

مدل تجربی پیش‌بینی سرعت طولی در پیچانرود تند

جواد مظفری^{۱*}، ابراهیم امیری تکلدانی^۲ و محمد سعادت نیا^۳

چکیده

رودخانه‌های طبیعی به‌ندرت دارای مسیر مستقیم‌اند و معمولاً به شکل پیچانرود هستند. شناخت مشخصات جریان در آبراهه‌های روباز و تأثیر متقابل جریان و بستر آبراهه بر یکدیگر از دیرباز برای محققین جالب توجه بوده است. مشکل عمده در تبیین مشخصات جریان در پیچ رودخانه، وجود جریان‌های ثانویه قوی و اثرات آن بر توزیع سرعت‌های طولی و عرضی است. جریان در پیچ رودخانه‌ها توسط محققین زیادی بررسی شده و روابط متعددی برای تعیین پارامترهای جریان ارائه شده است. با وجود این روابط ارائه شده، به‌ویژه در پیچ‌های تند که جریان ثانویه بسیار قوی بر الگوی سرعت تأثیرگذار است، پاسخ‌های مناسبی را ارائه نمی‌دهند. در این تحقیق در ابتدا، با توجه به خصوصیات سرعت طولی در پیچ تند، مدلی جدید برای پیش‌بینی سرعت ارائه شده است که شامل دو بخش توانی و سینوسی است. سپس به مقایسه برخی از مدل‌های تعیین نیمرخ سرعت طولی در پیچ با مدل جدید پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها روی کانال آزمایشگاهی قوسی شکل با زاویه مرکزی ۱۹۳ درجه نشان داد که مدل جدید در مقایسه با مدل‌های پیشین با خطای کمتری قادر به پیش‌بینی سرعت طولی در پیچ است. همچنین، بررسی کاربرد مدل با استفاده از داده‌های ۳ پیچ با نسبت‌های شعاع انحنا به عرض مختلف، نشان از قابلیت کاربرد آن در پیچ‌های مختلف دارد.

واژه‌های کلیدی: پیچ تند، سرعت طولی، جریان ثانویه و بیشینه سرعت.

ارجاع: مظفری ج. امیری تکلدانی ا. و سعادت نیا م. ۱۳۸۹. مدل تجربی پیش‌بینی سرعت طولی در پیچانرود تند. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۵۹-۶۸.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Javad_370@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۹

مقدمه

رودخانه‌ها غالباً در مسیری سینوسی شکل که تحت عنوان پیچانرودها نام‌گذاری شده است، جریان دارند. وجود جریان عرضی قوی و اثرات متقابل بین جریان، انتقال رسوب و توپوگرافی بستر در پیچانرودها، پیش‌بینی خصوصیات جریان را بسیار پیچیده کرده است. تحقیقات در خصوص مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچانرودی را می‌توان در سه قالب تحقیقات صحرایی، آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی دسته‌بندی کرد. در زمینه کارهای صحرایی، باتورست (۱۹۷۹) با بررسی جریان در رودخانه‌های آبرفتی درشت‌دانه نتیجه گرفت که جریان ثانویه در دبی‌های کوچک و بزرگ، در ضعیف‌ترین حالت و در جریان متوسط در قوی‌ترین حالت است. انور (۱۹۸۶) با مطالعه ساختار آشفتگی جریان، نتیجه‌گیری کرد که پروفیل توزیع سرعت از قانون لگاریتمی سرعت پیروی نمی‌کند. در زمینه کارهای آزمایشگاهی، هوک (۱۹۷۴) در یک فلوم به عرض یک متر و دیواره‌های صلب و بستر فرسایش‌پذیر که مسیر آن از منحنی سینوسی تبعیت می‌کرد، اقدام به اندازه‌گیری توپوگرافی کف و قدرت جریان ثانویه کرد و عامل اصلی توسعه پشته را توزیع رسوبات دانست. زیمرمن (۱۹۷۷) بیان کرد که شدت جریان ثانویه با تغییر تابع زبری بستر، به‌وضوح تغییر می‌کند. دوریند (۱۹۷۷) با استفاده از توزیع لگاریتمی سرعت برای سرعت جریان اصلی، توزیع عمقی سرعت جریان ثانویه را به‌دست آورد. ادگارد و برگز (۱۹۸۸) به مطالعه جریان در یک کانال آبرفتی انحنادار پرداختند. آن‌ها بیان کردند که حرکت هسته ماکزیمم سرعت به سمت ساحل خارجی بوده و در زاویه حدود ۹۰ درجه به ساحل خارجی می‌رسد. عبدشریف (۱۳۸۵)، به بررسی سرعت‌های طولی در پیچ پرداخت و اظهار داشت که بهترین مدل، مدل پیشنهادی جانسن و پارکر (۱۹۸۹) است. بلانکارت (۲۰۰۲) در کانالی با کف افقی ماسه‌ای و سواحل عمودی ثابت، جریان آشفته را بررسی کرده و بیان کرد که نیمرخ سرعت طولی کاملاً مسطح می‌باشد. در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی جریان، شیمیزو (۱۹۸۹)، راسر (۲۰۰۵) و خسرونژاد (۲۰۰۸) تحقیقاتی را انجام دادند و مدل‌هایی را با در نظرگیری مشخصات توپوگرافی در پیچ مانند پشته و حوضچه ارائه دادند.

در زمینه پیش‌بینی سرعت طولی، روزفسکی (۱۹۵۷)، کیکاوا و همکاران (۱۹۷۶)، جانسن و پارکر (۱۹۸۹) و بریج

(۱۹۹۲) روابطی را برای سرعت طولی در پیچ یکنواخت ارائه کرده‌اند که در زیر می‌آید:

روزفسکی (۱۹۵۷) با در نظر گرفتن توزیع لگاریتمی، رابطه زیر را برای توزیع سرعت طولی ارائه کرده‌است:

$$\frac{u}{\bar{U}} = 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + \ln \eta_z) \quad (1)$$

که در آن: $\eta_z = \frac{Z}{d}$ (که Z ارتفاع نقطه مورد بررسی از کف و d عمق جریان)، $\bar{U}$ سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی، κ ثابت ون کارمن، C ضریب شری و g ثابت شتاب ثقل است. کیکاوا و همکاران (۱۹۷۶) معادله زیر را برای توزیع سرعت‌های طولی ارائه کرده‌اند:

$$\frac{u}{\bar{U}_*} = \frac{\bar{u}}{\bar{U}} \left(\frac{\bar{U}}{\bar{U}_*} + \frac{1}{\kappa} (1 + \ln \eta_z) \right) \quad (2)$$

که در آن: $\bar{u}$ سرعت متوسط گیری شده در عمق و $\bar{U}_*$ سرعت برشی متوسط مقطع عرضی است. جانسون و پارکر (۱۹۸۹) نیز معادله زیر را برای سرعت طولی پیشنهاد کرده‌اند که در آن: $\chi = \frac{0.077}{\sqrt{C_f}} - \frac{1}{3}$ و $C_f = \left(\frac{\bar{U}_*}{\bar{U}} \right)^2$ هستند.

$$u = \frac{\sqrt{C_f}}{0.077} \bar{u} \left[\chi + \frac{Z}{d} - 0.5 \left(\frac{Z}{d} \right)^2 \right] \quad (3)$$

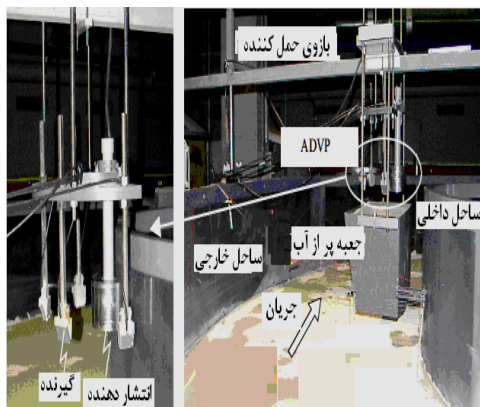
بریج (۱۹۹۲) برای جریان ماندگار در پیچ یکنواخت معادله زیر را برای سرعت طولی ارائه کرده است.

$$\frac{u}{\bar{u}} = 1 + \frac{u_c}{\bar{u}_c} \left[\frac{1}{\kappa} \left(1 + \ln \left(\frac{Z}{d} \right) \right) \right] \quad (4)$$

که در آن: u_c سرعت برشی و $\bar{u}_c$ متوسط عمقی سرعت در خط مرکزی آبراهه هستند.

به‌هرحال، علیرغم همه تحقیقات بر روی پیچانرودها، بینش و آگاهی از فرایندهای موجود در پیچانرودها هنوز ناکافی است و مدل‌ها، الگوی جریان را با عدم قطعیت زیادی پیش‌بینی می‌کنند که نشان‌دهنده نیاز برای شناخت بیشتر الگوهای جریان و فهم بهتر تغییرات آن‌ها است. یکی از مهمترین پارامترهای الگوی جریان، که نیاز به بررسی و شناخت بیشتری دارد، نیمرخ سرعت طولی است. نیمرخ‌های سرعت طولی روزفسکی (۱۹۵۷)، کیکاوا (۱۹۷۶) و بریج (۱۹۹۲) براساس قانون لگاریتمی بوده و با استفاده از طول اختلاط پرناتل به‌دست آمده‌اند. این درحالی است که طول

این کانال از دستگاه^۱ ADVP استفاده شد (شکل ۲). این دستگاه دارای انتشار دهنده مرکزی^۲ و چهار گیرنده^۳ است که در درون یک جعبه پر از آب قرار می‌گیرند و در هر بار اندازه‌گیری، سرعت را در یک ستون عمودی آب برداشت می‌کند.



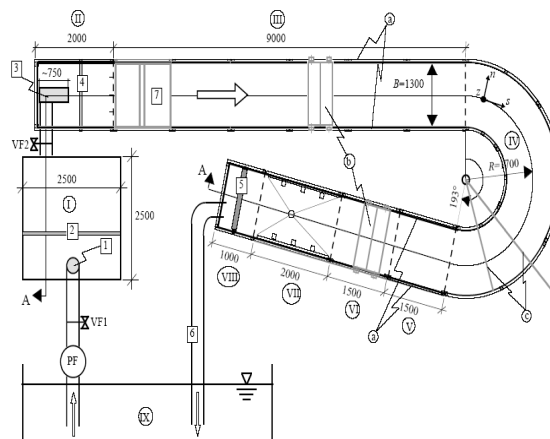
شکل ۲- دستگاه اندازه‌گیری ADVP

برای انجام آزمایش‌ها، در ابتدا با ایجاد سطح افقی در رسوبات، دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه برقرار شد. با توجه به تنظیم خودکار دبی با دستگاه‌های دیجیتالی، دقت آن زیاد بود. دبی رسوبات به وسیله تغذیه‌کننده رسوب^۴ از بالادست وارد کانال شد. رسوبات استفاده شده، تقریباً یکنواخت با محدوده ۱/۶ تا ۲/۲ و متوسط ۲ میلیمتر می‌باشد و میزان رسوب ورودی مورد نیاز براساس مدل‌های موجود تخمین بار بستر تعیین شده است. جریان به مدت سه هفته (بیش از ۲۰۰ ساعت) ادامه داشت تا پشته در بخش ساحل داخلی کاملاً گسترش یابد. شکل ۳ پشته را در دو حالت در حال گسترش و گسترش یافته نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات سریع جایگاه تلماسه‌ها^۵، امکان اندازه‌گیری با کف متحرک وجود نداشته و در نتیجه، رسوبات بستر با موادی که داکفیل^۶ نام دارد، منجمد شد تا بتوان اندازه‌گیری‌ها را انجام داد. این ماده با آب مخلوط شده و بر روی بستر پاشیده می‌شود. یک هفته برای خشک شدن آن زمان لازم می‌باشد و اثری روی زبری نمی‌گذارد به طوری که دانه‌های رسوب، به خوبی قابل مشاهده است. سپس توپوگرافی و سطح آب با اشل نقطه‌ای اندازه‌گیری شد.

اختلاط پراتل برای جریان دو بعدی است، بنابراین در جریان سه بعدی با خطای زیادی مواجه خواهد بود و مدل‌های مذکور نیز نتایج مناسبی را به‌ویژه با افزایش تندی پیچ ارائه نمی‌دهند. همچنین پروفیل سرعت پارکر (۱۹۸۹) علیرغم عدم استفاده از قانون لگاریتمی، با خطای بالایی در پیش‌بینی‌ها مواجه است (عبد شریف، ۱۳۸۵). هدف از این تحقیق بررسی ضعف‌های مدل‌های پیشین پیش‌بینی سرعت طولی و ارائه مدل جدیدی برای تعیین سرعت طولی در پیچ می‌باشد که بتواند با ویژگی‌های نیمرخ‌های سرعت طولی در پیچ مطابقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر داشته باشد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی مدل‌های سرعت طولی و ارائه مدلی جدید، از کانال در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه EPFL سوئیس استفاده شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این کانال دارای عرض ۱/۳ متر، طول ۲۰ متر، عمق ۰/۸۵ متر و زاویه مرکزی قوس آن ۱۹۳ درجه است.



شکل ۱- سیمای کانال آزمایش‌ها

جریان از مخزن به حوضچه ورودی ابتدای کانال می‌رود و با گذر از بخش مستقیم کانال به طول ۹ متر که هدف از ساخت آن ایجاد جریان توسعه یافته است، به پیچ ثابتی به عمق ۰/۸۵ متر و شعاع انحنا ۱/۷ متر می‌رسد. در نهایت بخش مستقیمی به طول ۵ متر در پایین دست پیچ هست که جریان را به حوضچه ته‌نشینی رسوب و سپس به حوضچه خروجی هدایت می‌کند. برای اندازه‌گیری سرعت در

^۱ -Acoustic doppler velocity profiler

^۲ - Central emitter

^۳ - Reciever

^۴ - Feeder

^۵ - Dunes

^۶ - Dakfill

داد که الگوی توپوگرافی کف در یک پیچ ثابت، تغییری اساسی نخواهد کرد و ویژگی‌های اصلی توپوگرافی مانند پشته و حوضچه، تا حدود زیادی دارای الگوی ثابتی خواهند بود. برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه در ۱۳ مقطع و برای ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه در ۵ مقطع اندازه‌گیری‌ها انجام شد و زمان اندازه‌گیری برای هر نمونه ۱۸۰ ثانیه بود.

برای مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی سرعت، پارامتر خطای استاندارد که شاخصی از مربع خطاهای برآورد شده و مشاهده شده است، به کار گرفته شد که از معادله زیر محاسبه می‌شود (عبدشریف، ۲۰۰۵):

$$S.E = \sqrt{e^2_i} \quad \text{where} \quad e^2_i = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n} \quad (5)$$

که در آن: O بیانگر مقدار مشاهداتی، e مقدار پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است. این پارامتر بیانگر مقدار نسبی خطای برآورد مدل است. بنابراین هر چقدر مقدار این پارامتر کمتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است. پارامتر خطای استاندارد دارای بعد است و بنابراین از آن به‌طور مستقیم برای مقایسه چند سری داده نمی‌توان استفاده کرد. برای اینکه این پارامتر بتواند میزان خطا را برحسب درصد و بدون بعد ارائه کند، با متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده بی‌بعد می‌شود و از $100(S.E/\bar{o})$ برای مقایسه خطاها استفاده می‌شود.



شکل ۳- توسعه پشته (پیش از توسعه و پس از توسعه کامل)

در جدول ۱ مشخصات جریان در کانال برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه ارائه شده است. همچنین برای بررسی بیشتر کاربرد مدل جدید، دبی‌های ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه نیز روی توپوگرافی توسعه یافته در دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه، اجرا شد. البته توپوگرافی توسعه یافته در دبی‌های ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه دارای مقادیری اختلاف با توپوگرافی ۶۳ لیتر بر ثانیه است، اما به دلیل زمان‌بر و هزینه‌بر بودن آزمایش‌ها، تمامی آزمایش‌ها روی یک توپوگرافی اجرا شد. به‌هرحال، بررسی‌های قبلی (بلانکارت، ۲۰۰۹)، در همان کانال نشان

جدول ۱- مشخصات جریان در کانال

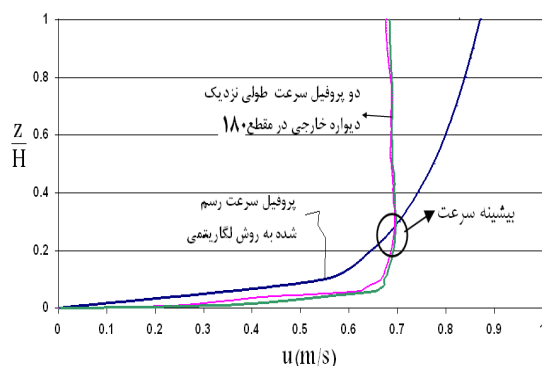
$Q [l s^{-1}]$	$H [m]$	$U [m s^{-1}]$	$u_* [m s^{-1}]$	S_f	$Re [-]$	Fr	R/B	R/H	B/H
۶۳	۰/۰۹۸	۰/۴۹	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۴۳۰۰۰	۰/۵	۱/۳۱	۱۷	۱۳
۸۹	۰/۱۲	۰/۵۴	۰/۰۶۳	۰/۰۰۳۷	۵۸۰۰۰	۰/۵	۱/۳۱	۱۴/۱	۱۰/۸
۱۰۴	۰/۱۳	۰/۶۳	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴۳	۷۳۰۰۰	۰/۵۶	۱/۳۱	۱۳	۱۰

بخش در مقطع عرضی ۷۰ درجه است. که همان حوضچه است. در همان مقطع عرضی، بیشترین ارتفاع پشته قابل مشاهده است. در این پیچ تند، بیشینه عمق جریان در حدود ۳/۵ برابر عمق متوسط جریان در کانال است.

نتایج و بحث

توپوگرافی بستر پس از توسعه‌یافتگی کامل و رسیدن به تعادل در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، تلماسه‌ها در ساحل خارجی پیچ قابل مشاهده‌اند. عمیق‌ترین

شکل ۶، دو نیمرخ اندازه‌گیری شده را به همراه نیمرخ لگاریتمی نشان می‌دهد که بسیار مسطح‌تر از نیمرخ لگاریتمی هستند. بلانکارت (۲۰۰۲) بیان کرد که مسطح شدن نیمرخ سرعت بر اثر تأثیر سلول جریان ثانویه بوده و بازخورد آن سبب می‌شود سلول جریان ثانویه نیز تا حدودی ضعیف‌تر شود.

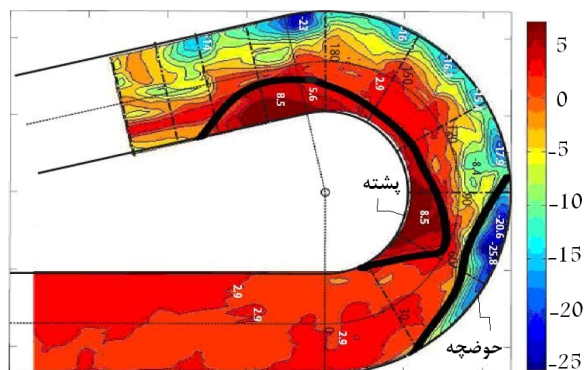


شکل ۶- مقایسه نیمرخ‌های سرعت طولی با نیمرخ رسم شده به روش لگاریتمی

به‌هرحال، نیمرخ سرعت در پیچ را نمی‌توان از نیمرخ لگاریتمی به‌دست آورد، زیرا با توجه به مسطح بودن و وجود بیشینه آن در زیر سطح آب، نیمرخ لگاریتمی توانایی پیش‌بینی صحیح را ندارد و مدل‌های رزوفسکی (۱۹۵۷)، کیکاوا (۱۹۷۶) و بریچ (۱۹۹۲) که از قانون لگاریتمی استفاده کرده‌اند، قابلیت استفاده را نخواهند داشت. مدل پارکر (۱۹۸۹) نیز علیرغم عدم استفاده از قانون لگاریتمی، ویژگی‌های سرعت طولی در پیچ را نشان نمی‌دهد.

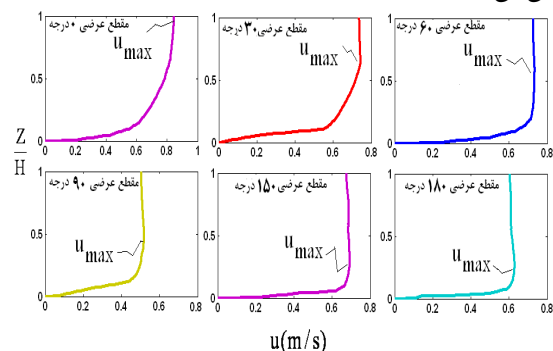
به‌هرحال، برای ارائه مدل جدید دو ویژگی مسطح بودن و وجود بیشینه در نزدیک کف در نظر گرفته شد. برای مسطح کردن سرعت طولی، از یک بخش توانی و برای بردن بیشینه سرعت در پایین عمق، از یک بخش سینوسی استفاده شد. شکل ۷، نیمرخ سرعت طولی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. طبق شکل، بخش توانی مدل نیمرخ مسطحی را ایجاد می‌کند که به سمت سطح آب افزایش می‌یابد. همچنین، بخش سینوسی سبب می‌شود که بیشینه سرعت در حدود ۰/۴ عمق قرار گیرد. مدل نهایی به‌دست آمده عبارت است از:

$$u = 0.9\bar{u}\left(1 + \frac{1}{\kappa} \frac{\bar{u}}{\bar{u}} (z/d - 0.1)^{0.5}\right) + \frac{\bar{U}}{8} \sin^2\left(\frac{3\pi}{4}\left(1 - \frac{z}{d}\right)\right) \quad (7)$$



شکل ۴- توپوگرافی توسعه یافته برای جریان ۶۳ لیتر بر ثانیه

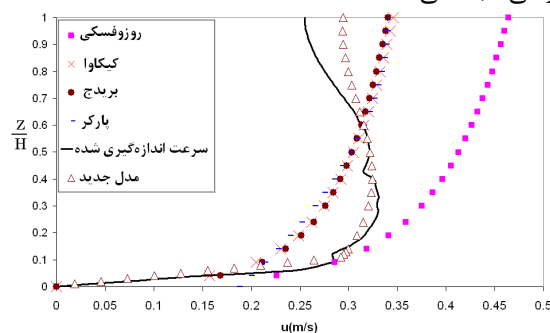
نیمرخ سرعت در پیچ دارای دو ویژگی مهم است که آنرا از نیمرخ سرعت در کانال مستقیم متمایز می‌کند. ویژگی اول، وجود نقطه بیشینه آن در زیر سطح آب می‌باشد. در شکل ۵، در ابتدای پیچ که جریان دو بعدی می‌باشد (مقطع صفر درجه)، سرعت به سمت سطح آب روند رو به افزایش دارد و از سرعت لگاریتمی تبعیت می‌کند. با حرکت به سمت مقطع عرضی ۳۰ درجه، تا حدودی نیمرخ‌های سرعت، مسطح شده و سرعت بیشینه به زیر سطح آب می‌رود که بیانگر شروع ایجاد جریان سه‌بعدی می‌باشد. از مقطع ۶۰ درجه، جریان کاملاً سه‌بعدی و نیمرخ‌های سرعت کاملاً مسطح می‌شوند و همچنین سرعت بیشینه به بستر نزدیک می‌شود. البته مکان بیشینه سرعت دارای روند مشخصی در طول پیچ نیست، اما بررسی بیش از ۵۰۰ نیمرخ سرعت در پیچ نشان داد که می‌توان ارتفاع ۰/۴ از بستر را برای مکان بیشینه سرعت در نظر گرفت. ویژگی مهم دیگر نیمرخ سرعت در پیچ، مسطح بودن آن است.



شکل ۵- نمونه‌هایی از نیمرخ‌های سرعت طولی در طول پیچ برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه

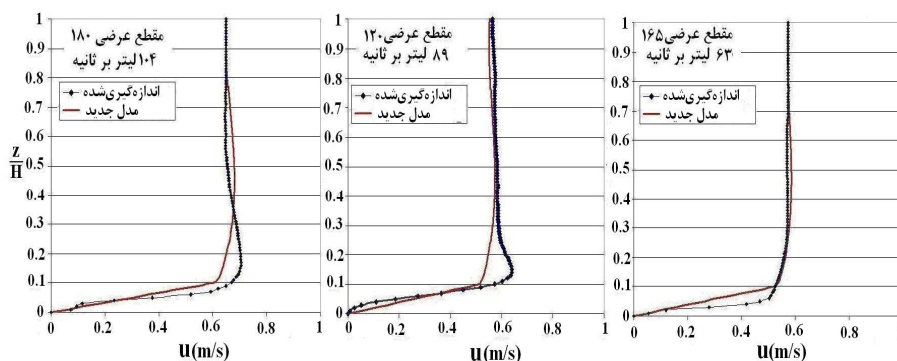
برای قرارگیری سرعت بیشینه در حدود ۰/۴ انتخاب شده است.

شکل ۸، نیمرخ‌های سرعت مشاهده شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم توانایی مدل‌های پیشین در پیش‌بینی صحیح است، درحالی‌که مدل جدید مطابقت مناسبی را با سرعت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین، مدل‌های پیشین به استثنای مدل روزوفسکی تا حدودی با یکدیگر انطباق دارند. دلیل این اختلاف، ثابت ماندن نیمرخ سرعت روزوفسکی در مقطع عرضی به دلیل عدم وجود سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، در این مدل است. در نتیجه با اینکه سرعت از دیواره داخلی به سمت خارجی افزایش می‌یابد، اما نیمرخ سرعت روزوفسکی در کل مقطع عرضی ثابت می‌ماند.



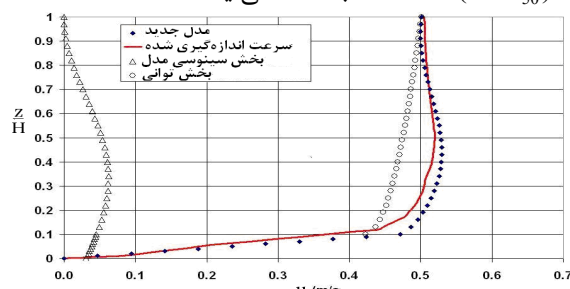
شکل ۸- نمونه‌ای از نیمرخ‌های سرعت مشاهده شده و پیش‌بینی شده در دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه

شکل ۹، سه نمونه از نیمرخ‌های پیش‌بینی شده مدل را نشان می‌دهد. در این شکل، نیمرخ‌های پیش‌بینی شده دو ویژگی مسطح بودن نیمرخ‌های سرعت در پیچ و وجود بیشینه سرعت در نزدیک کف را به خوبی نشان می‌دهند.



شکل ۹- نیمرخ‌های سرعت طولی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای ۳ دبی آزمایش

که در آن: $\bar{u}$ سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، $\bar{U}$ سرعت متوسط مقطع عرضی و $\frac{\bar{u}_*}{C} = \frac{\sqrt{g}}{C}$ است که C ضریب شزی متوسط مقطع عرضی است و از رابطه $C = 21.1(R/d_{50})^{1/6}$ به دست می‌آید.



شکل ۷- سرعت طولی در مقطع عرضی ۶۰ درجه برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه

مدل جدید برای سطح آب تا ۰/۱ عمق جریان از کف کاربرد دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نیمرخ سرعت طولی در حدود ۰/۱ عمق جریان از کف تا بستر، تقریباً به صورت خطی است. بنابراین، بخش توانی تا ۰/۱ عمق جریان کاربرد دارد و بین ۰/۱ عمق تا بستر، نیمرخ سرعت به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که عدد ۰/۱ در بخش توانی مدل که از عمق بدون بعد کم شده، برای عدم وجود شکستگی بین مدل جدید و بخش خطی سرعت در عمق ۰/۱ می‌باشد و در صورتی‌که این عدد در مدل وجود نداشته باشد ضریب ۰/۹ بخش توانی و دیگر ضرایب موجود در مدل، براساس وجود حداقل خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده انتخاب شده است. عدد $\frac{3\pi}{4}$ نیز

مدل‌های پیشین، مدل کیکاوا است که خطای آن بسیار بیشتر از مدل جدید است.

جدول ۲ مقادیر پارامتر خطای استاندارد را برای مدل‌ها نشان می‌دهد. مقادیر خطای متوسط مدل جدید، نشان‌دهنده پیش‌بینی مناسب آن است. بهترین مدل از

جدول ۲- مقادیر پارامتر خطای استاندارد در خط مرکزی (۱) و ساحل خارجی (۲) (برحسب درصد)

مقطع (درجه)	روزوسکی		بریج		کیکاوا		پارکر		مدل جدید	
	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$104 [ls^{-1}]$	$89 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$	$63 [ls^{-1}]$
	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)
۳۰	۳۰	۱۱	۲۵	۱۰	۲۵	۹	۲۸	۱۴	۶	۶
۶۰	۲۶	۲۸	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۲	۲۸	۶	۱۰
۷۰	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۸۰	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۹۰	۳۱	۴۰	۲۵	۱۸	۲۵	۱۸	۲۳	۲۰	۷	۶
۱۰۰	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۱۱۰	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۱۲۰	۱۷	۱۷	۱۵	۱۷	۱۵	۱۷	۱۹	۲۱	۷	۶
۱۳۵	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۱۵۰	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۱۶۵	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
۱۸۰	۳۰	۲۷	۱۳	۱۶	۱۵	۱۶	۱۵	۲۰	۶	۷
۱۹۳	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
متوسط	۲۷	۲۴/۸	۲۱	۱۷	۲۱	۱۶/۹	۲۱/۷	۲۱	۷	۷

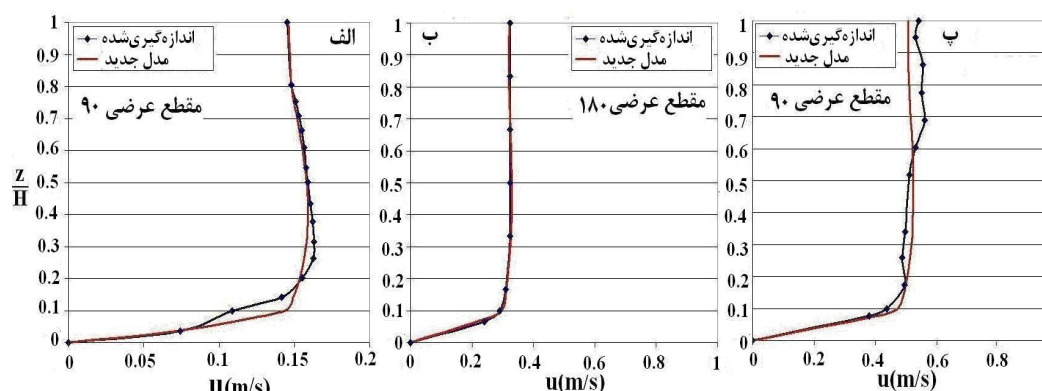
سه نمونه از نیمرخ‌های سرعت از این داده‌ها در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مدل توانسته پیش‌بینی‌های مناسبی را داشته باشد. به‌هرحال، بررسی کاربرد مدل در ۴ پیچ با نسبت شعاع انحنا به عرض متفاوت نشان از قابلیت کاربرد آن در پیچ‌های مختلف دارد.

جدول ۳- مقادیر پارامتر خطای استاندارد برای مدل جدید

براساس سه سری داده (برحسب درصد)					
داده رودخانه		داده عبد شریف		داده رودخانه دسنا	
مقطع عرضی	خطا	مقطع عرضی	خطا	مقطع عرضی	خطا
۹	۶۰	۷	۶۵	۷	۳۰

به‌هرحال، برای اطمینان از کاربرد مدل در پیچ‌های مختلف، کاربرد مدل با داده‌های دیگر بررسی شد که عبارتند از سری اول آزمایش‌های عبدشریف (۱۳۸۵) در کانال مستطیلی با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، عرض ۱ متر با کف بتنی و نسبت R/B برابر با ۳/۵، سری دوم آزمایش‌های USSR (روزوفسکی، ۱۹۵۷) در کانالی مستطیلی با دبی ۱۲/۳ لیتر بر ثانیه، عرض ۰/۸ متر با کف ثابت و صاف، با نسبت R/B برابر با ۱ و سری سوم آزمایشات رودخانه دسنا (روزوفسکی، ۱۹۵۷). جدول ۳، میزان خطای استاندارد مدل را با داده‌های این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیانگر خطای کم مدل جدید در پیچ‌های مذکور است.

۹/۳	متوسط	۵/۸	متوسط	۶/۳	متوسط	۱۸۰	۷	۶۰	۶	۱۰۰	۶	۱۴۵	۶	۹۰	۸	۱۰	۱۵۰	۶	۱۸۰	۴	۱۸۰	۵	۱۲۰	۶	۱۵۰
-----	-------	-----	-------	-----	-------	-----	---	----	---	-----	---	-----	---	----	---	----	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----



شکل ۱۰- نیمرخ‌های سرعت طولی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های الف) عبد شریف (۱۳۸۵)، ب) USSR (روزوفسکی، ۱۹۵۷) و پ) رودخانه دسنا (روزوفسکی، ۱۹۵۷)

این تحقیق در دانشگاه EPFL لوزان انجام شده است. بدین‌وسیله از دکتر اشلیس و دکتر بلانکارت برای در اختیار قرار دادن ابزار آزمایشگاهی و همچنین از قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی به‌خاطر کمک‌های مالی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- ۱- عبدشریف م. ۱۳۸۵. بررسی توزیع سرعت‌های طولی و عرضی در مجاری روباز انحناءدار با بستر و دیواره‌های صلب. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه تهران. ۱۴۵ ص.
- 2- Anwar H. 1986. Turbulent structure in a river bend. J. Hydr. Eng. ASCE 112(8):657-669.
- 3- Bathurst J. Thorne R. and Hey D. 1979. Secondary flow and shear stress at river bends. J. of Hyd. Division. ASCE, 105 (10): 1277-1294.
- 4- Blanckaert K. 2002. Flow and Turbulence in Sharp Open channel Bends. Thesis. École Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.
- 5- Blanckaert K. 2009. Meander dynamics: hydrodynamic processes in sharply curved meander bends. (Submitted to Journal of Geophysical Research – Earth Surface).
- 6- Bridge J.S. 1992. A revised model for water flow, sediment transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends. Water Resour. Res. 28(4):999-1013.

نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مهم در شناخت جریان در قوس رودخانه‌ها، سرعت طولی است. در این تحقیق به بررسی سرعت‌های طولی در پیچ پرداخته شده است و مدل جدیدی برای پیش‌بینی آن ارائه شده است. برای ارائه مدل، آزمایشاتی بر روی یک پیچ با شعاع ۱/۷ متر و عرض ۱/۳ متر انجام شد. با برقراری دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه بر روی رسوبات، توپوگرافی کف توسعه یافته ایجاد شد و سپس بستر با موادی ویژه منجمد شد. دبی‌های ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه نیز اجرا شد و اندازه‌گیری‌های سرعت بوسیله دستگاه ADVP انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که مدل جدید، برخلاف مدل‌های پیشین می‌تواند ویژگی‌های سرعت طولی در پیچ را پیش‌بینی کند. همچنین، به‌وسیله پارامتر خطای استاندارد، مدل‌ها مقایسه شدند و نشان داده شد که مدل جدید، پیش‌بینی مناسب‌تری نسبت به مدل‌های پیشین دارد. برای اطمینان از کاربرد مدل در دیگر پیچ‌های تند، این مدل با ۳ سری داده دیگر بررسی شد که جواب‌های بسیار مناسبی را ارائه داد و مشخص شد که این مدل در پیچ‌های مختلف کاربرد دارد.

سپاسگزاری

- 12- Kikkawa H. Ikeda S. and Kitagawa A. 1976. Flow and bed topography in curved open channels. J. Hydr. Div. ASCE 102(9):1327-1342.
- 13- Odgaard A.J. and Bergs M.A. 1988. Flow processes in a curved alluvial channel. Water Resour. Res., 24(1):45-56.
- 14- Rozovskii I.L. 1957. Flow of Water in Bends of Open Channels. Kiev. Ukraine.
- 15- Ruther N. and Olsen N.R. 2005. 3D modeling of sediment transport in a narrow 90° channel bend. J. Hydr. Eng. ASCE 131(10):917- 920.
- 16- Shimizu Y. and Itakura T. 1989. Calculation of bed variation in alluvial channels. J. Hyd. Div. 115(3):367-384.
- 17- Zimmerman C. 1977. Roughness effect on the flow direction near curved stream beds. J. Hydraulic Research. 15(1):73 - 84.
- 7- De Vriend H.J. 1977. A mathematical model of steady flow in curved shallow channels. J. Hydr. Res. Delft, The Netherlands 15(1):37-54.
- 8- Hooke R.L. 1974. Shear Stress and Sediment Distribution in A Meander Bend. UNGI Rep. 30. Univ. of Uppsala. Sweden.
- 9- Johannesson H. and Parker G. 1989a. Secondary flow in mildly sinuous channel. J. Hydr. Engrg., ASCE 115(3), 289-308.
- 10- Johannesson H. and Parker G. 1989b. Velocity redistribution in meandering rivers. J. Hydr. Engrg., ASCE 115(8): 1019-1039.
- 11- Khosronejad A. Salehi Neyshabouri S.A. and Townsend R.D. 2007. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends. J. Hydr. Engrg. ASCE 133(10):1123-1134.

