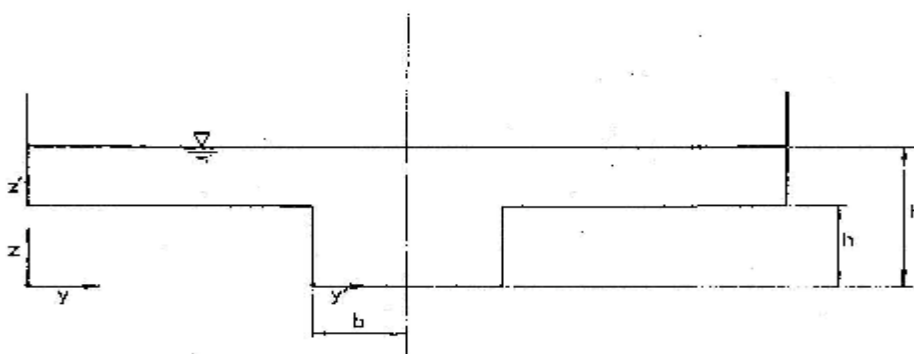
منظور تحریک تنش برشی (جهت افزایش نسبت به بستر صاف)، و نشان دادن قابلیت روش جذب اندازهی حرکت نسبت به سایر روشها که در بستر زبر تقریبا ناتوان هستند، به کار رفت.

جدول 1- فراسنجهای مورد آزمایش.

فراسنجهای مورد آزمایش	مقادیر فراسنجهای مورد آزمایش
$\beta = \frac{H-h}{H}$	0/1 , 0/2 , 0/25 , 0/3 , 0/35 , 0/4 , 0/5
$\delta = \frac{b}{h}$	0/66 , 0/83 , 1/11 , 1/66
D50	1/31 , 4/6 , 9/36 , 12/5



شکل 1- ناحیهی بر همکنش بین زیر مقاطع در یک مقطع مرکب.



شکل 2- شکل طرحوارهی مقطع مرکب.

چاقویی² ابداع گردید. آزمایشها در یک نهر پایه‌دار با عرض خالص 80 سانتیمتر، عمق 550 سانتیمتری و به طول 8/3 متر شامل 4/1 متر نهر بالادست، یک متر نهر پایه‌دار لبه چاقویی و 3/2 متر نهر پایین دست انجام شد. به‌منظور مهار کردن رقوم پایاب و ایجاد شرایط مختلف نسبتهای عرض به عمق در نهر اصلی و دشتهای سیلابی

مواد و روشها

جهت سنجش اندازهی حرکت وارده بر بستر و جداره‌ی نهر، تغییراتی در روش ارائه شده به‌وسیلهی فتحی مقدم (1997) تحت عنوان میز لبه چاقویی¹ اعمال گردید و شیوه جدیدی تحت عنوان نهر پایه‌دار لبه

². knife edge flume

¹. knife edge table

سانتیمتر، و در جداره برابر با 1 سانتیمتر بود. در هر قرائت 1003 داده برای فشار پایا و 1003 داده برای فشار پویا به دست آمد. کلیه‌ی 112 آزمایش نهر مرکب با کاربرد لوله‌ی پرستون در تمام زبریها انجام گرفت، سپس داده‌های حاصل یکبار با کاربرد منحنی واسنجی پتل و یکبار با کاربرد منحنی واسنجی وو و راجاراتنام مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، تنش برشی برای هر عمق، و به تبع آن و با استفاده از رابطه‌ی (11) نیروی برشی ظاهری (اندازه‌ی حرکت انتقالی) در هر عمق به دست آمد. سپس با توجه به رابطه‌ی (12) درصد نیروی برشی ظاهری محاسبه گردید، و تغییرات آن با زبریها و عمقهای نسبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

$$\% ASF = \left(\frac{ASF}{\rho g A_{mc} S_F} \right) 100 \quad (12)$$

نتایج و بحث

پس از انجام مراحل مختلف آزمایش، و با توجه به فرضیات زیر که عبارت بودند از: توزیع تنش برشی در بستر نهر پایه‌دار و جداره‌ها دارای تقارن نسبت به محور مرکزی نهر پایه‌دار. جهت کاربرد نتایج این تحقیق در عمل، مقیاس شبیه‌سازی به‌اندازه‌ی کافی بزرگ فرض گردیده است. جریان در نهر توسعه یافته کامل فرض شده است. در این حالت، تغییر در مکان اندازه‌گیری بر روی بعد طولی منجر به تغییر در ضریب اصطکاک سطحی نمی‌شود. به دلیل این‌که شیب نهر پایه‌دار ثابت بوده و تغییرات ارتفاع آب به وسیله‌ی دریچه‌ی پایین دست انجام می‌گیرد، فرض می‌شود که به اندازه کافی طولانی است که باعث ایجاد جریان یکنواخت در قسمت بیشتر نهر می‌شود، پس از محاسبه‌ی نیروی برشی ظاهری با کاربرد سه روش مذکور، اقدام به مقایسه روشها در زبریها و ارتفاعهای مختلف گردید. برای این منظور از شکلهای شماره 3 تا 14 بهره گرفته شد. همان‌طور که در شکل 3 قابل ملاحظه است، برای ارتفاع $h=15\text{cm}$ روش منحنی واسنجی پتل همخوانی مناسبی با روش منحنی واسنجی وو و راجاراتنام دارد. بیشترین میزان همخوانی مربوط به اندازه‌ی زبری 4.6 میلیمتر می‌باشد که تقریباً روی خط 45 درجه قرار می‌گیرند. در شکل 4 که به مقایسه یک روش کارمایه (وو و راجاراتنام) و یک روش اندازه‌ی حرکت می‌پردازد. قابل مشاهده است که در زبریهای بزرگتر،

در بده‌های مختلف، یک دریچه در انتهای نهر پایه‌دار پیش‌بینی گردیده است. جهت اندازه‌گیری تنش کل از حسگر بار پویا¹ بهره‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری بارهای پویایی از مبدل نیرو استفاده گردید. از این وسیله قسمت متحرک نهر را به قسمت ثابت وصل، و جهت ثبت تغییرات نیروی مالشی وارد بر جداره‌ها و کف قسمت متحرک نهر بهره گرفته شد. توجه شود که برای واسنجی کردن این دستگاه از وزنه‌های مختلف استفاده گردید. قرائت اختلاف فشار حاصل از تبدیل سرعت به ارتفاع آب در لوله‌های پرستون، یکی از منابع اصلی ایجاد خطا در تعیین تنش برشی در اکثر تحقیقات گذشته بوده است، که در این تحقیق با استفاده از فشارسنج فشار این خطا به مقدار چشمگیری مرتفع گردید. برای اندازه‌گیری فشار پویایی از مبدل فشار استفاده شده است. از این وسیله جهت ثبت اختلاف فشار در لوله‌ی پرستون استفاده می‌گردد.

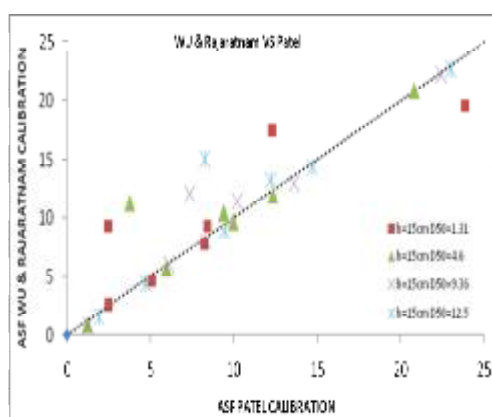
مراحل انجام آزمایش

در این تحقیق، ابتدا نهر به حالت مستطیلی تغییر شکل داده شد و کلیه نیروهای لازم که باعث ایجاد اندازه‌ی حرکت طولی در جهت جریان در نهر مستطیلی می‌شوند، یک بار در حالت بدنه‌ی زبر و یک بار در حالت کف زبر با بیش از 100 قرائت، فقط در حالت مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفت. سپس حالت‌های مختلف نهر مرکب (112 حالت) مورد آزمایش قرار گرفتند. سپس میزان اندازه‌ی حرکت طولی در نهر مرکب به وسیله قرائت‌های نهر مستطیلی از روش تسهیم به نسبت برای 7 پیرامون خیس شده مورد محاسبه قرار گرفتند، و با عدد برداشت شده از اندازه‌گیری مستقیم اندازه‌ی حرکت در نهر مرکب مورد مقایسه قرار گرفتند که از تفاضل آنها اندازه‌ی حرکت عرضی انتقالی و به تبع آن تنش برشی ظاهری با کاربرد روش حسگر نیرو به دست آمد. لوله‌ی پرستون برای اندازه‌گیری فشار پویایی و پایایی به صورت موضعی، و تبدیل تفاوت فشار به تنش برشی موضعی طبق قانون پاتل به کار برده شد. قطر خارجی لوله‌ی پرستون برابر با 4 میلیمتر بود. لوله‌ی پرستون بر روی کالسکه‌ای در بالای نهر نصب شده و به صورت عمود بر بستر و جداره قرار گرفته بود. فاصله‌ی اندازه‌گیریها در بستر برابر با 2

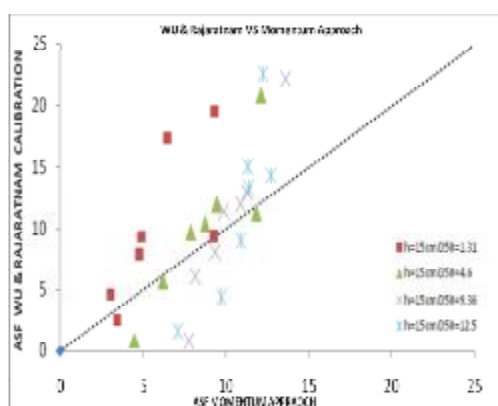
¹. load cell

همزمان به شکل 3 می‌توان به این نکته پی برد که هماهنگی مزبور نسبت به $h=15\text{cm}$ بسیار کمتر است. همچنین، در مقایسه روشهای وو و راجاراتنام با روش اندازه‌ی حرکت در شکل 7 و در $h=12\text{cm}$ این نکته به نظر می‌رسد که هماهنگی این روشها در مقایسه با حالت $h=15\text{cm}$ بسیار کمتر است، که این روند در شکل‌های 10 و 13 بسیار مشهودتر می‌باشد. همچنین، این روند ذکر شده، و افزایش پراکندگی در آمارهای مورد بحث در مقایسه روشهای اندازه‌ی حرکت و پتل در شکل های 11 و 14 روند شدیدتری به خود می‌گیرند.

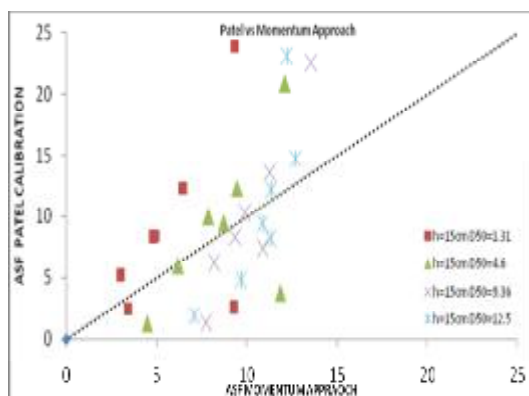
هماهنگی بیشتری بین روش کارمایه و اندازه‌ی حرکت وجود دارد، و با این حال اعداد به‌دست آمده از رابطه‌ی وو و راجاراتنام، به لحاظ کمی تا حدودی بزرگتر از رابطه اندازه‌ی حرکت می‌باشند. در این بین، بیشترین پراکندگی مربوط به زبری 1.31 میلی‌متر بود. با توجه به شکل شماره 5، که مربوط به مقایسه‌ی روش پتل و روش اندازه‌ی حرکت است، می‌توان دریافت که اگر چه هماهنگی نسبتاً خوبی بین دو روش دیده می‌شود، ولیکن میزان پراکندگی نسبت به شکل 4 بسیار بیشتر است. با توجه به هماهنگی موجود بین روش پتل و وو در $h=12\text{cm}$ ، و با توجه



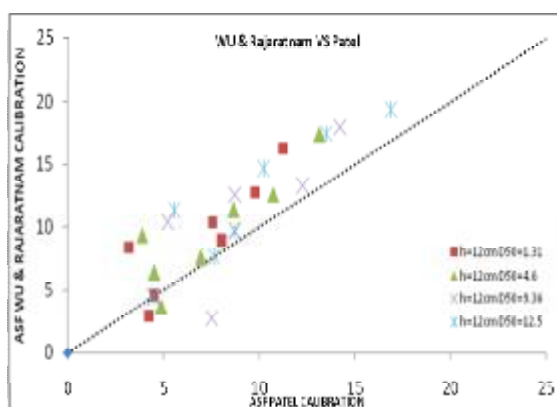
شکل 3- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و پتل در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=15\text{cm}$.



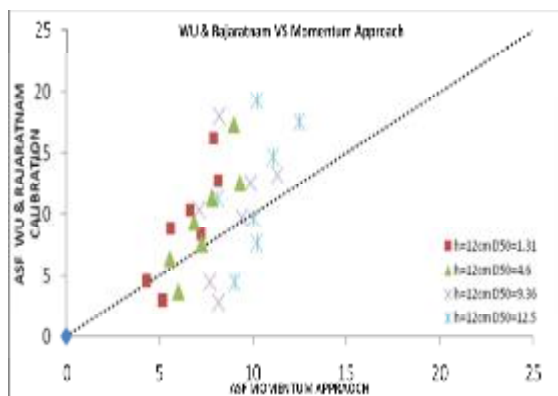
شکل 4- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=15\text{cm}$.



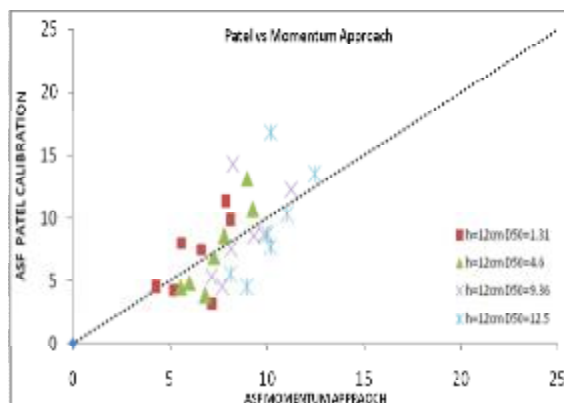
شکل 5- مقایسه‌ی روشهای پتل و اندازه‌ی حرکت در محاسبه تنش برشی ظاهری در $h=15\text{cm}$.



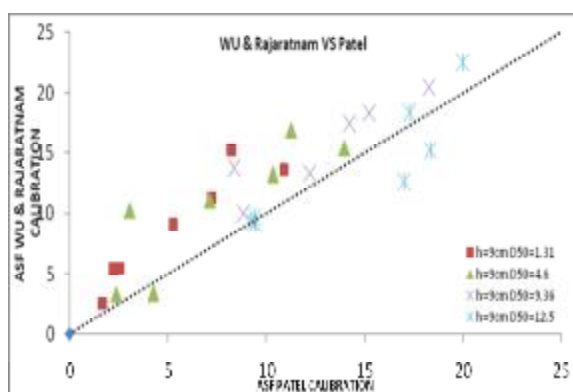
شکل 6- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و پتل در محاسبه تنش برشی ظاهری در $h=12\text{cm}$.



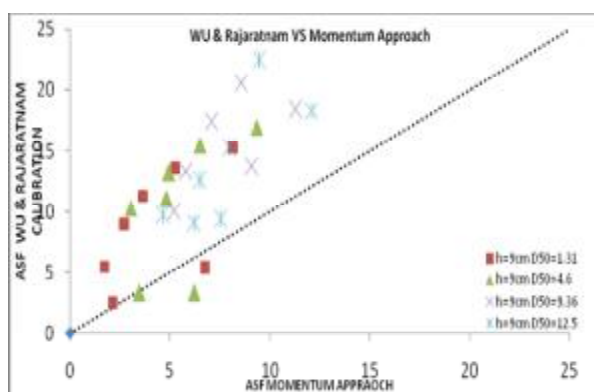
شکل 7- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و اندازه‌ی حرکت در محاسبه تنش برشی ظاهری در $h=12\text{cm}$.



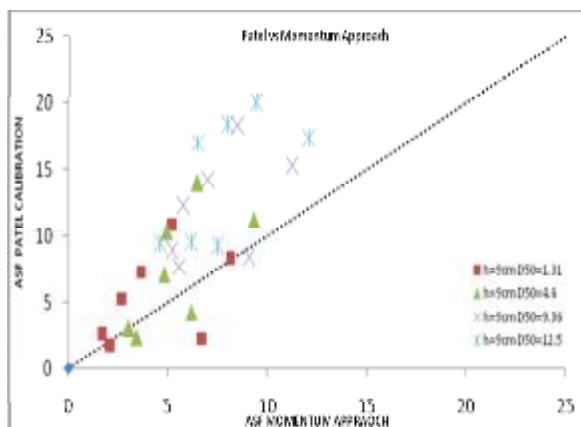
شکل 8- مقایسه‌ی روشهای پتل و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=12\text{cm}$.



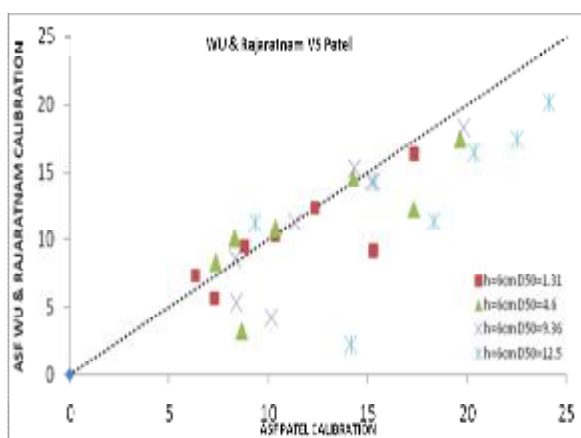
شکل 9- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و پتل در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=9\text{cm}$.



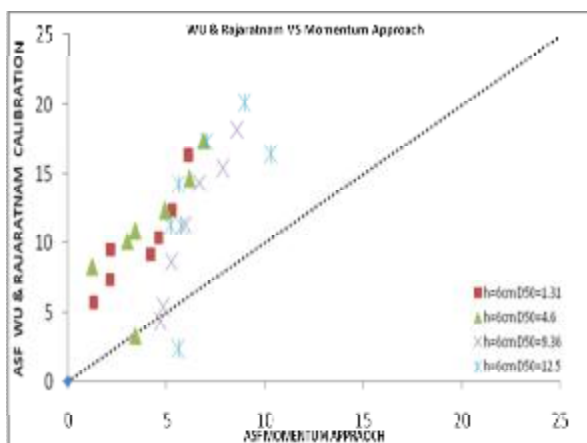
شکل 10- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=9\text{cm}$.



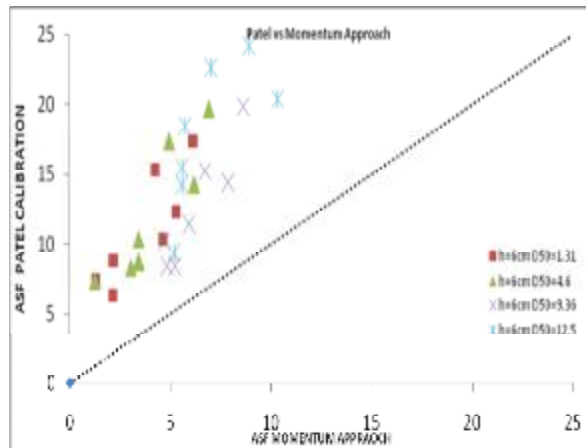
شکل 11- مقایسه‌ی روشهای پتل و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=9\text{cm}$.



شکل 12- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و پتل در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=6\text{cm}$.



شکل 13- مقایسه‌ی روشهای وو و راجاراتنام و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=6\text{cm}$.



شکل 14- مقایسه‌ی روشهای پتل و اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی تنش برشی ظاهری در $h=6\text{cm}$.

نتیجه‌گیری

شکل 7 و حالت $h=15\text{cm}$ ، شکل 4 رخ می‌دهد. این در حالتی است که کمترین هماهنگی دو روش نامبرده در حالت $h=6\text{cm}$ و $h=9\text{cm}$ دیده می‌شود. دلیل این پدیده آن است که اگر چه روش و و راجاراتنام مختص بستر زبر می‌باشد، ولی در عمقهای مختلف و زبریهای گوناگون، کارایی خود را در پاره‌ای از مواقع از دست می‌دهد. در معادله‌ی 10 قابل مشاهده است که تاثیر زبریها در این معادله، با توجه به فراسنج K_s در نظر گرفته شده، اما مشکل این روش آن است که در صورت صفر شدن ضریب b ، که به شدت تابع شرایط هیدرولیکی جریان و عدد رینولدز برشی و عدد رینولدز لوله‌ی پرستون می‌باشد، عملاً فراسنج K_s از معادلات حذف گردیده و تاثیر زبری در نظر گرفته نمی‌شود. به این دلیل، شاهد رفتارهای متفاوت از روش و و راجاراتنام بود. و آمار به‌دست آمده از این روش در پاره‌ای از مواقع قابل اطمینان نخواهند بود. همچنین، باید به این نکته توجه جدی نمود که لوله‌ی پرستون در بسترهای با زبری بزرگتر، به لحاظ موقعیت قرارگیری و همچنین قرائت صحیح فشارهای مرزی، به دلیل به هم خوردن لایه‌ی مرزی تحت تاثیر زبری، دارای اشکالات فراوان است. دقیقاً به همین دلیل است که در شکلهای 4، 7، 10 و 13 زبریهای با اندازه‌ی ریزتر، که کمتر لایه‌ی مرزی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، به خط 45 درجه نزدیکتر، و زبریهای درشت‌تر که بیشتر لایه‌ی

1- بیشترین هماهنگی مربوط به مقایسه روشهای پتل و و و راجاراتنام در حالت $h=15\text{cm}$ رخ می‌دهد، بطوری که اعداد خروجی این دو روش تقریباً یکسان می‌باشند؛ این در حالتی است که کمترین هماهنگی این دو روش مزبور در حالت $h=6\text{cm}$ دیده می‌شود. دلیل پدیده مزبور این است که بطور کلی، روش پتل مختص بسترهای صاف بوده و در بسترهای زبر اعداد قابل اعتمادی را ارائه نمی‌کند. حال با توجه به آن که در عمقهای زیاد ($h=15\text{cm}$) تنش برشی جریان بیشتر تحت تاثیر ژرفای جریان است تا زبری بستر، روش منحنی پتل دچار خطای کمتری شده و هماهنگی بهتری با روش و و راجاراتنام، که مختص بسترهای زبر است، نشان می‌دهد. اما در عمقهای کم ($h=6\text{cm}$)، زبری جریان نقش موثرتری را در تنش برشی دارد، که سبب بروز خطا در روش منحنی پتل، و عدم هماهنگی آن با روش و و راجاراتنام می‌شود. در تایید استدلال فوق می‌توان دریافت که در حالت $h=6\text{cm}$ ، و در شکل (12) بیشترین نزدیکی به خط 45 درجه را زبریهای ریزتر یعنی اندازه‌های (1.31 و 4.6) میلیمتر دارند، و دورترین فاصله از خط 45 درجه را زبریهای بزرگتر، یعنی اندازه‌ی (12.5) میلیمتر دارند، که نشان دهنده‌ی این است که تنش برشی جریان را کاملاً تحت تاثیر خود قرار می‌دهند.

2- بیشترین هماهنگی مربوط به مقایسه‌ی روشهای و و و راجاراتنام و اندازه‌ی حرکت در حالت $h=12\text{cm}$.

4- بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که هر چند جهت تحلیل تنش و نیروی برشی موضعی در بسترهای صاف روش پتل و وو و راجاراتنام روشهای مناسبی می‌باشند، ولی در اندازه‌گیری اندازه‌ی حرکت انتقالی (نیروی برشی ظاهری) روش اندازه‌گیری نیروی روش مطمئنتری را نسبت به روشهای پتل و وو و راجاراتنام، مخصوصاً در بسترهای زبر ارائه نموده، و علاوه بر کاهش حجم محاسبات انجام شده، نتایج مطمئنتر و کاملتری را در اختیار محققین قرار می‌دهد. همچنین، روش اندازه‌گیری نیرو با اندکی تغییرات و تکامل توانایی کاربرد در تحقیقات جریان غیر ماندگار را دارد، در حالی که روشهای پتل و وو و راجاراتنام مخصوص جریان ماندگار می‌باشند.

منابع

1. Abe, H., H. Kawamura, and Y. Matsuo. 2001. Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow with respect to the Reynolds number dependence. *J. Fluid Eng.* 123: 382-394.
2. Abril J.B., and D.W. Knight. 2004. Stage-discharge prediction for rives in flood applying a depth-averaged model. *J. Hydraul. Res. IAHR.* 42: 616-629.
3. Ackers, P. 1991. Hydraulic design of straight compound channels. SR Report 281, HR Wallingford, UK. Vol. 1 & 2: 1-130 & 1-140.
4. Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. *Proc. of ICE J. Water, Maritime and Energy.* 96: 247-257.
5. Ackers, P. 1993. Flow formulae for straight two-stage channels. *J. Hydraul. Res. IAHR.* 31: 509-531.
6. Alavian, V., and V.H. Chu, 1985. Turbulent exchange flow in shallow compound channel. *Proce. 21st Cong. IAHR, Melbourne.* 3: 446.
7. Knight, D.W., J.D. Demetriou, and M.E. Homed. 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Agric. Water Manage.* 110:405-422 at the concave bank. *Hydraulic Processes.* Vol. 12, pp.1323-1338.

مرزی را دستخوش تغییر می‌کنند، از خط 45 درجه دورتر خواهند بود.

3- بطور کلی، از میان مقایسه‌های انجام شده در این مقاله، کمترین هماهنگی میان روش منحنی واسنجی پتل و روش اندازه‌ی حرکت در محاسبه‌ی نیروی برشی ظاهری وجود دارد، که در این بین بیشترین همخوانی این دو روش، همان‌طور که در شکل‌های 5 و 8 قابل مشاهده است، مربوط به محاسبه‌ی نیروی برشی ظاهری در حالات $h=12\text{cm}$ و $h=15\text{cm}$ می‌باشد، و کمترین هماهنگی، همان‌طور که در شکل 14 قابل مشاهده است، مربوط به حالت $h=6\text{cm}$ است. با توجه به شکل 14 در می‌یابیم زبریهای بزرگتر از خط 45 درجه دورتر، و زبریهای ریزتر به خط 45 درجه نزدیکتر، می‌باشند. دلیل این پدیده آن است که همان‌طور که از روابط (4) تا (8) بر می‌آید، روش پتل مختص بسترهای صاف بوده، و هیچ‌گونه عامل زبری در معادلات قابل مشاهده نیست، یعنی در بسترهای زبر، اعداد قابل اعتمادی ارائه نمی‌کند. حال، با توجه به آن‌که در عمقهای زیاد ($h=15\text{cm}$) تنش برشی جریان بیشتر تحت تاثیر عمق جریان است تا زبری بستر، روش منحنی پتل دچار خطای کمتری شده و هماهنگی بهتری را با روش اندازه‌ی حرکت نشان می‌دهد، اما در عمقهای کم ($h=6\text{cm}$)، زبری جریان نقش موثرتری را در تنش برشی دارد که سبب بروز خطا در روش منحنی پتل، و عدم هماهنگی آن با روش اندازه‌ی حرکت می‌شود. همچنین، باید به این نکته توجه جدی نمود که لوله‌ی پرستون در بسترهای با زبری بزرگتر، به لحاظ موقعیت قرارگیری و همچنین قرائت صحیح فشارها به دلیل به هم خوردن لایه‌ی مرزی، تحت تاثیر زبری دارای اشکالات فراوان است. به همین دلیل است که در شکل‌های 5، 8، 11 و 14 زبریهای با اندازه ریزتر، که کمتر لایه‌ی مرزی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، به خط 45 درجه نزدیکتر، و زبریهای درشت‌تر، که بیشتر لایه مرزی را دستخوش تغییر می‌کنند از خط 45 درجه دورترند.

9. Lashkar-Ara, B., M. Fathi-Moghadam, M. Shafai-Bajestan, and A. Jael. 2010. Boundary shear stresses in smooth channels. *J. Food, Agric. & Environ.* 8:132-136.
8. Kouwen, N., and M. Fathi-Moghadam. 2000. Friction factors for coniferous trees along rivers, *J. Hydraul. Eng. ASCE* 126: 732-740.