

مطالعه فیزیکی سرعت و تنش برشی جریان در کانال عریض با جداره ثابت

وحید حسن زاده وایقان^۱، میرعلی محمدی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.mohammadi@urmia.ac.ir

چکیده

خصوصیات هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های عریض، به دلیل وجود نسبت بالای عرض به عمق جریان، b/h ، شرایط متفاوت‌تری نسبت به کانال‌های کم عرض دارد. در این تحقیق، با استفاده از مدل فیزیکی یک کانال عریض با جداره ثابت به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۵ متر با نسبت عرض به عمق جریان ۱۲ الی ۵۶، مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در کانال‌های عریض، شامل رابطه دبی-عمق، توزیع‌های سرعت و تنش برشی جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سرعت حداکثر در کانال‌های عریض در نزدیکی سطح جریان رخ می‌دهد. از بررسی توزیع قائم سرعت جریان آشکار می‌شود که این توزیع از قانون معروف لگاریتمی پیروی می‌کند. همچنین نتایج حاصل بیان می‌کند که تنش برشی حداکثر در محور میانی کانال عریض بوجود می‌آید و با افزایش نسبت عرض به عمق، b/h ، تنش برشی بی بعد افزایش می‌یابد. در b/h ‌های کمتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف کوچکتر از ۰/۹ و برای b/h ‌های بزرگتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف بزرگتر از ۰/۹ می‌باشد. مقایسه نتایج کانال‌های عریض و کانال‌های با عرض بهینه به نسبت $b/h=2$ گویای آن است که در کانال‌های کم عرض، رابطه بین نسبت b/h با تنش برشی به صورت خطی است ولی در کانال‌های عریض رابطه توانی بر آنها حاکم است. همچنین در کانال‌های عریض، درصد سهم نیروی برشی دیواره‌ها (SFW%) به دلیل عمق کم جریان کمتر از ۱۰ و ناچیز بوده و می‌توان برای منظوره‌های طراحی از سهم دیواره‌ها در تنش برشی صرف‌نظر نمود.

واژه‌های کلیدی: کانال عریض، مدل فیزیکی، جداره ثابت، دبی-عمق، توزیع سرعت، تنش برشی

Physical Study of Flow Velocity and Shear Stress in a Wide Rigid Boundary Channel

V Hasanzadeh Vayghan¹, M Mohammadi^{*2}

Received:

Accepted:

¹ PhD Student in Civil Eng., Water & Hydraulic Structures, Department of Civil Eng., Faculty of Eng., Urmia University, Urmia, Iran

² Associate Prof. in Civil Eng., Hydraulics & River Eng. Mechanics, Department of Civil Eng., Faculty of Eng., Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding Author, e-mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir

Abstract

Hydraulic characteristics of wide channels differ from narrow channels due to the higher ratios of width to depth, b/h . In this research, using a physical model of a rigid boundary channel having 60m length, 1.5m width and a bed slope of 0.001 with b/h ratio of 12 to 56, hydraulic characteristics of wide channels including: stage-discharge relationship, velocity and shear stress distributions were experimentally considered. The results indicate that the maximum velocity in the wide channel was occurred nearby the water surface. Investigation of the vertical velocity distribution reveals that the flow velocity follows the well-known logarithm distribution law. The also results show that the shear stress was maximized in the centerline of channel section, and the dimensionless shear stress was increased by increasing the ratio of b/h . In ratios of b/h less than 30, the dimensionless bed shear stress value is less than 0.9 and in case of b/h greater than 30, it is greater than 0.9. A comparison of the results for wide channels and channels with an optimal width of $b/h=2$, reveals that the relationship between b/h and shear stress in narrow channels is linear, while in wide channels a power relationship is governing. Moreover, in wide channel sections, the percentage of shear force on the walls (%SFW), due to the low depth of flow which is less than 10 and negligible, so that to contribute the walls to the shear stress can be ignored for design purposes.

Keywords: Wide channel, Physical model, Rigid boundary, Stage-discharge, Velocity distribution, Shear stress

مقدمه

گرفته است عبارتند از نمودار دبی- عمق، توزیع سرعت و تنش برشی جریان. شناخت این مشخصات نیازمند انجام تحقیقات میدانی و بهره گیری از تکنیک های مدل سازی فیزیکی و عددی است. در این تحقیق سعی شده است با ساخت مدل فیزیکی یک کانال مستطیلی بتنی عریض با اشل مناسب و به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۵ متر و جریان های با نسبت عرض به عمق ۱۲ الی ۵۶ در آزمایشگاه صحرایی، توزیع سرعت و تنش برشی جریان بررسی و روابط و ضرایب تجربی با استفاده از اندازه گیری ها در مدل فیزیکی ارائه شود. مزیت این مدل نسبت به سایر تحقیقات انجام یافته عبارت است از: ۱- کاهش اثرات اشل در نتایج بدست آمده به دلیل بزرگ بودن کانال مدل فیزیکی ۲- ایجاد جریان های با نسبت

تحلیل جریان در کانال ها و رودخانه های عریض جهت برنامه ریزی و طراحی در پروژه های انتقال آب امری اجتناب ناپذیر است. به لحاظ تاثیر لزجت، وجود جداره ها و توزیع زبری مختلف در آنها و همچنین نامنظمی مقاطع جریان، مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال ها پیچیده بوده و به دست آوردن روابط کلی به سادگی میسر نیست. کانال ها و رودخانه های عریض به جهت داشتن نسبت "عرض به عمق، b/h " زیاد، خصوصیات هیدرولیکی جریان متفاوتی نسبت به کانال های روباز معمول، دارند و بدین جهت نیاز است که آن مشخصات به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرند. برخی از این مشخصات که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار

غالب است و ۲- قانون لایه برونی یا قانون کاهش سرعت بیان می‌شود (ین، ۲۰۰۲). نواحی جریان مربوط به قانون لایه های داخلی و برونی کاملاً از هم جدا نبوده بلکه یک ناحیه همپوشانی بین حد پایینی لایه قانون برونی و حد بالایی لایه قانون داخلی وجود دارد. در ناحیه همپوشانی هر دو معادله قانون داخلی و برونی می‌توانند به کار گرفته شوند. ثابت شده است که تابع لگاریتمی زیر هر دو معادله فوق را به طور همزمان ارضاء می‌نماید.

$$\frac{u}{u_*} = C_1 \log y^* + C_2 \quad [۳]$$

در آن C_1 و C_2 برای کانال داده شده مقادیر ثابتی هستند. توابع دیگری شبیه این رابطه وجود دارند که می‌توانند تشابه سازی قوانین داخلی و برونی را به خوبی ارائه نمایند از جمله قانون توزیع توانی (چن، ۱۹۹۱) به صورت زیر است:

$$\frac{u}{u_*} = C_3 (y^*)^m \quad [۴]$$

در آن C_3 مقدار ثابتی است. توان m معمولاً مابین $1/12$ و $1/4$ برای مرزهای مختلف است. اندازه گیری مستقیم تنش برشی دیوار مشکل می‌باشد. تنش موضعی نقطه‌ای معمولاً با استفاده از u_* محاسبه می‌شود که آن نیز بوسیله اندازه‌گیری توزیع سرعت و بر اساس روابط ۳ و ۴ یا وسایل اندازه‌گیری مانند لوله پرستون تعیین می‌شود. ناحیه قانون داخلی، پایین منطقه همپوشانی، معمولاً نازک بوده و اندازه‌گیری سرعت در آن مشکل می‌باشد مخصوصاً زمانی که زبری بستر بزرگ باشد. لذا معمولاً در ناحیه همپوشانی توزیع سرعت با کمک توزیع لگاریتمی داخلی (رابطه ۳)، بدست می‌آید. برای بررسی سرعت جریان در مجاری، معمولاً قانون عمومی توزیع لگاریتمی سرعت واقعی سیال استفاده می‌شود. محمدی (۱۳۹۳) رابطه بین سرعت متوسط بدون بعد (U/u_*) و ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ f را به صورت زیر بیان نمود:

عرض به عمق بسیار بالا (کانال بسیار عریض) و بررسی نتایج مربوط به آنها. رابطه دبی-عمق یک نوع معادله مقاومت در مقابل جریان است که برای تعیین عمق یا شعاع هیدرولیکی در صورتی که دبی، شکل کانال، شیب، خصوصیات مواد بستر و درجه حرارت مشخص باشد به کار می‌رود (وایت و همکاران ۲۰۰۵). جوز رامون و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نتایج اندازه گیری‌های میدانی برای رودخانه اگزو واقع در کشور برزیل که دارای مصالح بستر ماسه‌ای با $d_{50}=0.77$ میلی‌متر می‌باشد نمودار دبی-عمق را با رابطه زیر ارائه نمودند.

$$Q = 1.6965 h^{2.734} \quad [۱]$$

که در آن h بر حسب متر و Q بر حسب مترمکب بر ثانیه می‌باشد. محمدی و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی به بررسی مقاومت جریان و رابطه دبی-عمق در کانال‌های مثلثی پرداختند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی در کانال مثلثی شکل با شیب کف 0.01 و زاویه رأس 45 درجه، رابطه دبی-عمق به صورت رابطه ۲ (بر حسب میلیمتر و Q بر حسب لیتر بر ثانیه) می‌باشد.

$$h = 99.933 Q^{0.3346} \quad [۲]$$

گرادیان سرعت در ارتفاع مقطع و در نزدیکی جداره رابطه مستقیمی با تنش برشی پیرامون جداره کانال دارد، بنابراین بدست آوردن مقادیر تنش‌های برشی نیازمند شناخت دقیق ساختار جریان، نوع زبری و الگوهای توزیع سرعت در مقاطع مختلف دارد. این امر به دلیل پیچیدگی‌های خاص در محاسبه میدان سرعت و همچنین الگوهای توزیع سرعت در مقطع و همچنین اثر توام سلول‌های جریان ثانویه و تنش‌های رینولدزی بسیار مشکل می‌باشد (تامیناگا و همکاران، ۱۹۸۹). مطابق تئوری لایه مرزی، توزیع سرعت u در امتداد نرمال دیواره y با کمک دو قانون فراگیر: ۱- قانون لایه داخلی یا قانون دیواره در محل‌هایی که اثر ویسکوزیته

(۲۰۰۵) توزیع سرعت جریان u در مسیر اصلی جریان (محور x) برای کانال های عریض و تنگ را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنان گویای آن است که بیشینه سرعت جریان در کانال های عریض، در سطح جریان ایجاد می شود. گائو و ژولین (۲۰۰۸) و یانگ و همکاران (۲۰۰۵) قوانین متفاوتی برای توزیع سرعت آشفته جریان در بستریهای صاف و زبر ارائه نمودند. پو (۲۰۱۳) با کمک معادلات ناویه-استوکس، پروفیل سرعت استنتاجی را برای هر دو جریان صاف و زبر در کانال های باز بدست آوردند که جزئیات بدست آمده از آن در مقایسه با نتایج محققین دیگر، گویای توانایی خوب این روش برای جریان با هر نوع زبری بستر بود. برای مقطع عرضی مستطیلی بسیار بزرگ، با بستر زبر تابع لگاریتمی سرعت به صورت زیر می باشد (یلنگ و همکاران، ۲۰۰۵):

$$\frac{u}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s} \quad [۶]$$

تنش برشی پیرامون جداره رابطه مستقیم با گرادیان سرعت در ارتفاع مقطع در نزدیکی جداره کانال دارد، بنابراین بدست آوردن مقادیر تنش های برشی نیازمند شناخت دقیق ساختار جریان، نوع زبری و الگوهای توزیع سرعت در مقاطع مختلف دارد. این امر به دلیل پیچیدگی های خاص در محاسبه میدان سرعت و الگوهای توزیع سرعت مقطع و همچنین اثر توام جریانات ثانویه و تنش های رینولدز بسیار مشکل است. مطالعات آزمایشگاهی متعددی در خصوص تنش برشی انجام گرفته است که می توان به کارهای گوش و روی (۱۹۷۰)، مایر (۱۹۷۸)، نایت و مکدونالد (۱۹۷۹)، نوتسوپوالوس و حاجی پانوس (۱۹۸۲)، نایت و همکاران (۱۹۸۴)، محمدی و نایت (۲۰۰۴) اشاره نمود. نایت و همکاران مجموعه کاملی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی در خصوص تأثیر دیواره های جانبی کانال در تنش برشی برای نسبت های مختلف عرض به عمق جریان (b/h) را جمع آوری نمودند. آذان با این اطلاعات چند

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{g}{f}} \quad [۵]$$

بر اساس نتایج مشخص می شود که توزیع (عمومی) سرعت برای جریان آشفته زبر با به کارگیری مفهوم طول اختلاط حاصل می گردد. کیرونوتو و گراف (۱۹۹۴) توزیع سرعت برای جریان یکنواخت با بستر زبر را در یک مدل آزمایشگاهی بدست آوردند. آزمایش های ایشان در فلومی به طول ۱۶ متر و عرض ۰/۸ متر انجام گرفت. بر اساس نتایج توزیع سرعت مشخص گردید که برای جریان های با نسبت عرض به عمق بزرگتر از ۵، سرعت حداکثر در سطح جریان و برای جریان های با نسبت عرض به عمق کوچکتر از ۵، سرعت حداکثر در زیر سطح جریان ایجاد می شود.

دولگوپلوا (۲۰۰۱) با استفاده از ضریب اصطکاک بدون بعد f در رابطه دارسی-وایسباخ، به بررسی مقاومت جریان در رودخانه های عریض پرداخت. وی با ارائه ضریب شکل مقطع (m) ، مقدار نظری آن را برای رودخانه های عریض، عدد ۲ بدست آورد و با نتایج حاصل از بررسی های میدانی مربوط به بعضی از رودخانه های روسیه مقایسه نمود. نتایج دولگوپلوا تصدیق کننده امکان استفاده از ضریب $m=2$ برای کانال های عریض-تخت می باشد. دولگوپلوا (۲۰۰۱) برای جریان هایی که $b/h \ll 1$ است از رابطه $f = 0.32 m^2$ استفاده نمود و برای بررسی آن، ضریب اصطکاک را در چند رودخانه عریض محاسبه کرد. نتایج تحقیق دولگوپلوا گویای آن است که در رودخانه های تحت مطالعه، نسبت b/h بیش از ۳۳ می باشد و لذا می توان m را برابر ۲ در نظر گرفت. محمدی (۲۰۰۵) و $a, b, 2002$ و 1997) تأثیر شکل مقطع کانال بر روی مقاومت جریان در کانال های مستطیلی با کف V شکل و سایر مقاطع را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که شکل مقطع کانال سبب تغییر در ضریب زبری n مانینگ می شود و همچنین بر روی مقادیر توزیع سرعت و تنش برشی جریان نیز اثر می گذارد. گائو و ژولین

رابطه تجربی را پیشنهاد نمودند که در مطالعه جریان کانال باز و حمل رسوب در آن بسیار مفید می‌باشند. در مطالعات مربوط به توزیع تنش‌های برشی در مقاطع مستطیلی با جداره صاف، کراف (۱۹۶۵) با انجام آزمایشات مختلف به افزایش تنش‌های برشی بی بعد بستر با افزایش نسبت عرض به عمق، b/h ، اشاره نمود و اهمیت نسبت عرض به عمق را در توزیع تنش‌های برشی بیان داشت. گائو و ژولین (۲۰۰۵) به منظور بررسی تنش برشی در کانال‌های مستطیلی ابتدا با استفاده از تحلیل تئوریک و با استفاده از روابط پیوستگی و مومنتم، روابطی برای تنش برشی ارائه نمودند. بر اساس نتایج گائو و ژولین (۲۰۰۵)، پارامترهای موثر در توزیع تنش برشی علاوه بر موارد ذکر شده، شامل شکل و نسبت عرض به عمق مقطع رودخانه (b/h) نیز می‌باشند. برای $b/h=2$ (کانال کم عرض)، نتایج تحقیقات برخی از محققین نشان داده است که میانگین تنش برشی بستر $\bar{\tau}_b$ تقریباً برابر میانگین تنش برشی دیواره $\bar{\tau}_w$ است (نایت و همکاران ۱۹۸۴). بنابراین وقتی $b/h \rightarrow \infty$ (کانال عریض) است، و خواهیم داشت:

آزمایشگاهی کاربرد دارد. انیشتین ناحیه سطح مقطع جریان را به دو ناحیه A_w و A_b تقسیم بندی نمود به گونه ای که خط چین موجود در شکل نشان دهنده مرز توزیع تنش برشی دیواره و کف کانال مستطیلی می‌باشد. برای بدست آوردن این خط چین، معادله‌هایی توسط انیشتین ارائه شد. محمدی (۱۳۸۸) با ارائه روابط تحلیلی و تجربی سعی در ارائه روابطی برای تعیین چگونگی توزیع تنش برشی‌های برشی در مقاطع مستطیلی و دایروی نمودند. جاوید و محمدی (۲۰۱۲) با ارائه روابط تحلیلی برای توزیع تنش‌های برشی متوسط در کانال‌های نوزنقه‌ای با شیب دیواره ۱:۱ پرداخته و بعدها روش مذکور را برای مقاطع مستطیلی و نوزنقه‌ای با شیب دیواره‌های مختلف بسط دادند. همچنین محمدی (۱۹۹۸) با انجام آزمایشاتی بر روی مقاطع مستطیل با کف V شکل به بررسی تاثیر جریانانات ثانویه و تاثیر شکل این‌گونه مقاطع بر روی نحوه توزیع تنش برشی و میدان سرعت جریان پرداختند. روشنی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی با تغییر دبی، شیب و عمق جریان به بررسی تأثیر فرم بستر ریپل بر روی تنش برشی جریان پرداختند و با بررسی روند تغییرات تنش برشی ناشی از فرم بستر نسبت به ارتفاع فرم بستر، مشخص کردند که با افزایش ۴۵ درصدی ارتفاع فرم بستر، به‌میزان تنش برشی ناشی از ریپل‌ها، ۵۸ درصد اضافه می‌شود. حسن زاده و محمدی (۲۰۱۶) موضوع مقاومت جریان در رودخانه‌ها و کانال‌های عریض را با بهره‌گیری از روش‌های عددی مورد مطالعه قرار دادند که تحقیق حاضر نیز در تکمیل آن برنامه‌ریزی و انجام شده است. در یک تحقیق اخیر، جاوید و همکاران (۲۰۱۹ و ۲۰۱۸) آزمایش‌های جامعی را در خصوص کانال‌های مستطیلی با کف و دیواره‌های زبر انجام دادند و تاثیر زبری‌های گوناگون در مشخصه‌های هیدرولیکی جریان از جمله سرعت و تنش برشی جریان را بدست آوردند. روشنگر و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش هوش مصنوعی

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h S} = 0.61 \quad [7]$$

نایت و همکاران (۱۹۸۴) با استفاده از نتایج آزمایش‌های مربوط به کانال مستطیلی با بستر و دیواره‌های صاف، روابط تنش برشی میانگین کف و دیواره را ارائه نمودند. معادله تجربی آنها بر اساس اصل بقا انرژی در محدوده $0.3 < b/h < 15$ برای درصد نیروی برشی کل دیواره در واحد طول کانال ($\%SF_w$) به صورت رابطه ۸ است.

$$\%SF_w = EXP \left[-3.23 \times \log\left(\frac{b}{h}\right) + 3 \right] + 6.146 \quad [8]$$

انیشتین (۱۹۴۲) روش جداسازی شعاع هیدرولیکی ارائه نمود که تاکنون نیز در کارهای مهندسی و کارهای



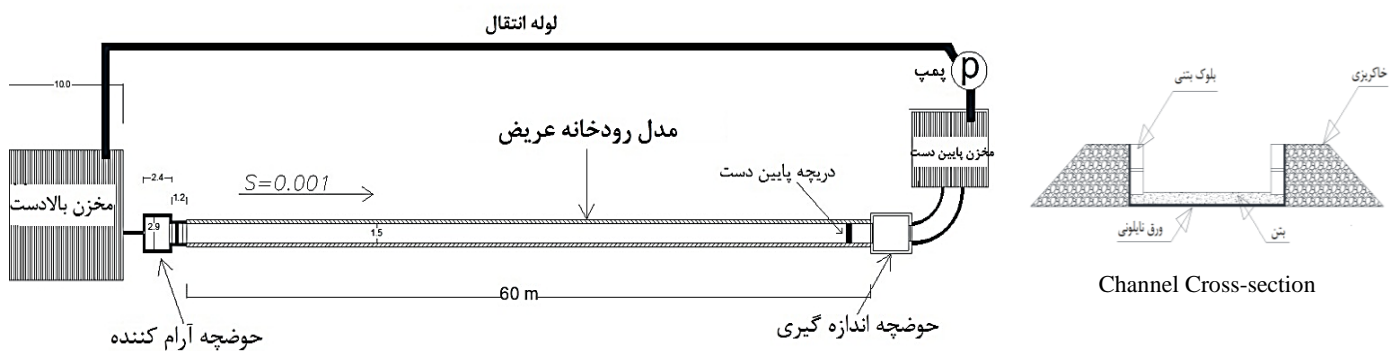
شکل ۱- مدل هیدرولیکی صحرایی کانال عریض

اجزای مدل فیزیکی کانال عریض مطابق شکل ۲ و شامل: ۱- مخزن آب بالادست، ۲- حوضچه آرام کننده، ۳- کانال عریض اندازه‌گیری آزمایشگاهی، ۴- حوضچه اندازه‌گیری دبی جریان، ۵- مخزن آب پایین دست، ۶- دستگاه پمپ و ۷- سیستم لوله انتقال آب به بالادست می‌باشد.

"ماشین بردار پشتیبان"، مقادیر ضریب زبری جریان در بستر فرسایش‌پذیر با شکل بستر تلماسه را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج حاصله نشان داد که روش مذکور دارای دقت قابل قبولی در تخمین ضریب زبری جریان بوده و عدد رینولدز جریان بیشترین اهمیت را در تخمین ضریب زبری جریان در بسترهای فرسایش‌پذیر دارد.

مواد و روش‌ها

کانال عریض مورد مطالعه در این تحقیق در آزمایشگاه صحرایی و در زمینی به وسعت یک هکتار در شهر وایقان از توابع شهرستان شبستر ایجاد گردید. مدل فیزیکی کانال عریض به صورت مستقیم و بطول ۶۰ متر با مقطع مستطیلی و عرض ۱/۵ متر و با شیب طولی بستر یک در هزار (۰/۰۰۱) و با بستر بتنی و دیواره‌های سیمان‌کاری شده طراحی و احداث گردید (شکل ۱).



شکل ۲- پلان جانمایی و مقطع عرضی مدل رودخانه/ کانال (ابعاد بر حسب متر).

کاری اجزاء مدل با استفاده از یک لایه ضخیم انجام گرفت. سیستم پمپاژ برای برقراری جریان گردشی در مدل و انتقال آب از استخر ذخیره پایین دست به مخزن بالادست، ایجاد گردید. پمپ مورد استفاده از نوع سانتریفیوژ مدل ۱۵۰-۲۰۰ ساخت شرکت پمپیران- تبریز با حداکثر دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه است. این پمپ با الکتروموتور ۱۵ کیلو وات کوپل گردیده و بر روی

به منظور تنظیم عمق جریان در مدل و ایجاد جریان یکنواخت، در پایین دست کانال از دریچه‌ی فولادی خوابان به عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۴ متر استفاده گردید (شکل ۳-الف). حوضچه‌ی اندازه‌گیری دبی به ابعاد $1/9 * 1/85$ با عمق ۱ متر احداث و در انتهای آن سرریز تیغه‌ای مستطیلی تعبیه گردید (شکل ۳-ب). به منظور جلوگیری از هدر رفت و نفوذ آب به خاک، عایق

خروجی از کانال با استفاده از حوضچه آرام کننده و سرریز مستطیلی کالیبره شده در انتهای حوضچه، مورد اندازه گیری قرار گرفت. تراز سطح آب روی تاج سرریز مستطیلی توسط ارتفاع سنج نقطه‌ای با دقت ± 1 میلی متر اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در کانال از میکرومولینه ساخت شرکت *armfild* انگلستان استفاده گردید. برای محاسبه u^* ، پروفیل توزیع لگاریتمی سرعت در هر مقطع رسم و شیب پروفیل محاسبه می‌گردد. سپس با جاگذاری آن در رابطه ۹ مقدار سرعت برشی بدست می‌آید (نیزو و رودی، ۱۹۸۶).

$$U_* = \frac{Mk}{2.303} \quad [9]$$

در رابطه ۹، M برابر شیب پروفیل توزیع لگاریتمی سرعت مقطع و k عدد فون کارمن که برابر 0.41 است. با مشخص شدن مقدار سرعت برشی u^* ، می‌توان مقدار تنش برشی τ را از رابطه ۱۰ بدست آورد.

$$\tau = \rho u_*^2 \quad [10]$$

شاسی مربوطه نصب گردید (شکل ۱-الف) که از لوله ۸ اینچی (قطر ۲۰۰ میلی‌متر پلی اتیلنی) به طول ۶۸ متر برای لوله رانش پمپ و لوله ۸ اینچ ۶ بار برای لوله مکش پمپ استفاده گردید. دبی‌های جریان ۵ الی ۷۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد که با گام‌های ۵ لیتر بر ثانیه در مدل جاری می‌گردید. برای دائمی شدن جریان بازگشتی، اندازه‌گیری‌ها پس از حدود ۱ ساعت زمان از شروع پمپاژ انجام می‌گرفت. در اولین گام آزمایش، به منظور تعیین رابطه دبی-عمق کانال عریض، برای هر یک از دبی‌ها، ۴ عمق متفاوت با کمک دریاچه پایین دست (*tailgate*) ایجاد گردید و در هر یک از آنها، پروفیل سطح جریان با استفاده از سطح‌سنج نقطه‌ای برداشت شد. اندازه‌گیری‌ها در ۳ خط چپ، راست و وسط و به فواصل ۲ متری در طول کانال انجام گرفت. در مرحله بعدی، با استفاده از نتایج رابطه دبی-عمق و آگاهی از عمق یکنواخت برای هر دبی، سرعت با استفاده از سرعت‌سنج نقطه‌ای (میکرومولینه) در ۳ مقطع از طول کانال (در فواصل ۱۵ و ۲۵ و ۴۵ متر از ابتدای کانال) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پروفیل جریان در کانال با کمک یک سطح‌سنج چرخ دار و با دقت ± 1 میلی متر (شرکت آداک ایرانیان) اندازه‌گیری شد. دبی جریان



شکل ۳- الف: سرریز مستطیلی و دریاچه تنظیمی (*tailgate*) ب- حوضچه اندازه‌گیری و استخر پایین‌دست ج: مخزن بالادست.

سرریز انتهایی ۵ سانتیمتری، پروفیل جریان مطابق نمودار شکل ۴ است.

نتایج و بحث

نمودار دبی-عمق : برای دبی‌های مختلف، پروفیل جریان در ارتفاع‌های مختلف از دریاچه پایین دست (*tailgate*)، اندازه‌گیری و ثبت گردید. برای ارتفاع

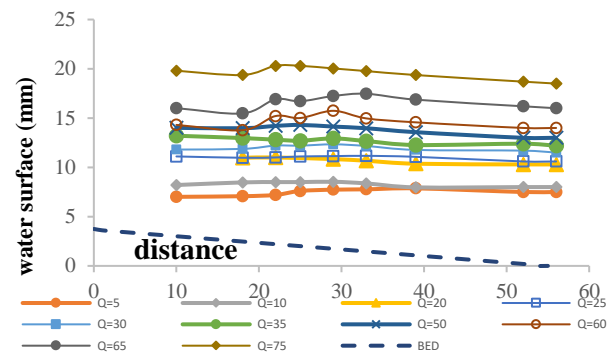
کانال عریض بتنی به صورت رابطه ۱۱ بدست آمده است.

[۱۱]

$$Q=0.0141 \times h^{1.738}$$

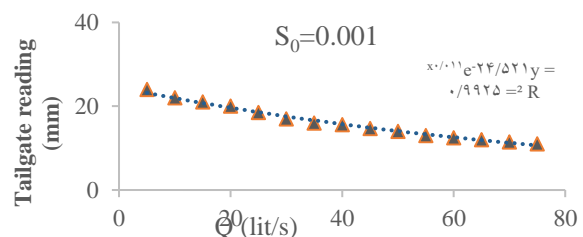
بر اساس نتایج حاصل برای عمق جریان، مشخص گردید که در تمام دبی‌ها، عمق‌های نرمال تشکیل شده به گونه‌ای است که نسبت عرض به عمق جریان بیشتر از ۱۲ بوده و لذا بر اساس طبقه‌بندی روسگن (۲۰۰۳)، این جریان‌ها جزو کانال‌های عریض می‌باشد. برای کنترل آشفتگی جریان از عدد رینولدز برشی استفاده می‌گردد. با توجه به سرعت میانگین و عمق نرمال اندازه‌گیری شده برای مدل کانال عریض، شعاع هیدرولیکی محاسبه شده و با جاگذاری آنها در فرمول سرعت برشی محاسبه می‌گردد. همچنین عدد رینولدز برشی با در نظر گرفتن $k_s=3$ میلی‌متر محاسبه گردید. در شکل ۶-الف نمودار سرعت و رینولدز برشی در مقابل عمق نرمال جریان در هر یک از دبی‌ها ترسیم شده است. با توجه به شکل ۶-الف مشخص می‌گردد که اعداد رینولدز برشی بدست آمده بزرگتر از ۱۰۰ می‌باشد و رابطه خطی با عمق جریان دارد و جریان در تمام دبی‌ها متلاطم است. اعداد فرود و رینولدز که نشان دهنده شرایط رژیم و نوع جریان هستند براساس پارامترهای اندازه‌گیری شده، برای دبی‌های مختلف در مدل کانال عریض محاسبه شده که مطابق نمودارهای شکل ۶-ب و ۶-ج می‌باشد. با توجه به شکل ۶-ب و ۶-ج مشخص می‌گردد که در کلیه دبی‌های مدل، رژیم جریان زیربحرانی - آشفته بوده است.

توزیع سرعت: برای مقایسه توزیع سرعت در کانال‌های عریض در دبی‌های مختلف، بر اساس برداشت‌های انجام گرفته نمودارهای سه بعدی سرعت در نیمه راست مقطع عرضی کانال ترسیم گردید. توزیع سرعت در دو دبی ۳۵ و ۶۵ لیتر برثانیه در سه ایستگاه اندازه‌گیری (در فواصل ۱۵ و ۲۵ و ۴۵ متر از ابتدای کانال) در شکل



شکل ۴- پروفیل جریان در کانال برای دبی‌های مختلف.

با توجه به نمودار شکل ۴ به طور طبیعی با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می‌یابد. این افزایش در دبی‌های پایین کمتر از دبی‌های بالا می‌باشد که احتمالاً ناشی از اثر توسعه لایه مرزی است. بر اساس پروفیل‌های جریان بدست آمده از آزمایش‌ها، نمودارهای شیب سطح جریان - عمق جریان در مقابل ارتفاع دریچه پایین دست (*tailgate*) برای تمامی دبی‌ها ترسیم و عمق یکنواخت برای آنها بدست آمد و نمودار دبی - عمق - دریچه پایین دست (*tailgate*) برای مدل کانال عریض ترسیم گردید (شکل ۵).



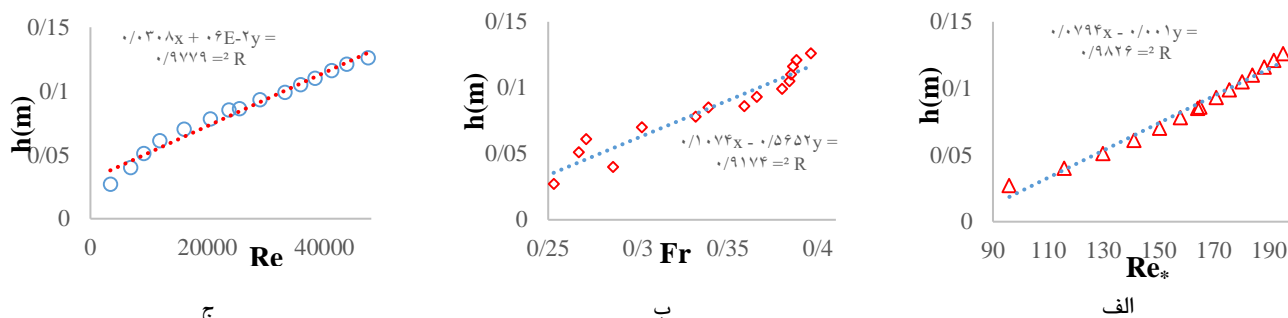
شکل ۵- نمودار دبی - عمق - دریچه پایین دست

(*tailgate*) برای مدل کانال عریض.

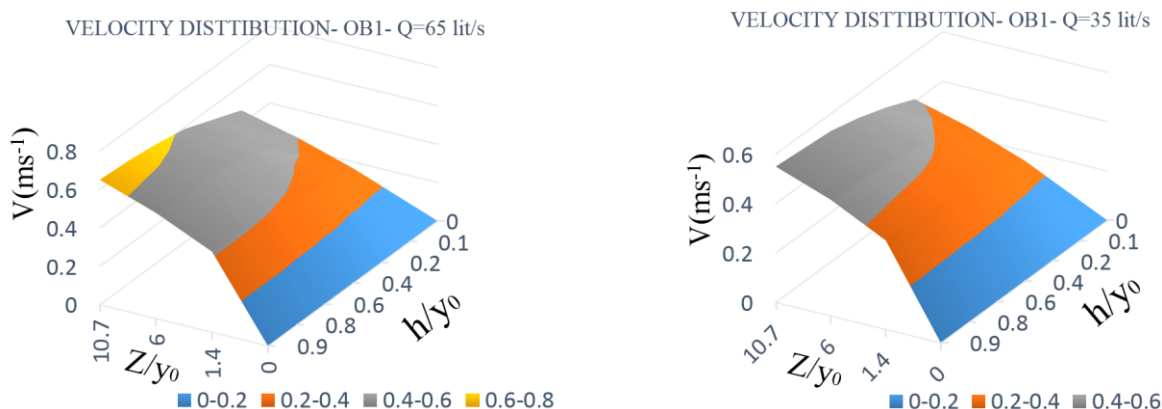
بر اساس نتایج نمودار دبی - عمق - دریچه پایین دست (*tailgate*) می‌توان اظهار نمود که با افزایش دبی، ارتفاع دریچه پایین دست (*tailgate*) در پایین دست برای ایجاد عمق نرمال، کاهش می‌یابد. همچنین رابطه رگرسیونی ارتفاع دریچه پایین دست (*tailgate*) و دبی جریان به صورت یک تابع نمایی است. بر اساس اعماق نرمال بدست آمده، رابطه توانی دبی - عمق برای مدل

گردد که سرعت بیشینه در نزدیکی سطح جریان و در وسط کانال ایجاد می‌گردد. نتایج آزمایش گویای آن است که توزیع سرعت در عرض کانال نسبت به مرکز کانال قرینه می‌باشد.

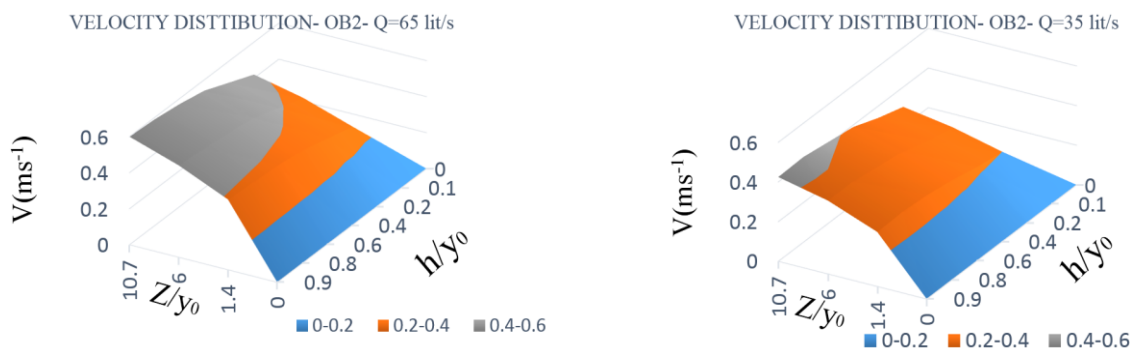
های ۷ و ۸ ارائه شده است. در شکل‌های مذکور V برآیند سرعت عمق و عرضی جریان برحسب متر بر ثانیه و h عمق از کف کانال و y_0 عمق حداکثر جریان و Z نشان دهنده فاصله از دیواره کانال (هر سه بر حسب متر) می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشخص می‌



شکل ۶- نمودار اعداد رینولدز برشی، فرود و رینولدز در مدل کانال عریض.



شکل ۷- مقایسه توزیع سرعت در ایستگاه اندازه گیری شماره ۱ در دو دبی ۳۵ و ۶۵ لیتر بر ثانیه.

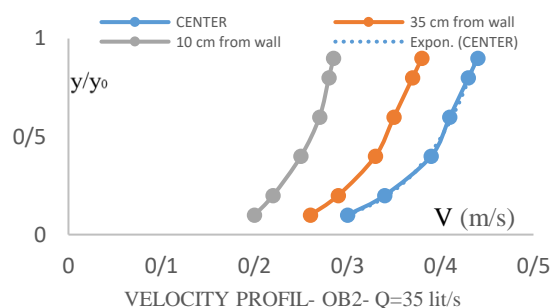
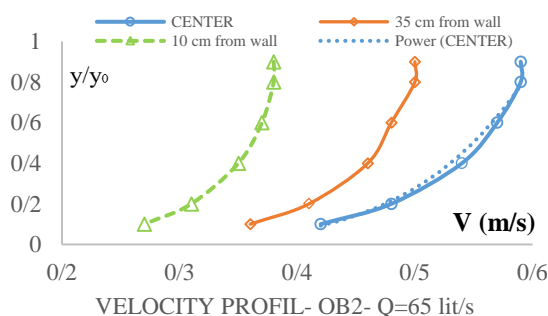


شکل ۸- مقایسه توزیع سرعت در ایستگاه اندازه گیری شماره ۲ در دو دبی ۳۵ و ۶۵ لیتر بر ثانیه.

تقریباً معادل عمق جریان می‌گردد و از جانبی تاثیر سلول‌های جریان ثانویه ضعیف تر شده و لذا توزیع معمول لگاریتمی سرعت حاکم می‌شود. در دبی‌های پایین‌تر که دارای نسبت عرض به عمق بیشتر هستند، سرعت در سطح و در ۰/۸ عمق برابر می‌باشد. توزیع لگاریتمی سرعت در کانال عریض برای دبی‌های مختلف در ایستگاه دوم اندازه گیری (OB2) به صورت جدول ۱ است و با استفاده از آن می‌توان سرعت نقطه‌ای جریان را بر اساس یک رابطه لگاریتمی محاسبه نمود. در هر یک از عمق‌های نرمال ایجاد شده مدل کانال عریض، سرعت میانگین در بازه میانی کانال مطابق نمودار شکل ۱۰ محاسبه گردید. سرعت متوسط برابر سرعت در عمق ۰/۶ از سطح جریان در نظر گرفته شده است.

در ایستگاه اول اندازه‌گیری (OB1) به دلیل ارتفاع کمتر جریان نسبت به ایستگاه شماره ۲ (بخش میانی کانال)، سرعت در سطح جریان بیشتر از ایستگاه شماره ۲ است. پروفیل قائم سرعت در ایستگاه شماره ۲ (OB2) در سه محور ۱۰ و ۳۵ و ۷۵ سانتیمتری از دیواره، برای دو دبی ۳۵ و ۶۵ لیتر در شکل ۹ ارائه شده است.

بر اساس توزیع قائم سرعت مشخص می‌گردد که سرعت حداکثر در نزدیکی سطح جریان ایجاد گردیده و سرعت از توزیع لگاریتمی پیروی می‌کند. همچنین نمودار گویای آن است که با نزدیک شدن به دیواره کانال، توزیع قائم سرعت نیز تقریباً با همان روند توزیع در محور وسط کانال، کاهش می‌یابد که این امر ناشی از تاثیر بسیار کم دیواره بر جریان در کانال‌های عریض می‌باشد زیرا در این حالت شعاع هیدرولیکی جریان

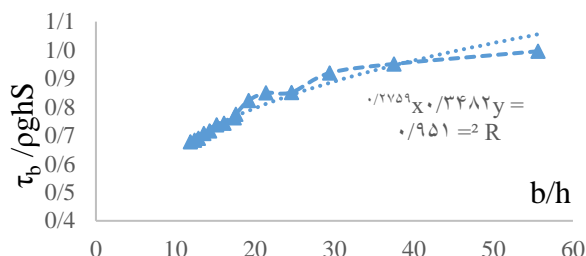


شکل ۹- توزیع قائم سرعت در محور وسط کانال در ایستگاه اندازه گیری OB2.

جدول ۱- توزیع لگاریتمی سرعت در راستای قائم.

LINE	$Q=65(LS^{-1})$	$Q=35(LS^{-1})$
Center(75 cm from wall)	$V = 0.0817 \times \ln(y/y_0) + 0.6105$	$V = 0.0649 \times \ln(y/y_0) + 0.4456$
35cm from wall	$V = 0.0672 \times \ln(y/y_0) + 0.5168$	$V = 0.0521 \times \ln(y/y_0) + 0.3775$
10cm from wall	$V = 0.0538 \times \ln(y/y_0) + 0.3958$	$V = 0.041 \times \ln(y/y_0) + 0.2904$
Average	$V = 0.0675 \times \ln(y/y_0) + 0.5077$	$V = 0.053 \times \ln(y/y_0) + 0.371$

افزایش می‌یابد. در b/h های کمتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف کوچکتر از ۰/۹ و برای b/h های بزرگتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف بزرگتر از ۰/۹ می‌باشد.

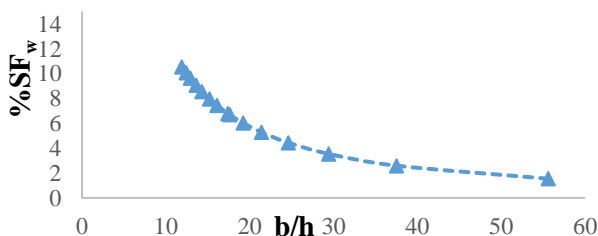


شکل ۱۰- تنش برشی بی‌بعد برای b/h های مختلف.

رابطه توانی تنش برشی بی بعد و نسبت عرض به عمق در کانال‌های عریض به صورت رابطه ۱۳ می‌باشد.

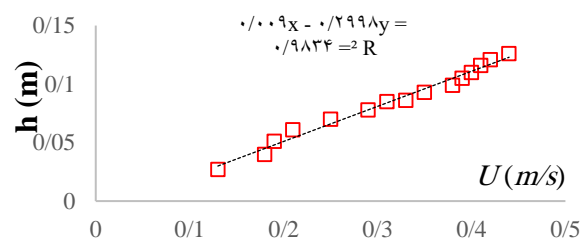
$$\tau / \rho g h S = 0.3482 (b/h)^{0.276} \quad [13]$$

مقایسه نتایج به دست آمده برای تنش برشی بی بعد در کانال‌های عریض و تنگ $b/h=2$ گویای آن است که در کانال‌های کم عرض، رابطه b/h و تنش برشی به صورت خطی است ولی در کانال‌های عریض رابطه توانی بر آنها حاکم می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق، مقادیر مربوط به درصد نیروی برشی کل وارده بر دیواره‌ها ($\%SF_w$) با استفاده از رابطه ۸ بدست آمد و در برابر نسبت b/h مطابق شکل ۱۳ ترسیم گردید.



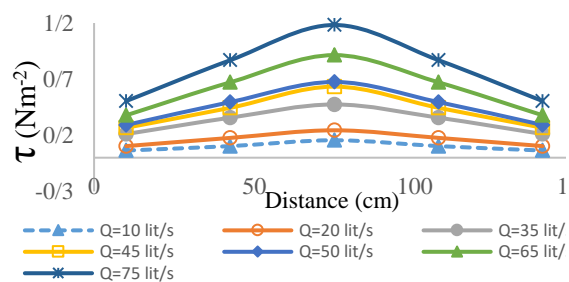
شکل ۱۱- درصد نیروی برشی کل وارده بر دیواره‌ها ($\%SF_w$) برای نسبت‌های مختلف عرض به عمق (b/h)

با توجه به نمودار شکل ۱۳ مشخص می‌شود که در کانال‌های عریض، درصد سهم نیروی برشی وارده بر دیواره‌ها ($\%SF_w$) کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. در



شکل ۱۲- نتایج اندازه‌گیری سرعت میانگین در مقطع OB2

تنش برشی جریان: τ_b ، تنش برشی کف بستر در مقطع عرضی کانال مسطیلی عریض در ایستگاه اندازه‌گیری شماره ۲ (بر اساس رابطه ۱۰)، مطابق نمودار شکل ۱۱ آمده است.



شکل ۱۳- تنش برشی کف برای مقطع عرضی کانال.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش دبی کانال عریض و به طبع آن افزایش عمق نرمال کانال، تنش برشی کف نیز افزایش می‌یابد. نتایج گویای آن است که تنش برشی حداکثر در وسط کانال ایجاد می‌گردد. رابطه توانی تنش برشی حداکثر و دبی جریان مطابق رابطه ۱۲ است.

$$\tau = 2.4395 Q^{0.4062} \quad [12]$$

به منظور بررسی تأثیر نسبت عرض به عمق کانال b/h در میزان تنش برشی بستر τ_b ، نمودار b/h در مقابل تنش برشی بی بعد ($\tau_b / \rho g h S$) در شکل ۱۲ ترسیم گردید. در تحقیق حاضر کمترین نسبت عرض به عمق برابر ۱۲ و بیشترین نسبت برابر ۵۵ می‌باشد. بر اساس نتایج مشخص می‌گردد که با افزایش نسبت عرض به عمق b/h تنش برشی بی بعد به صورت رابطه توانی

بر اساس نتایج، تنش برشی حداکثر در وسط کانال عریض ایجاد می‌گردد و با افزایش نسبت عرض به عمق b/h ، تنش برشی بی بعد با رابطه توانی افزایش می‌یابد. در b/h های کمتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف کوچکتر از ۰/۹ و برای b/h های بزرگتر از ۳۰، تنش برشی بی بعد کف بزرگتر از ۰/۹ می‌باشد. در تحقیق حاضر روابطی برای تعیین تنش برشی حداکثر و تنش برشی بی‌بعد در کانال‌های عریض ارائه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده برای تنش برشی بی‌بعد در کانال‌های عریض و تنگ $b/h=2$ گویای آن است که در کانال‌های کم عرض، رابطه b/h و تنش برشی به صورت خطی است ولی در کانال‌های عریض رابطه‌ای توانی بر آنها حاکم است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در کانال‌های عریض، درصد سهم نیروی برشی وارد بر دیواره‌ها ($\%SF_w$) کمتر از ۱۰ درصد بوده و در نسبت‌های بالای b/h ، این درصد بسیار کم بوده و از سهم اثر دیواره‌ها در تنش برشی می‌توان صرفنظر نمود.

تشکر و قدردانی

از آقایان مهندس ایوب غفوری و جعفر هادی‌پور به پاس کمک‌های بی‌دریغ‌شان و از آقای محمود حسن‌زاده وایقان به جهت در اختیار گذاشتن زمین آزمایشگاه صحرایی تشکر و قدردانی می‌شود. تمامی هزینه‌های آزمایشات این تحقیق توسط دانشجوی دکتری "وحید حسن‌زاده وایقان" تامین و پرداخت شده است.

نسبت‌های بالای b/h ، این درصد بسیار کم بوده و از سهم اثر دیواره‌ها در تنش برشی می‌توان صرفنظر کرد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با ایجاد مدل فیزیکی کانال مستطیلی بتنی عریض به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۵ متر در یک آزمایشگاه صحرایی، خصوصیات هیدرولیکی جریان شامل توزیع سرعت، تنش برشی و روابط دبی-عمق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق گویای آن است که اعداد رینولدز برشی بدست آمده برای مدل بزرگتر از ۱۰۰ می‌باشد و با عمق جریان رابطه خطی دارد و رژیم جریان در تمام دبی‌ها آشفتگی می‌باشد. اعداد فرود و رینولدز مدل نیز گویای آن است که در کلیه دبی‌های جریان، رژیم جریان زیربحرانی-آشفتگی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد سرعت حداکثر در کانال‌های عریض در نزدیکی سطح جریان و در وسط کانال ایجاد می‌شود و توزیع سرعت نسبت به خط میانی کانال قرینه می‌باشد. بررسی توزیع قائم سرعت مشخص می‌نماید سرعت جریان از توزیع لگاریتمی پیروی می‌کند و با نزدیک شدن به دیواره کانال، توزیع قائم سرعت نیز با همان روند، کاهش می‌یابد و آن اثر زبری دیواره‌ها را نمایان می‌کند. در دبی‌های پایین‌تر که دارای نسبت عرض به عمق بیشتر هستند، سرعت در سطح و در ۰/۸ عمق برابر می‌باشد. توزیع لگاریتمی سرعت در کانال عریض برای دبی‌های مختلف در مقایسه با توزیع عمومی تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

منابع مورد استفاده

- Chen CL, 1991. Unified theory on power laws for flow resistance. Journal of Hydraulic Engineering 117(3): 371-389.
- Craf RW, 1965. Cross section transfer of linear momentum in smooth rectangular channel. Geological Survey Water Supply, Paper 1592-B, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Dolgoplova EN, 2001. Plane river resistance. Proceedings XXIX IAHR Congress- Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, 16-18 December, pp.1-13. Beijing, China.

- Einstein HA, 1942. Formulas for the transportation of bed-load. Transactions of the American Society of Civil Engineers 107: 561–597.
- Guo J and Julien PY, 2005. Shear stress in smooth rectangular open-channel flows. Journal of Hydraulic Engineering 131(1): 30–37.
- Hasanzadeh VV and Mohammadi M, 2016. A Numerical study on stream flow resistance in the rivers with wide bed. 15th Iranian Hydraulic Conference, IHA; 14-15, Imam Khomeini University, Qazvin, Iran. (in Farsi)
- Javid S and Mohammadi M, 2012. Boundary shear stress in a trapezoidal channel. International Journal of Engineering 25(4): 323-331.
- Javid S, Mohammadi M, Najarchi M and NajafiZade MM, 2018. Laboratory investigation of flow resistance in composite roughened rectangular open channels, Journal of Fresenius Environmental Bulletin-FEB, Parlar Scientific Publication-Germany 27(7): 4921-4929.
- Javid S, Mohammadi M, Najarchi M and NajafiZade M.M, 2019. An experimental study of the effect of roughened boundary on flow resistance in rectangular open channels. Water and Soil Science, University of Tabriz 28(4): 95-107. (in Farsi).
- Jose Ramon BC, Filho MC, Borko DS, Piscoya VC, Guerra SMS and Singh VP, 2013. Relationship between bed load and suspended sediment in the sand-bed Exu River in the semiarid region of Brazil. Hydrological Sciences Journal 58(8): 1789-1802.
- Kironoto B and Graf WH, 1994. Turbulent characteristics in rough uniform open-channel flow. Water Maritime Energy, Proceedings Institution of Civil Engineers (ICE) 106: 333–344.
- Knight DW, Demetriou JD and Hamed ME, 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 110: 405 – 422.
- Mohammadi M, 1393. Fluvial hydraulics. 3rd Edition, Urmia University Press, Urmia, Iran. (in Farsi)
- Mohammadi, M; 1997. Shape effects and definition of hydraulic radius in Manning equation. International Journal of Eng. (IJE) 3(10): 127-141.
- Mohammadi M, 1998. Resistance to flow and the influence of boundary shear stress on sediment transport in smooth rigid boundary channels. PhD Thesis, Submitted to the School of Civil Eng., The University of Birmingham.
- Mohammadi M, 2002a. Boundary shear stress and velocity distributions in open channels. A Research Report Submitted to the Department of Research and Technology, Urmia University, November, Urmia, Iran.
- Mohammadi M, 2002b. On the effect of shape on resistance to flow in open channels. Pp 339-348. Proceedings International Conference on: Fluvial Hydraulics (Riverflow2002). 3-6 September. Louvain-La-Neuve, Belgium.
- Mohammadi M, MohammadNejhad H and EbrahimNejhadian H, 2015. Flow resistance and velocity distribution in channels with triangular cross-section. Proceedings Journal of Experimental Research in Civil Engineering. (JERCE), Shahid Rajaei University 2(1): 55-66. (in Farsi).
- Mohammadi M and Knight DW, 2004. Boundary shear stress distribution in a V-shaped channel, Pp. 401-410. Proceeding First International Conference on: Hydraulics of Dams & River Structures, (HDRS). 26-28 April. Tehran, Iran.
- Mohammadi M, 2005. Shape effects on resistance to flow in a V-shaped channel. International Journal of Engineering (IJE) 17 (4): 349-357.
- Nezu I and Rodi W, 1986. Open channel flow measurements with a laser doppler anemometer. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 112(5): 335-355.
- Pu JH, 2013. Universal velocity distribution for smooth and rough open channel flows. Applied Fluid Mechanics 6(3): 413-423.
- Rosgen D L, 2003. Applied river morphology. PhD dissertation. University of East Anglia, Norwich, Norfolk, UK.
- Roshangar K, Alami, M and Saghebian, S, 2018. Modeling and determination of effective parameters in flow roughness coefficient in alluvial channels with dun bed forms using support vector regression. Journal of Water and Soil Science, University of Tabriz 28(2): 235-248. (in Farsi).
- Roshani E, Hossienzade Dalir A, Farsadzade D and Salmasi F, 1395. Evaluation of flow resistance in alluvial streams with ripples in various hydraulic conditions. Water and Soil Science, University of Tabriz 26(3-2): 63-73. (in Farsi).

- Tominaga A, Nezu I, Ezaki K and Nakagawa H, 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of Hydraulic Research* 27(11): 149-173.
- White W, Paris E and Bettess R, 2005. A new general method for prediction of the frictional characteristics of alluvial streams. Wallingford, Report No.187, England.
- Yang S, Tan S and Lim S, 2005. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel. *Water Resources Research Journal* 41(9): 1-8.
- Yen BC, 2002. Open channel flow resistance. *J. Hydraulic Engineering ASCE* 128(1): 20-39.