

## بررسی آزمایشگاهی مقاومت جریان در کانال عریض

وحید حسن زاده وایقان<sup>۱</sup>، میرعلی محمدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترای 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

m.mohammadi@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۷/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۱/۰۸]

### چکیده

نمودار دبی-عمق نوعی ارزیابی مقاومت جریان است که برای تعیین عمق و شعاع هیدرولیکی به‌کار می‌رود، اگر دبی، شکل مقطع عرضی و مصالح بستر نوع مشخصی باشند. کانال‌ها و رودخانه‌های عریض به جهت داشتن نسبت عرض به عمق جریان،  $b/h$ ، زیاد، ویژگی‌های هیدرولیکی متفاوت تری نسبت به کانال‌های روباز معمولی دارند. در این پژوهش با استفاده از یک مدل فیزیکی صحرایی، کانالی عریض به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۵ متر با نسبت عرض به عمق جریان بین ۱۲ تا ۵۶، مشخصات هیدرولیکی کانال‌های عریض با جداره ثابت بتنی، شامل الگوی جریان، منحنی دبی-عمق و مقاومت جریان مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق نمودار دبی-عمق-دریچه پایین‌دست (stage-discharge-tailgate) مشخص می‌شود که با افزایش دبی جریان، ارتفاع دریچه پایین دست مورد نیاز در کانال عریض برای ایجاد عمق نرمال، کاهش می‌یابد. بر اساس اندازه‌گیری سرعت و عمق، ضریب زبری از رابطه مانینگ بدست می‌آید. برای دبی‌های بزرگتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب زبری مانینگ،  $n$  اندازه‌گیری شده، به مقادیر  $n$  ارائه شده در منابع هیدرولیک برای کانال بتنی بسیار نزدیک است. ولی برای دبی‌های کوچکتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب زبری مانینگ اندازه‌گیری شده  $n$  بیش از مقدار ارائه شده در منابع هیدرولیک است. همچنین بر اساس نتایج، با افزایش عمق جریان، ضریب زبری مانینگ،  $n$ ، کاهش و با افزایش عدد رینولدز، ضریب زبری  $n$  به صورت خطی ملایم کاهش پیدا می‌کند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در کانال عریض، با افزایش عدد فرود جریان از ۰/۲۶ تا ۰/۴۰، ضریب زبری مانینگ،  $n$ ، در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۱۶ کاهش می‌یابد. در این پژوهش نسبت  $b/h$  به عنوان متغیر مستقل اصلی در تعیین  $n$  مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از کد نویسی در نرم افزار MATLAB رابطه قابل اعتماد درجه دومی مابین آنها بدست آمد که برای کانال‌های عریض می‌تواند به کار گرفته شود. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که با افزایش نسبت  $b/h$ ، ضریب زبری  $n$  نیز افزایش می‌یابد ولی این روند در نسبت‌های  $b/h$  بزرگتر از ۴۳ تغییر نموده و روند کاهشی دارد.

**واژگان کلیدی:** کانال عریض، مدل فیزیکی، دبی-عمق، مقاومت جریان، ضریب زبری مانینگ،  $n$

### ۱- مقدمه

وجود سطح آزاد و همچنین نامنظمی مقاطع، ساختار جریان در کانال‌ها و مشخصات هیدرولیکی پیچیده بوده و به دست آوردن روابط کلی که بیانگر موارد مذکور باشد به سادگی میسر نیست. در این میان کانال‌ها و رودخانه‌های عریض به جهت

تحلیل جریان در کانال‌های روباز برای برنامه ریزی، طراحی و بهره‌برداری از پروژه‌های منابع آب ضروری است [1]. به لحاظ تاثیر لزجت، وجود جداره‌ها و توزیع زبری مختلف در آنها،

با بکارگیری ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ،  $f$  مقاومت جریان تابعی از اعداد بی بعد زیر خواهد بود:

$$f = F(Re, K, \eta, N, Fr, P) \quad (4)$$

که در آن  $Re$  عدد رینولدز،  $K$  زبری نسبی است و به صورت  $k_s/R$  بیان می‌شود که در آن  $k_s$  معادل زبری سطحی دیواره و  $R$  شعاع هیدرولیکی جریان است. همچنین  $\eta$  فاکتور شکل هندسی مقطع جریان،  $N$  فاکتور غیریکنواختی کانال در طول و عرض،  $Fr$  عدد فرود و  $P$  درجه غیردائمی بودن جریان است. رابطه عمومی  $f$  می‌تواند به صورت ضریب مقاومت مانینگ با شکل  $n/k_s^{1/6}$  یا شیب مقاومت جریان به کار گرفته شود. دیاگرام مودی شکل خاصی از رابطه  $f$  است [5]. تابع لگاریتمی رابطه 5 برای توزیع سرعت در هر دو ناحیه داخلی و بیرونی می‌تواند به کار گرفته شود [6].

$$\frac{u}{u_*} = C_1 \log y^* + C_2 \quad (5)$$

که در آن رابطه  $C_1$  و  $C_2$  برای کانال داده شده مقدار ثابتی است. بر اساس مطالعات پین [6] مشخص شد که مقاومت جریان دائمی یکنواخت تنها تابعی از عدد رینولدز جریان و زبری نسبی بوده و اثر عدد فرود قابل چشمپوشی است. برای جریان آرام دائمی با عدد رینولدز کمتر از 500 ضریب مقاومت دارسی-ویسباخ از رابطه  $f = K_L / Re$  بدست می‌آید که در آن  $K_L=24$  برای کانال عریض دو بعدی و 16 برای لوله دایره‌ای است. برای عدد رینولدز  $700 < Re < 25000$  بلازیوس (1913) رابطه 6 را برای لوله‌های جداره صاف پیشنهاد نمود که برای تخمین کانال عریض نیز به کار گرفته می‌شود. برای  $Re > 25000$  فرمول کالبروک-وایت مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطه 7).

$$f = 0.224 \frac{1}{Re^{0.25}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -K_1 \log \left( \frac{k_s}{K_2 R} + \frac{K_3}{4R \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

که در آن ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  و  $k_3$  مقادیر ثابتی هستند که در منابع مختلف ارائه شده است. بار [8] به جای عدد توان 0/9 مقدار

داشتن نسبت "عرض به عمق جریان" زیاد، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان متفاوتی نسبت به کانال‌های روباز معمول، دارند. بدین لحاظ نیاز است که مشخصات هیدرولیکی جریان در آنها به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرد. این مشخصات شامل الگوی جریان، نمودار دبی-عمق، توزیع سرعت، جریان-های ثانویه، مقاومت جریان و تنش برشی بوده و نیازمند انجام تحقیقات میدانی با بهره‌گیری از تکنیک‌های مدل‌سازی فیزیکی و عددی است. در این پژوهش سعی شده است با ساخت مدل فیزیکی یک کانال مستطیلی بتنی عریض به طول 60 متر و عرض 1/5 متر در آزمایشگاه صحرایی که دارای آثار کمتر اشل و دارای نتایج نزدیکتر به کانال‌های واقعی است، ویژگی‌های هیدرولیک جریان در این نوع کانال‌ها بررسی شود. در این پژوهش، بطور جامع به مقاومت جریان، و نمودار دبی-عمق پرداخته شده و روابط و ضرایب تجربی با استفاده از اندازه‌گیری‌ها در مدل آزمایشگاهی ارائه شده است.

نمودار دبی-عمق معادله‌ای است که مبین مقاومت جریان است و برای تعیین عمق یا شعاع هیدرولیکی است، و در صورتی که دبی، شکل کانال، شیب، ویژگی‌های مواد بستر و درجه حرارت مشخص باشد به کار می‌رود [2]. جوس رامون و همکاران [3] با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی برای رودخانه اگزو (*Exu River*) واقع در کشور برزیل که دارای مصالح بستر ماسه-ای با  $d_{50}=0/77$  میلی‌متر است و نمودار دبی-عمق را با رابطه زیر ارائه نمودند:

$$Q = 1.6965 h^{2.734} \quad (1)$$

که در آن  $h$  بر حسب متر و  $Q$  بر حسب مترمکب بر ثانیه است. محمدی و همکاران [4] در پژوهشی به بررسی مقاومت جریان و نمودار دبی-عمق در کانال‌های مثلثی پرداختند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی برای کانال مثلثی با شیب کف 0/01 و زاویه رأس 30 و 45 درجه، نمودار دبی-عمق به صورت رابطه‌های 2 و 3 (بر حسب میلی‌متر و  $Q$  بر حسب لیتر بر ثانیه) است.

$$h = 107.54 * Q^{0.435} \quad (2)$$

$$h = 99.933 * Q^{0.335} \quad (3)$$

## ۲- مواد و روش ها

۲-۱ آنالیز ابعادی ضریب زبری مانینگ،  $n$

پارامترهایی که در تعیین ضریب زبری مانینگ  $n$  در کانالها دارای اهمیت است به صورت رابطه ۹ است.

$$n = f(U, h, b, \rho, g, \mu, k_s, s_0) \quad (9)$$

که در آن  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $U$  سرعت جریان،  $h$  عمق جریان،  $\mu$  لزجت آب،  $\rho$  چگالی آب،  $g$  شتاب ثقل،  $k_s$  اندازه متوسط ذرات بستر جریان و  $s_0$  شیب طولی کانال می باشد. اگر سه پارامتر  $h, U, \rho$  به عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شوند ضریب زبری مانینگ تابعی از پارامترهای بی بعد رابطه ۱۰ خواهد بود که از روش تحلیل ابعادی باکینگهام بدست آمده است.

$$n = f\left(\text{Re}, \text{Fr}, s_0, \frac{b}{h}, \frac{R_h}{k_s}\right) \quad (10)$$

در آزمایشهای این پژوهش، شیب کف ثابت لحاظ شد و پارامترهای بی بعد موثر روی ضریب زبری  $n$  در کانال عریض به صورت رابطه ۱۱ ساده شد، پس ترمهای اصلی مورد مطالعه در این پژوهش، اعداد رینولدز و فرود و نسبت های  $\frac{b}{h}, \frac{R_h}{k_s}$  خواهد بود که در بخش نتایج، نمودار هر یک از پارامترها ترسیم و تفسیر شده است.

$$n = f\left(\text{Re}, \text{Fr}, \frac{b}{h}, \frac{R_h}{k_s}\right) \quad (11)$$

### ۲-۲ مدل فیزیکی

مدل فیزیکی کانال عریض مورد مطالعه در این پژوهش در آزمایشگاه صحرائی و در زمینی به وسعت یک هکتار در شهر ایقان از توابع شهرستان شبستر ایجاد شد. 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 دیواره های سیمان کاری شده طراحی و احداث شد (شکل ۱).

۰/۸۹ و به جای عدد ثابت ۵/۷۶ مقدار عددی ۵/۲ را مورد استفاده قرار داد. این [9] معادله صریح ۸ را برای کانال عریض دو بعدی در شرایط  $Re > 30000$  و  $k_s/R < 0.05$  ارائه نمود.

$$f = \frac{1}{4} \left[ -\log \left( \frac{k_s}{12R} + \frac{1.95}{R^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (8)$$

مایرز [10] برای کانالهای مستطیلی در نسبت های متفاوت  $b/h$  (۱ تا ۳۵)، ضریب اصطکاک را محاسبه و تاثیر نسبت عرض به عمق در ضریب اصطکاک را بررسی نمود. نتایج پژوهش نشان دهنده هماهنگی نسبی کم است که احتمالاً در اثر وجود جریان های ثانویه و غیر یکنواختی الگوهای برشی است. دولگوپلوا [11 & 12] برای جریان هایی که  $h/b \ll 1$  است از رابطه  $f = 0.32 n^2$  استفاده نمود و برای بررسی آن، ضریب اصطکاک را در چند رودخانه عریض محاسبه نمود. نتایج دولگوپلوا گویای آن است که در رودخانه های تحت مطالعه نسبت  $b/h$  بالای ۳۳ است پس می توان  $m$  را برابر ۲ در نظر گرفت.

محمدی [13] با ارائه روابط تحلیلی و تجربی سعی در بیان روابطی برای تعیین چگونگی مقاومت جریان در مقاطع مستطیلی و دایره ای نمودند. جاوید و محمدی [14] با ارائه روابط تحلیلی به بررسی روابط توزیع تنش برشی متوسط و مقاومت جریان در کانال های دوزنقه ای با شیب دیواره ۱:۱ پرداخته و سپس روش مذکور را برای مقاطع مستطیلی و مقاطع دوزنقه ای با شیب دیواره های مختلف بسط دادند. همچنین محمدی [15] با انجام آزمایشهایی روی مقطع کانالی با کف V شکل و دیواره های قائم به بررسی تاثیر جریانات ثانویه و تاثیر شکل اینگونه مقاطع روی چگونگی توزیع تنش برشی و مقاومت جریان پرداخت. حسن زاده و محمدی [16] با استفاده از مدل عددی فلونت و ایجاد دو مدل عددی برای بررسی مقاومت جریان در رودخانه های عریض مستقیم و مئاندری با جداره ثابت به بررسی مقاومت جریان در کانال های عریض پرداختند. نتایج پژوهش گویای آن بود که استفاده از ضریب زبری دارسی-وایسباخ، به شکل مناسبی بررسی تأثیر شکل مقطع عرضی جریان در رودخانه را ممکن می سازد.

در پایین دست کانال از دریچه‌ی فولادی خوابان به عرض  $1/5$  متر و ارتفاع  $0/4$  متر استفاده شد (شکل ۳-الف). حوضچه‌ی اندازه‌گیری دبی به ابعاد  $1/9$  در  $1/85$  و با عمق  $1$  متر احداث و در انتهای آن سرریز تیغه‌ای مستطیلی تعبیه شد (شکل ۳-ب). به منظور جلوگیری از هدر رفت و نفوذ آب به خاک، عایق کاری اجزاء مدل با استفاده از یک لایه ضخیم انجام گرفت. سیستم پمپاژ برای بوجود آوردن جریان گردش در مدل و انتقال آب از استخر ذخیره پایین دست به مخزن بالادست، ایجاد شد. پمپ مورد استفاده از نوع سانتریفیوژ مدل  $150-200$  ساخت شرکت پمپیران تبریز با بیشینه دبی  $100$  لیتر بر ثانیه است. این پمپ با الکتروموتور  $15$  کیلو وات کوپل شده و روی شاسی مربوطه نصب شد (شکل ۵) که از لوله  $8$  اینچی (قطر  $200$  میلی‌متر پلی اتیلنی) به طول  $68$  متر برای لوله رانش پمپ و لوله  $8$  اینچ  $6$  بار برای لوله مکش پمپ استفاده شد. دبی‌های جریان  $5$  الی  $75$  لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد که با گام‌های  $5$  لیتر بر ثانیه در مدل جاری شد. برای دائمی شدن جریان بازگشتی، اندازه‌گیری‌ها پس از حدود  $1$  ساعت از شروع پمپاژ انجام می‌گرفت. در اولین گام آزمایش‌ها به منظور تعیین رابطه دبی-عمق کانال عریض، برای هر یک از دبی‌ها،  $4$  عمق متفاوت با کمک دریچه پایین دست ایجاد شد و در هر یک از آنها، پروفیل سطح جریان با استفاده از سطح سنج برداشت شد. اندازه‌گیری‌ها در  $3$  خط چپ، راست و وسط و به فواصل  $2$  متری در طول کانال انجام گرفت. در مرحله بعدی، با استفاده از نتایج دبی-عمق و آگاهی از عمق یکنواخت برای هر دبی، پروفیل سرعت با استفاده از سرعت سنج نقطه‌ای (میکرومولینه) در  $3$  مقطع از طول کانال مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پروفیل جریان در کانال با کمک یک سطح سنج چرخ دار و با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر (شرکت آداک ایرانیان) اندازه‌گیری شد. دبی جریان خروجی از کانال با استفاده از حوضچه آرام‌کننده و سرریز مستطیلی کالیبره شده در انتهای حوضچه، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. تراز سطح آب روی تاج سرریز مستطیلی توسط ارتفاع سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

شکل ۱. احداث مدل فیزیکی کانال عریض



Fig. 1. Construction of physical model of a wide channel.

اجزای مدل هیدرولیکی کانال عریض شامل ۱- مخزن آب بالادست ۲- حوضچه آرام‌کننده 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 است که در شکل (۲) بطور شماتیک مشاهده می‌شود.

شکل ۲. پلان جانمایی و مقطع عرضی مدل فیزیکی کانال عریض

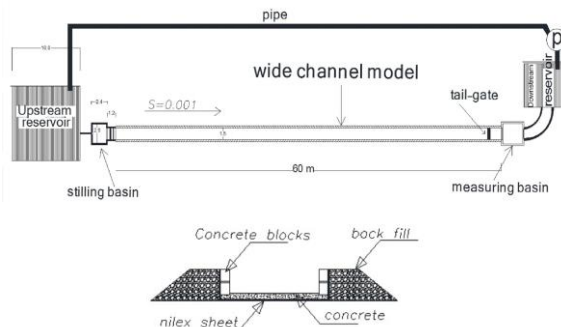


Fig. 2. A plan view and cross-section of a wide channel physical model.

به منظور تنظیم عمق جریان در مدل و ایجاد جریان یکنواخت،

دریچه پایین دست، اندازه گیری و ثبت شد. برای ارتفاع سرریز انتهایی ۵ سانتی متری، پروفیل جریان مطابق نمودار شکل (۵) است.

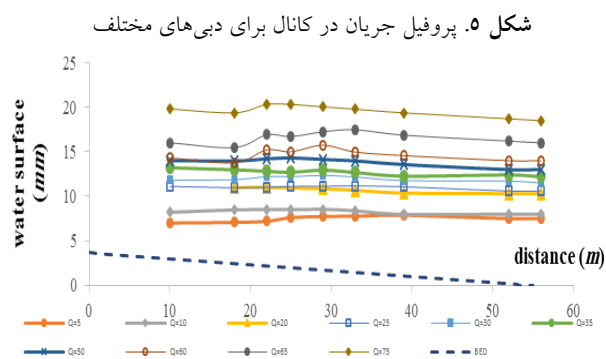


Fig. 5. Flow profiles in the wide channel for various flow discharges.

از شکل (۵) مشخص می شود که با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می یابد. این افزایش در دبی های پایین، کمتر از دبی های بالا است که احتمالاً ناشی از اثر توسعه لایه مرزی است. بر اساس پروفیل های جریان بدست آمده از آزمایش ها، نمودارهای شیب سطح جریان - عمق جریان در مقابل ارتفاع دریچه پایین دست برای تمامی دبی ها ترسیم و عمق یکنواخت برای آنها بدست آمد و نمودار دبی - عمق دریچه پایین دست برای مدل کانال عریض ترسیم شد (شکل ۶).

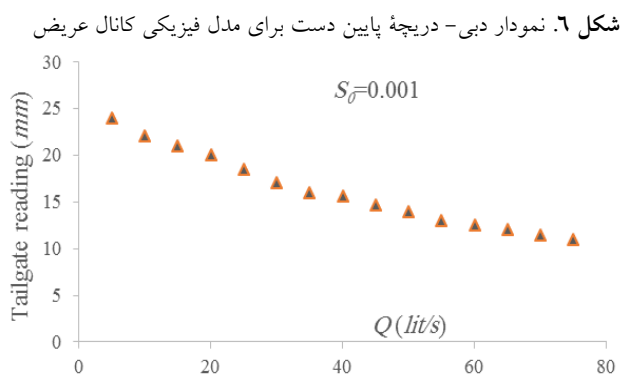


Fig. 6. Discharge-Tailgate diagram for a wide channel physical model.

بر اساس نتایج نمودار دبی - عمق - دریچه پایین دست، می توان اظهار نمود که با افزایش دبی، ارتفاع دریچه پایین دست در پایین دست برای ایجاد عمق نرمال، کاهش می یابد. بر اساس اعماق نرمال بدست آمده، رابطه دبی - عمق برای مدل کانال عریض بتنی به صورت رابطه ۱۲ بدست آمده است.

شکل ۳. الف: سرریز مستطیلی و دریچه تنظیمی (دریچه پایین دست) ب-حوضچه اندازه گیری و استخر پایین دست ج: مخزن بالادست



Fig. 3. (a) Rectangular weir and tailgate (b) measuring pond and downstream pool (c) upstream pond

برای اندازه گیری سرعت جریان در کانال از میکرومولینه ساخت شرکت انگلستان استفاده گردید (شکل ۴).

شکل ۴. الف: سطح سنج و سرعت سنج ب: پمپ سانتریفیوژ کار گذاشته شده در آزمایشگاه صحرایی.



Fig. 4. a) Velocity meter and pointer gauge b) A centrifugal pump placed in field laboratory

### ۳ نتایج و بحث

۳-۱ نمودار دبی - عمق

برای دبی های مختلف، پروفیل جریان در ارتفاع های مختلف از

مدل کانال عریض، شعاع هیدرولیکی محاسبه شده و با جایگذاری آنها در فرمول سرعت برشی محاسبه می‌شود. همچنین عدد رینولدز برشی با در نظر گرفتن  $k_s=3$  میلی‌متر محاسبه شد. در شکل (۷-الف) نمودار سرعت و رینولدز برشی در مقابل عمق نرمال جریان در هر یک از دبی‌ها ترسیم شده است. با توجه به شکل (۷-الف) مشخص می‌شود که اعداد رینولدز برشی بدست آمده بزرگتر از ۱۰۰ است و رابطه خطی با عمق جریان دارد و جریان در تمام دبی‌ها متلاطم است. اعداد فرود و رینولدز که نشان دهنده شرایط جریان است براساس پارامترهای اندازه‌گیری شده، برای دبی‌های مختلف در مدل کانال عریض محاسبه شده که در شکل‌های (۷-ب و ۷-ج) ملاحظه می‌شود. مطابق شکل‌های (۷-ب و ۷-ج) در کلیه دبی‌های مدل، رژیم جریان آشفته- زیربحرانی بوده است.

### ۳-۲ ضریب زبری مانینگ، $n$

بر اساس سرعت متوسط، عمق و دبی اندازه‌گیری شده جریان، ضریب زبری  $n$  مانینگ از رابطه مانینگ و با مقدار ضریب زبری بدست آمده از سرعت متوسط تئوریک (بدست آمده از رابطه  $Q=A.U$ ) در شکل ۸ مقایسه شده است.

شکل ۸ ضریب زبری مانینگ اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای دبی

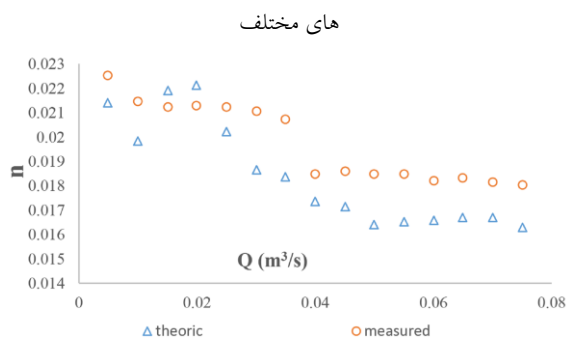


Fig. 8. A diagram of measured and calculated Manning's coefficient,  $n$ , for different discharges.

بر اساس شکل (۸)، می‌توان اظهار نمود که با افزایش دبی جریان، ضریب زبری جریان کاهش می‌یابد. همچنین مطابق این شکل مشخص می‌شود که بین  $n$  محاسبه شده و اندازه‌گیری شده اختلاف اندکی وجود دارد. شکل (۸) برای دبی‌های بزرگتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب مانینگ اندازه‌گیری شده با

$$Q = 0.0141 \times h^{1.7377} \quad (12)$$

نتایج حاصل برای نمودار دبی-عمق مدل کانال عریض گویای آن است این نمودار در مقایسه با نمودار دبی-عمق کانال‌های طبیعی از جمله رودخانه آگزو [3] دارای ضریب بیشتری است و دلیل آن صاف بودن نسبی کف کانال نسبت به بستر روخانه-ها است که باعث ایجاد جریان با ارتفاع کمتر در یک دبی ثابت می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده برای عمق جریان، مشخص شد که در تمام دبی‌ها، عمق‌های نرمال تشکیل شده به گونه‌ای است که نسبت عرض به عمق جریان بیشتر از ۱۲ بوده پس بر اساس طبقه‌بندی روسگن [17]، این جریان‌ها جزو کانال‌های عریض است. برای کنترل آشفتگی جریان از عدد رینولدز برشی استفاده می‌شود [1].

شکل ۷. نمودار اعداد الف: عدد رینولدز برشی، ب: عدد فرود و ج:

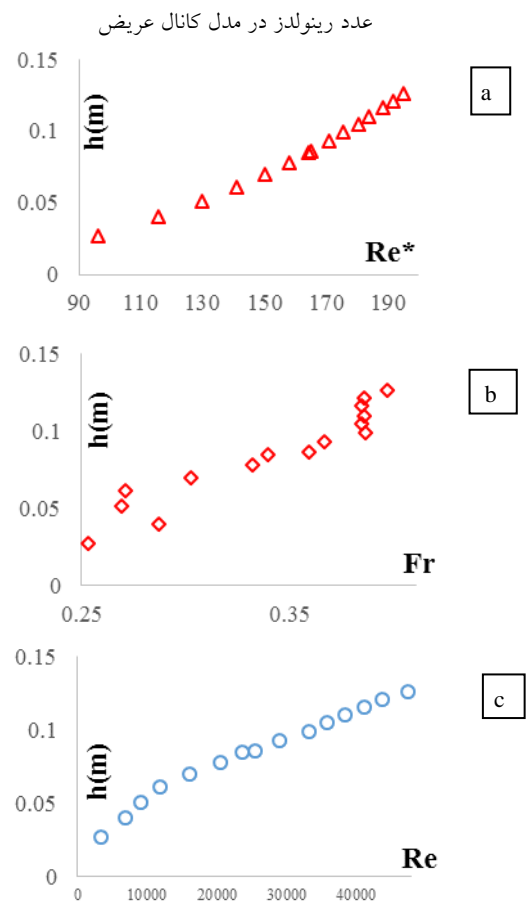
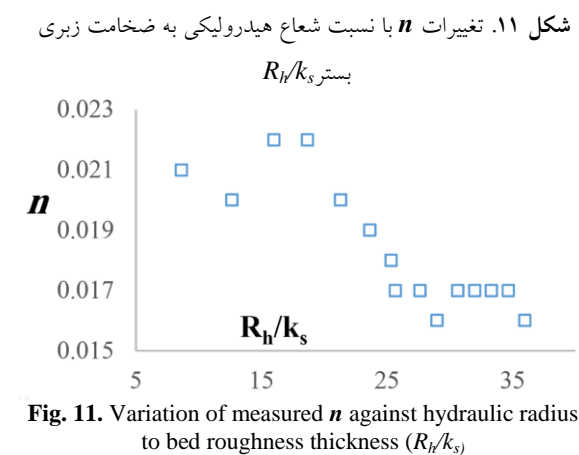
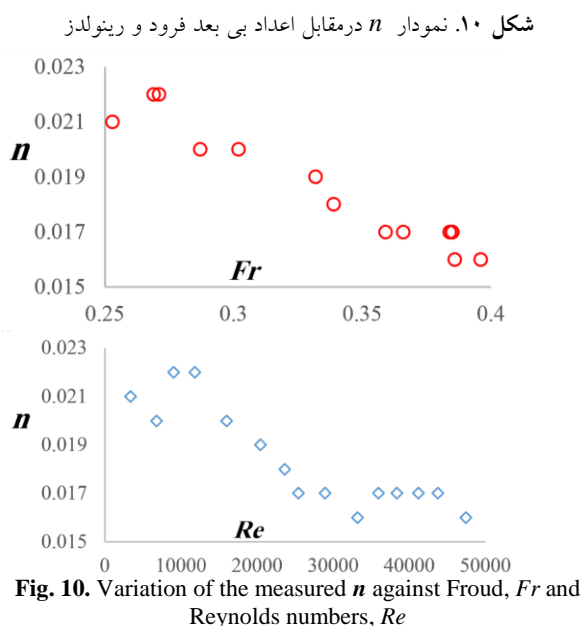


Fig. 7. Variation of a) Shear Reynolds, b) Reynolds and, c) Froude numbers in A Wide Channel Model

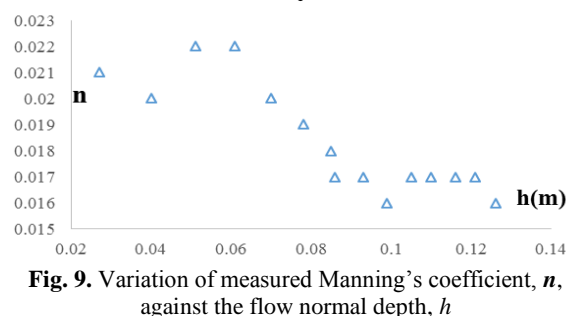
با توجه به سرعت میانگین و عمق نرمال اندازه‌گیری شده برای



با توجه به آنکه در این پژوهش نسبت  $b/h$  به عنوان متغیر مستقل اصلی مطرح است (زیرا تغییرات دبی در آن منعکس می‌شود)، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB کدنویسی برای محاسبه رابطه کلی ضریب زبری مانینگ بر حسب نسبت‌های مختلف  $b/h$  انجام شد. خروجی این مدل، منحنی‌های برازش شده با درجه‌های مختلف است که پس از آنالیز واریانس بدست می‌آیند. برای این پژوهش، منحنی درجه دوم مابین ضریب زبری  $n$  و نسبت  $b/h$  مطابق نمودار شکل (۱۲) بدست آمده که دارای آنالیز واریانس کوچکتر از 0.0001 است که حاکی از با اهمیت بودن مدل برازش داده شده است. ضریب مربعات  $R$  نیز برابر 0.965 است.

مقدار  $n$  ارائه شده در منابع هیدرولیک برای کانال بتنی بسیار نزدیک است. ولی برای دبی‌های کوچکتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب مانینگ اندازه‌گیری شده  $n$  ۱۵ درصد بیشتر از مقدار ارائه شده در منابع است. نمودار و رابطه خطی  $n$  مانینگ اندازه‌گیری شده و ارتفاع عمق نرمال جریان در کانال عریض با بستر بتنی به صورت شکل (۹) بدست آمده است. بر اساس شکل (۹) می‌توان اظهار نمود که با افزایش ارتفاع جریان ( $h$ )، ضریب زبری جریان کاهش می‌یابد.

شکل ۹. نمودار تغییرات  $n$  مانینگ اندازه‌گیری شده و عمق نرمال جریان



بر اساس آنالیز ابعادی دو مورد از پارامترهای بی بعدی که در ضریب زبری مانینگ  $n$  در مدل کانال عریض تاثیر دارد اعداد فرود و رینولدز است. برای مشخص شدن این تاثیر نمودار  $n$  اندازه‌گیری شده درمقابل عدد بی بعد فرود و رینولدز مطابق شکل (۱۰) ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشخص می‌شود که با افزایش اعداد بی بعد فرود و رینولدز، ضریب زبری  $n$  به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد که این امر با توجه به روند افزایش سرعت جریان نسبت به روند افزایش عمق جریان، طبیعی به نظر می‌رسد.

نمودار  $n$  مانینگ اندازه‌گیری شده در برابر نسبت شعاع هیدرولیکی به ضخامت زبری مصالح بستر ( $R_h/k_s$ ) در شکل (۱۱) ارائه شده است. این نمودار گویای آن است که با افزایش نسبت  $R_h/k_s$ ، ضریب زبری مانینگ به صورت خطی کاهش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن  $k_s$  در مدل فیزیکی، افزایش عمق جریان در دبی‌های بزرگتر باعث افزایش شعاع هیدرولیکی و بنابراین کاهش ضریب زبری در رابطه مانینگ است.

۲- نتایج حاصل برای نمودار دبی- عمق مدل کانال عریض گویای آن است این نمودار در مقایسه با نمودار دبی- عمق کانال‌های طبیعی دارای ضریب بیشتری است.

۳- بر اساس نتایج این پژوهش، مابین  $n$  مانینگ تئوریک و اندازه‌گیری شده در مدل کانال عریض اختلاف ۱۰ درصدی مشاهده می‌شود.

۴- نتایج نشان می‌دهد، برای دبی‌های بزرگتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب زبری  $n$  مانینگ اندازه‌گیری شده با مقدار ارائه شده آن در منابع هیدرولیک برای کانال‌های بتنی بسیار نزدیک بوده ولی برای دبی‌های کوچکتر از ۳۵ لیتر بر ثانیه ضریب زبری  $n$  مانینگ اندازه‌گیری شده ۱۵ درصد بیشتر از مقدار ارائه شده در منابع است و این نتیجه مؤید آن است که در بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در کانال‌های عریض به این موضوع بایستی توجه کافی مبذول شود.

۵- نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش عمق جریان،  $h$ ، ضریب زبری ناشی از جریان کاهش می‌یابد.

۶- از نتایج حاصل آشکار می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، ضریب زبری  $n$  مانینگ کاهش می‌یابد.

۷- نتایج پژوهش بیان می‌کند که در مدل کانال عریض، با افزایش عدد فرود جریان، ضریب زبری  $n$  مانینگ کاهش می‌یابد.

۸- در این پژوهش نسبت  $b/h$  به عنوان متغیر مستقل اصلی در تعیین  $n$  مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از کد نویسی در *MATLAB* رابطه درجه دومی مابین آنها بدست آمد که برای کانال‌های عریض می‌تواند به کار گرفته شود.

۹- با توجه به نتایج مشخص می‌شود که با افزایش نسبت  $b/h$ ، ضریب زبری  $n$  نیز افزایش می‌یابد ولی این روند در نسبت‌های  $b/h$  بزرگتر از ۴۳ تغییر نموده و روند کاهشی دارد.

## ۵- تشکر و قدردانی

از آقایان سید داود موسوی و جعفر هادی‌پور به پاس کمک‌های بی‌دریغ‌شان، از آقای محمود حسن‌زاده برای در اختیار گذاشتن زمین آزمایشگاه تشکر می‌کنیم. هزینه‌های اجرایی این پژوهش توسط دانشجوی دکتری "وحید حسن‌زاده وایقان"

شکل ۱۲. تغییرات ضریب زبری مانینگ،  $n$  با نسبت عرض به عمق ( $b/h$ )

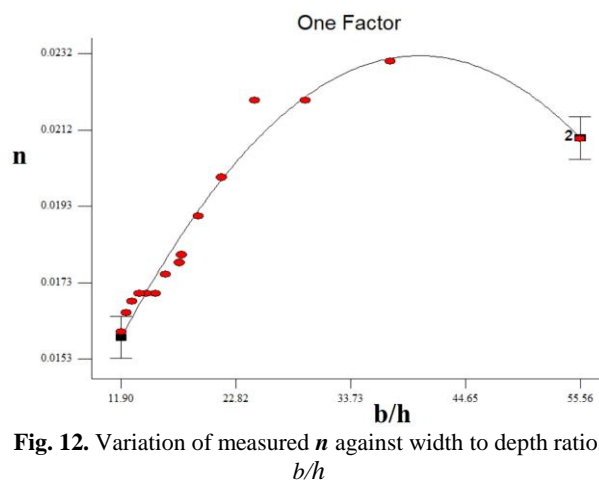


Fig. 12. Variation of measured  $n$  against width to depth ratio,  $b/h$

رابطه درجه دوم برای  $n$  مانینگ و نسبت  $b/h$  مطابق رابطه ۱۳ است که برای کانال‌های عریض به کار برده شود.

$$n = 0.00846 + 0.00073 \left( \frac{b}{h} \right) - 0.000009 \left( \frac{b}{h} \right)^2 \quad (13)$$

با توجه به نمودار شکل (۱۲) مشخص می‌شود که با افزایش نسبت  $b/h$ ، ضریب زبری  $n$  نیز افزایش می‌یابد ولی این روند در نسبت‌های  $b/h$  بزرگتر از ۴۳ تغییر نموده و روند کاهشی دارد که احتمالاً ناشی از اثر ارتفاع‌های کمتر دریاچه پایین دست و همچنین اثر کشش سطحی در تعیین سرعت جریان بوده باشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی شده است با ایجاد یک مدل فیزیکی طولی و عریض برای یک کانال با مقطع مستطیلی بتنی به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۵ متر در یک آزمایشگاه صحرایی واقع در شهر وایقان-شبستر، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان از جمله پروفیل طولی و نمودار دبی- عمق با تاکید بر مقاومت جریان در کانال‌های عریض مورد بررسی قرار گیرد.

خلاصه نتایج به شرح زیر ارائه می‌شوند:

۱- بر اساس نتایج نمودار دبی- عمق- دریاچه پایین دست مدل کانال عریض مشخص می‌شود که با افزایش دبی، ارتفاع دریاچه پایین دست مورد نیاز در پایین دست برای ایجاد عمق نرمال، کاهش می‌یابد. نسبت عرض به عمق جریان مدل در تمامی عمق‌های نرمال تشکیل شده بیش از ۱۲ بدست آمد.



پرداخت شده است.

## ۶- مراجع

## References

- [9] Yen, B. C., 1991. "Channel flow resistance: centennial of manning's formula", Water Resources Publications, Littleton, pp. 206-222, Colorado, USA.
- [10] Myers, W. R. C., 1982. "Flow resistance in wide rectangular channels." Journal of Hydraulic Division, ASCE, 108 (4), 471-482.
- [11] Dolgoplova, E.N. 2000. "The coefficient of friction in channel flows" , J.Water Resources, Vol. 27, No. 6, pp. 611-616.
- [12] Dolgoplova, E.N., 2001 , "Plane river resistance", XXIX IAHR Congress- Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, Beijing , China , , pp. 13-20.
- [13] Mohammadi, M.; 2002: "On the effect shape on resistance to flow in open channels", Proceeding International Conf. on: Fluvial Hydraulics (Riverflow2002), Louvain-La-Neuve, pp 339-348, 3-6 September, Belgium.
- [14] Javid, S., Mohammdi, M. (2012), "Boundary shear stress in a trapezoidal channel", International Journal of Engineering, Vol. 25, No. 4, October, pp. 323-331
- [15] 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, March, England.
- [16] HasanZadeh Vayghan, V.; and Mohammadi, M.; 2016: "A numerical study on stream flow resistance in the rivers with wide bed" Proceedings, 15th Iranian Hydraulic Conference, IHA; 14-15 December, Imam Khomeini University, Qazvin, Iran. (in Farsi)
- [17] Rosgen, D.L., 2003. "Applied river morphology" PhD. Thesis, University of East Anglia, Norwich, Norfolk, 27 pp., plus appendices, UK.
- [1] Chaudhry H., 2008. Open-channel flow, Second Edition, Springer.
- [2] White W., Paris E., and Bettess R. 2005. A New general method for prediction of the frictional characteristics of alluvial streams, Report No.187, Wallingford, England.
- [3] Jose Ramon B., Cantalice, Moacyr Cunha Filho, Borko D. Stosic, Victor Casimiro Piscoya, Sergio M. S.Guerra and Vijay P. Singh, 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.
- [4] Mohammadi, M.; MohammadNejhad, H. and EbrahimNejhadian; H.: 2015: "Flow resistance and velocity distribution in channels with triangular cross-section", Proceedings, J. of Experimental Research in Civil Eng. (JERCE), Shahid Rajaei University, Vol. 2, No. 1, pp. 55-66, September, Tehran, Iran. (In Farsi).
- [5] Rouse, H. (1965). Critical analysis of open-channel resistance. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng. (ASCE), 91 (HY4), pp. 1-25.
- [6] Yen, B. C., 2002. "Open channel flow resistance." J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(1), 20-39.
- [7] Chen, C. L., 1991, "Unified theory on power laws for flow resistance" J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(3), pp. 371-389.
- [8] Barr, D. I. H., 1977. Discussion of "Accurate explicit equation for friction factor" J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 103 (HY3), pp. 334-337.

# A Laboratory Investigation of Flow Resistance in Wide Channel

Vahid Hasanzadeh Vayghan<sup>1</sup>, Mirali Mohammadi\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> -PhD Candidate, Civil Eng. Water & Hydraulic Structures, Department of Civil Eng., Faculty of Eng., The University of Urmia, P O Box 165, Urmia 57169-33111, Iran.

\*<sup>2</sup>- (corresponding), Associate Prof., in Civil Eng. Hydraulics & River Eng. Mechanics, Department of Civil Eng., Faculty of Eng., The University of Urmia, P O Box 165, Urmia 57169-33111, Iran.

m.mohammadi@urmia.ac.ir

## Abstract:

The stage-discharge relationship is a type of resistance to flow evaluation that is used to determine the depth and hydraulic radius in open channels, if the flow discharge, channel cross-sectional shape and the properties of bed materials are specific. Wide channels as well as plane bed rivers, due to having the higher ratios of width to depth,  $b/h$ , they have specific hydraulic characteristics than that of the normal open channels. In this research work, the hydraulic characteristics of widening long and wide channels including flow pattern, stage-discharge relationship and flow resistance, by using a physical model of rigid boundary with 60m length, 1.5m wide and a longitudinal channel bed slope of 1 in 1000 (0.001) that has  $b/h$  ratios range of 12 to 56 are experimentally investigated. The construction material of channel model is concrete bed and concrete block walls were used. To insulate the channel bed and walls, a thick layer under the concrete was also used. Due to its wide width and length, the physical model of this study has low scale effects and the obtained results are closer to the normal open channels as well as the plain bed rivers. Based on the values obtained for the Froude, Reynolds and Shear Reynolds numbers in model, it was found that the flow regime is subcritical and turbulent. According to the results of model, stage-discharge-Tailgate relationship is shown plotted and it is found that as the flow rate increases, the Tailgate height that required at the downstream end of the channel to produce a normal depth, increases. On the basis of normal depths obtained in a widen channel model, a reliable stage-discharge relationship is presented. The results show that this relationship has a higher coefficient than that of a natural channel stage-discharge relationship. Results, also reveals that between the calculated and measured Manning's roughness coefficient,  $n$ , in the wide channel model, a difference (about 10%) is observed. The results show that, for discharges greater than 35 lit/s, the measured Manning roughness coefficient,  $n$  is very close to the  $n$  values presented in literature. However, for the discharges less than 35 lit/s, the measured values of Manning's  $n$  is 15% higher than the amounts provided in literature. The results of the present research show that by increasing the ratio of hydraulic radius to the roughness height of the bed ( $R_h/k_s$ ), the Manning roughness,  $n$ , decreases linearly. Also, based on the results, it was found that by increasing flow depth, The Manning roughness,  $n$ , decreases and by increasing Reynolds number,  $Re$ , the Manning  $n$  decreases linearly. The results also show that in the wide channel model, the Manning roughness coefficient,  $n$ , decreases from 0.022 to 0.016 by increasing Froude number,  $Fr$ , from 0.26 to 0.4. In this research, the wide to depth ratio,  $b/h$ , was considered as the main independent variable in the determination of  $n$ , and using the coding, a reliable relation was obtained between them, which can be used for wide channels. According to the results, it is clear that with increasing  $b/h$  ratio, the Manning roughness coefficient,  $n$ , also increases, but this trend changes in  $b/h$  ratios larger than 43 and has a decreasing trend.

**Keywords:** Wide Channel, Physical Model, Stage-Discharge, Flow Resistance, Manning's roughness,  $n$ .