

بررسی تاثیر افزایش زبری کانال بر امواج مورب عرضی ایجاد شده در اثر ورود جریان جانبی ۹۰ درجه مستغرق به کانال با جریان فوق بحرانی

علیرضا مشرقی^۱، محمدرضا جعفرزاده^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

jafarzag@um.ac.ir

خلاصه

در مقاله حاضر تاثیر افزایش زبری کانال بر امواج مورب عرضی ایجاد شده در اثر ورود جریان جانبی ۹۰ درجه مستغرق به کانال با جریان فوق بحرانی بررسی گردید. در این مدل یک کانال با زبری های متفاوت و جریانی فوق بحرانی با اعداد فرود مختلف ایجاد و یک جریان جانبی با زاویه ۹۰ درجه به این کانال وارد می شود. بر اثر برخورد جریان جانبی به جریان اصلی امواج عرضی مورب در کانال ایجاد می گردد. ارتفاع و موقعیت امواج عرضی مورب به ازای تغییر اعداد فرود جریان و زبری کانال اندازه گیری شده است. با افزایش زبری کانال امواج مورب به سرعت مستهلک و جریان نسبتاً یکنواختی برقرار می شود و عمق نرمال جریان تا حدود ۲ برابر نسبت به حالتی که کف کانال صاف است افزایش می یابد. زبرتر شدن کانال ارتفاع امواج را افزایش داده و در زبری ۰/۰۲۲ عمق ماکزیمم در دیواره خارجی تا حدود ۱/۷ برابر عمق اولیه می گردد و در کانال با زبری بسیار درشت تا حدود ۱۰ درصد حالت صاف، عمق بیشتری برای موج ماکزیمم مشاهده گردید. با زبرتر شدن کانال، تا عدد فرود ۲/۱ ارتفاع امواج افزایش می یابد و تا حدود ۲/۲ در دیواره خارجی و ۱/۸ در دیواره داخلی می رسد و پس از آن ارتفاع امواج کاهش می یابد. همچنین افزایش زبری موجب کاهش میزان انتقال موقعیت قله موج بر اثر افزایش عدد فرود در کانال می گردد.

کلمات کلیدی: ضریب زبری، جریان فوق بحرانی، عدد فرود، کانال باز، جریان جانبی

۱. مقدمه

بررسی و مطالعه جریان در کانالهای باز به علت کاربرد فراوان آن در طبیعت و صنعت مورد توجه محققان بوده است. بیشتر این نوع جریانها در کانالهای زیر اتفاق می افتند و در مجاری طبیعی به ندرت شرایط کانال صاف ایجاد خواهد شد. از آنجا که در تخمین سرعت، دبی و مشخصات دیگر جریان در کانالهای باز، زبری نقش مهمی ایفا می کند، تعیین مناسب و بهینه آن همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. روابط متفاوت برای ضریب مقاومت جریان مانند ضرایب مایننگ، شزی و دارسی-وایسباخ و گاه روشهای مختلف در بدست آوردن یک ضریب خاص دلیل بر این مسئله است.

بوور و همکاران اولین بار یک جریان فوق بحرانی را در محل اتصال کانالها مطالعه نمودند و ارتفاع دیوارهای کانال را برای تقاطع های با جریان فوق بحرانی بسیار بیشتر از ارتفاع معمول برای کانالها توصیه کردند [1]. بلک و پریچت یک آنالیز بر روی جریان فوق بحرانی در محل تلاقی دو کانال با مقاطع دوزنقه ای و مستطیلی و زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به ازای اعداد فرود بین ۲ تا ۷ انجام دادند به طوری که ابعاد کانالهای متقاطع در نزدیکی نقطه اتصال با یکدیگر برابر بود. سپس با این فرض که تأثیر شاخه جانبی بر روی جریان در شاخه اصلی با آشفتگی ناشی از وجود یک دیوار مایل در کانال قابل مقایسه است، زوایای امواج را با توجه به جهت اصلی جریان تعیین نمودند [2]. رایس تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مشخصات جریان را بر

روی زاویه صفحه جداکننده در محل اتصال مطالعه نمود و معیارهایی برای پیش‌بینی حداکثر ارتفاع سطح آب در ناحیه اتصال و پروفیل سطح آب در شاخه بالادست ارائه کرد [3]. ویر و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان در کانال‌های متقاطع ۹۰ درجه پرداختند. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ویر و همکاران به صورت سرعت‌های سه‌بعدی به همراه نوسانات سرعت و عمق جریان ارائه شد. این داده‌ها، بستر مناسبی برای اعتبار سنجی مدل‌های ریاضی را فراهم کرد [4]. مشرفی و جعفرزاده به مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی تأثیر ورودی جانبی مستغرق بر روی امواج مورب ایجاد شده در یک کانالبا جریان فوق بحرانی پرداختند [5]. بسیاری از محققان از جمله یوئن و تزله پس و همکاران با مطالعه بر روی انواع کانال‌های مرکب، مستطیلی و دوزنقه‌ای صاف، رفتار جریان و چگونگی ساختار مقاومت، توزیع سرعت و توزیع تنش برشی جریان در این گونه کانال‌ها را مطالعه نموده‌اند [6] و [7]. نایت و مک دونالد با مطالعه بر روی کانال‌های زیر شده با استفاده از مصالح مصنوعی [8] و همچنین الحمید با بررسی کانال‌هایی با بستر پر شده از رسوبات رودخانه‌ای، سعی در شناخت الگوی توزیع مقاومت جریان پیرامون جداره کانال‌های زیر داشته‌اند [9]. با این وجود تحقیقات بسیار کمی در خصوص رفتار جریان و متعاقباً مقاومت جریان در کانال‌ها با جداره ثابت صورت گرفته است.

در این بخش، امواج ضربدری ایجاد شده به دلیل ورود یک جریان جانبی به کانالی با جریان فوق بحرانی در یک فلوم آزمایشگاهی با زبری‌های متفاوت (ضرایب زبری مانینگ کانال ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۵۵، ۰/۰۱۸، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۲ که بر اساس مقاله تدین فر و مغربی برداشت شده [۱۰]) و جریان فوق بحرانی در کانال اصلی با ۵ عدد فرود متفاوت ($Fr=1.73, 2.1, 3.1, 3.8, 4.5$) مدل‌سازی گردیده و تأثیر زبری کانال و عدد فرود جریان اصلی بر موقعیت و ارتفاع بیشینه این امواج بررسی شده است.

۲. معادلات حاکم

یکی از متداول‌ترین معادلات مقاومت برای جریان در کانال‌های باز، رابطه مانینگ است. این معادله در سیستم SI به صورت زیر می‌باشد:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن V سرعت جریان (m/s)، S_f شیب اصطکاکی کانال (m/m)، R شعاع هیدرولیکی (m) و n ضریب زبری مانینگ است. مهم‌ترین عامل ناشناخته در این رابطه ضریب زبری n می‌باشد [11]. یکی از روابطی که کاربرد زیادی در مجاری طبیعی دارد، رابطه استریکلر ($Steickler$) است که به صورت زیر ظاهر می‌شود:

$$n = \frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{31.3} = 0.032 \cdot d_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

که در آن d_{50} قطر میانه ذرات بر حسب ft می‌باشد.

تعیین دقیق این ضریب به سادگی در سطوحی از مصالح که به صورت تجارتي ساخته می‌شوند کار نسبتاً ساده‌ای است [12].

محاسبات جریان کانال روباز اغلب بازه به بازه و یا مقطع به مقطع صورت می‌گیرد و بر این اساس ضریب مقاومت جریان هم باید تعیین گردد. با فرض محاسبات جریان متغیر تدریجی، و داشتن اطلاعات پروفیل سطح آب با استفاده از معادله انرژی در بازه‌های طولی به زبریهای تنوریک مختلفی می‌توان دست یافت که قاعدتاً باید جوابهای متفاوتی برای یک نوع خاص از زبری باشد [13]. بنابراین با استفاده از معادله انرژی بین دو مقطع می‌توان نوشت:

$$\frac{P_1}{\gamma} + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (3)$$

$$p_1 = p_2 = 0$$

با توجه به آنکه در سطح آب فشار

اتمسفریک است، داریم:

$$z_1 = z_2 = S_0 \Delta x = S_0 (x_1 - x_2) \quad (4)$$

$$h_f = \overline{S_f} \Delta x = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \Delta x \quad (5)$$

از طرفی از معادله (۱) داریم:

$$\overline{S_f} = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^3} \quad (6)$$

با استفاده از معادلات (۳) تا (۶) و ساده کردن عبارات خواهیم داشت:

$$(y_1 - y_2) + \left(\frac{Q^2}{2A_1^2 g} - \frac{Q^2}{2A_2^2 g} \right) + S_0(x_1 - x_2) = \frac{n^2}{2} \left[\left(\frac{Q^2 n^2}{A_1^2 R_1^{\frac{4}{3}}} + \frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{\frac{4}{3}}} \right) (x_1 - x_2) \right] \Rightarrow$$

$$n = \frac{\sqrt{\frac{Q^2}{2A_1^2 g} - \frac{Q^2}{2A_2^2 g} - 2S_0(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)}}{\sqrt{\frac{Q^2 x_1}{A_1^2 R_1^{\frac{4}{3}}} + \frac{Q^2 x_1}{A_2^2 R_2^{\frac{4}{3}}} - \frac{Q^2 x_2}{A_1^2 R_1^{\frac{4}{3}}} - \frac{Q^2 x_2}{A_2^2 R_2^{\frac{4}{3}}}}} \quad (7)$$

که در معادلات فوق (عمق جریان، S_0 شیب طولی کانال، x فاصله مقطع از ابتدای کانال، A مساحت مقطع، R شعاع هیدرولیکی، n ضریب زبری مائینگ، همچنین شماره های ۱ و ۲ در اندیس فرمول ها بیانگر شماره مقطع می باشد.

برای جریان دائمی یکنواخت ($S_0 = S_f$)، در یک کانال مستطیلی عریض عمق نرمال جریان از رابطه (۸) به دست می آید:

$$h_n = \left(\frac{n q}{S_0} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

که در آن h_n عمق جریان است.

بنابراین عمق جریان با دبی و ضریب اصطکاک افزایش پیدا می کند اما با اضافه شدن به شیب کاهش می یابد [۱۴].

۳. مواد و روش ها

مدل عددی، برابر یک فلوم آزمایشگاهی با مشخصات آمده در جدول (۱)، شبیه سازی گردید.

جدول ۱: جدول مشخصات فلوم مورد استفاده

طول (m)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	شیب کف	جنس کف	جنس دیواره
۱۲	۳۰	۴۰	۱٪	فولاد	شیشه

جهت تعیین ضریب زبری کف کانال، از مقاله تدین فر و مغربی (۱۳۸۸) که آزمایشاتی بر روی فلومی مشابه آنچه مدلسازی گردیده، استفاده شده است. در مقاله مورد اشاره برای زیر نمودن کانال از مصالح رودخانه ای با قطر متوسط $d_{50} = 17.50 \text{ mm}$ و 11.35 mm و 4.00 mm به طور جداگانه و همچنین ترکیبی از هر سه نوع مصالح با آرایش های گوناگون استفاده شده است. به طور مثال در شکل (۱) چهار نوع آرایش برای $d_{50} = 17.50 \text{ mm}$ نمایش داده شده و انتخاب دانه بندی های فوق، به دلیل استفاده آنها در کانال های طبیعی و مصنوعی ذکر شده است [۱۰].



(د)

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱- آرایش مصالح سنگدانه ای با $d_{50} = 17.50 \text{ mm}$ (الف) $2d_{50}$ (ب) آرایش قطری (ج) $4d_{50}$ (د) $8d_{50}$ [۱۰]

با توجه به مقاله مورد اشاره، به طور کلی ۴ ضریب زبری مانینگ برای انجام مدل سازی ها انتخاب گردید که در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: ضریب زبری معادل لایه های مختلف زبری

نسبت زبری ها	ضریب مانینگ (n)	ارتفاع زبری (k_s (mm))	نوع زبری
۲,۴۴۴	۰,۰۲۲	۳۲,۴۹	زبری درشت
۲	۰,۰۱۸	۹,۷۲	زبری متوسط
۱,۷۲۲	۰,۰۱۵۵	۳,۹۶	زبری ریز
۱	۰,۰۰۹	صاف	شیشه

همچنین ۵ عدد فرود ($Fr=1.73, 2.1, 3.1, 3.8, 4.5$) برای جریان اصلی در کانال در نظر گرفته شد.

نهایتاً ۲۰ حالت مختلف مدل سازی گردید که در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: حالت های مختلف مدل عددی

شماره آزمایش	نوع زبری	ارتفاع زبری	ضریب مانینگ	عدد فرود جریان	شماره آزمایش	نوع زبری	ارتفاع زبری	ضریب مانینگ	عدد فرود جریان
۱	درشت	۳۲,۴۹	۰,۰۲۲	۱,۷۳	۱۱	ریز	۳,۹۶	۰,۰۱۵۵	۱,۷۳
۲	درشت	۳۲,۴۹	۰,۰۲۲	۲,۱	۱۲	ریز	۳,۹۶	۰,۰۱۵۵	۲,۱
۳	درشت	۳۲,۴۹	۰,۰۲۲	۳,۱	۱۳	ریز	۳,۹۶	۰,۰۱۵۵	۳,۱
۴	درشت	۳۲,۴۹	۰,۰۲۲	۳,۸	۱۴	ریز	۳,۹۶	۰,۰۱۵۵	۳,۸
۵	درشت	۳۲,۴۹	۰,۰۲۲	۴,۵	۱۵	ریز	۳,۹۶	۰,۰۱۵۵	۴,۵
۶	متوسط	۹,۷۲	۰,۰۱۸	۱,۷۳	۱۶	شیشه	صاف	۰,۰۰۹	۱,۷۳
۷	متوسط	۹,۷۲	۰,۰۱۸	۲,۱	۱۷	شیشه	صاف	۰,۰۰۹	۲,۱
۸	متوسط	۹,۷۲	۰,۰۱۸	۳,۱	۱۸	شیشه	صاف	۰,۰۰۹	۳,۱
۹	متوسط	۹,۷۲	۰,۰۱۸	۳,۸	۱۹	شیشه	صاف	۰,۰۰۹	۳,۸
۱۰	متوسط	۹,۷۲	۰,۰۱۸	۴,۵	۲۰	شیشه	صاف	۰,۰۰۹	۴,۵

۴. مدل عددی

نرم افزار استفاده شده جهت شبیه سازی جریان در این پژوهش، بر مبنای مدل عددی حجم محدود ROE می باشد. این مدل عددی با استفاده از انتگرال گیری در عمق از معادلات ناویر استوکس که حاصل آن معادلات دوبعدی متوسط عمقی آبهای کم عمق است، محاسبه شکل جریان و پیش بینی حالات مختلف آن را انجام می دهد.

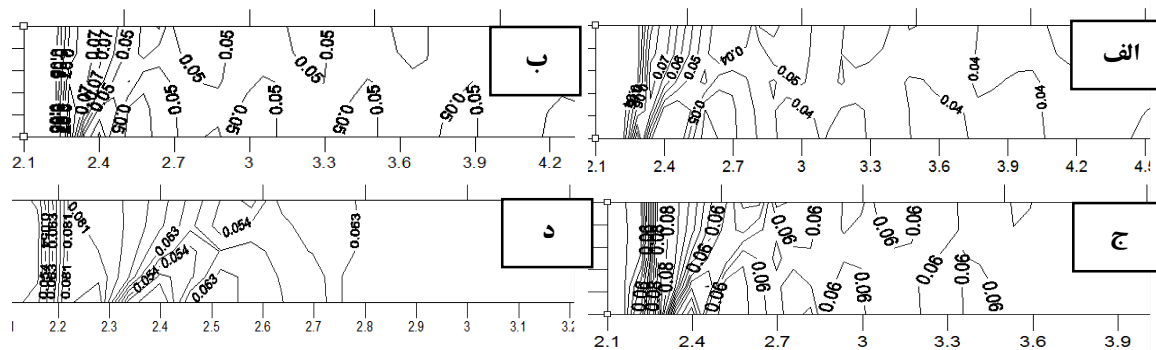
در این پژوهش تاثیر تغییرات ضریب زبری مانینگ بر نحوه ایجاد امواج مورب در کانال اصلی، با مدل شبیه سازی شده در نرم افزار *ROE* بررسی می گردد.

۵. نتایج و بحث

ورود یک جریان جانبی به جریان اصلی فوق بحرانی در یک کانال می تواند باعث ایجاد امواج مورب عرضی شود عمق این امواج در برخی نقاط تا دو برابر عمق اولیه جریان اصلی می رسد. پارامترهای هیدرولیکی مختلفی بر مقدار و مکان ایجاد عمق بیشینه در کانال دخیل هستند. جریان در کانال اصلی به صورت سطح آزاد است و در نتیجه رفتار آن تابع عدد بی بعد فرود می باشد. از طرف دیگر جریان جانبی بصورت مستغرق به کانال اصلی وارد می شود و ممتن وارد شده به جریان اصلی (M) با عدد رینولدز جریان جانبی متناسب است.

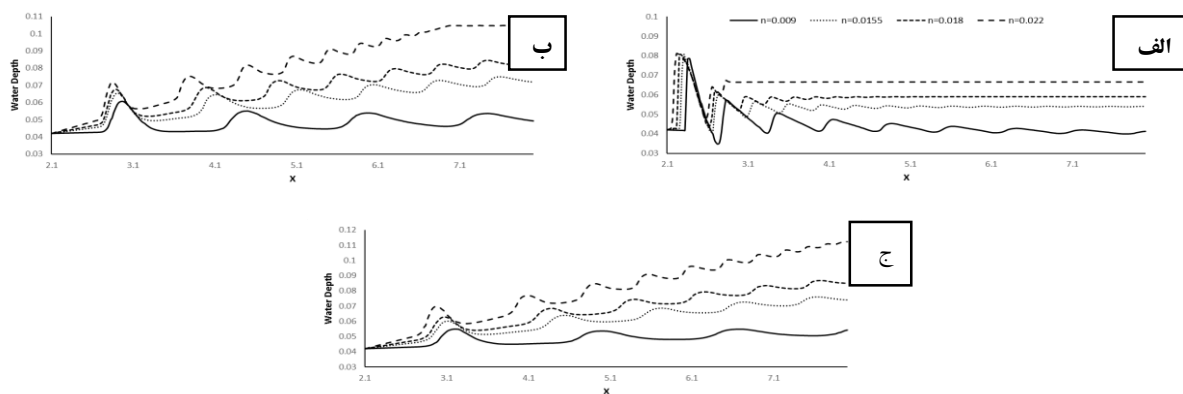
جهت بررسی تاثیر تغییرات ضریب زبری مانینگ بر روی امواج مورب عرضی، به ازای زاویه ی ورودی ۹۰ درجه، عدد رینولدز $10^4 * 4/25$ ، اعداد فرود $4/5$ و $3/1$ ، $2/1$ ، $1/73$ برای جریان اصلی و ضرایب زبری مانینگ $0/009$ ، $0/0155$ ، $0/018$ و $0/022$ برای کانال مدلسازی گردید.

پس از انجام آزمایشات پروفیل سطح آب برای هر آزمایش رسم گردید و اعماق بیشینه در دیوارهای داخلی و خارجی کانال و همچنین مکان وقوع این اعماق برداشت شد و پروفیل سطح آب توسط نرم افزار *SURFER 8* رسم گردید. در شکل ۲ نقشه توپوگرافی، برای حالتی که جریان اصلی با عدد فرود $1/73$ در کانال وجود دارد رسم گردیده است.



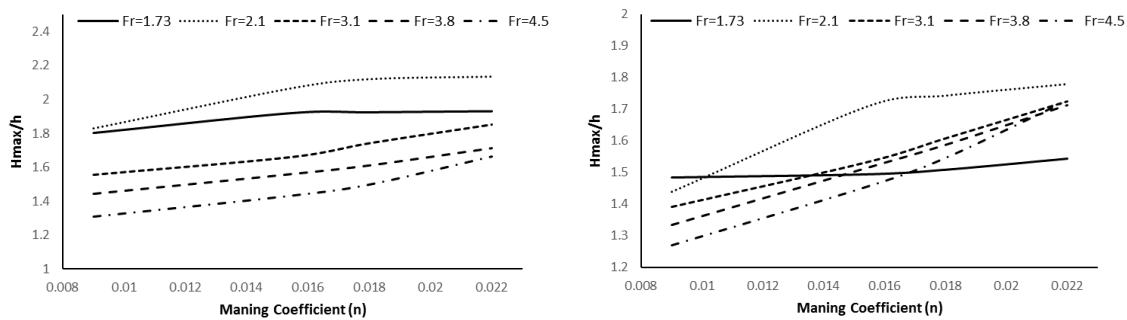
شکل ۲- نمودارهای توپوگرافی کانال برای حالت الف) $n=0.009$ ب) $n=0.0155$ ج) $n=0.018$ د) $n=0.022$

در شکل ۳ نیم رخ طولی سطح آب در دیواره خارجی کانال برای جریان با اعداد فرود مختلف مشاهده می شود. در اعداد فرود کمتر، امواج تا انتهای کانال توسعه پیدا کرده است و با افزایش زبری امواج به سرعت مستهلک شده و جریان نسبتاً یکنواختی برقرار می شود اما با افزایش عدد فرود جریان اصلی و افزایش زبری کانال، از میزان استهلاک امواج کاسته شده و در جریان با عدد فرود $4/5$ ، امواج تا انتهای کانال ادامه می یابند. همچنین ملاحظه می شود که با افزایش زبری، عمق نرمال نیز افزایش یافته و امواج پس از مستهلک شدن در عمق بیشتری به حالت نرمال می رسند به طویکه عمق نرمال در پایین دست با زبرتر شدن کانال و افزایش عدد فرود تا حدود ۲ برابر نسبت به حالتی که کف کانال صاف است افزایش می یابد و از عدد فرود $3/1$ به بعد، عمق نرمال در پایین دست، از عمق ایجاد شده توسط اولین موج بیشتر می گردد.



شکل ۳- نیم رخ طولی سطح آب در دیواره خارجی کانال به ازای زبری های مختلف و اعداد فرود جریان اصلی الف) ۱/۲۳ (ب) ۳/۸ (ج) ۵/۴

هنگامی که جریان حتی با دبی کمتر از ۱۰ درصد به جریان فوق بحرانی به کانال اصلی وارد می شود امواج ضربدری عمق آب را در دیواره های داخلی و خارجی به شدت افزایش می دهند. حداکثر ارتفاع امواج در مجاورت جت ورودی در دیواره های داخلی و خارجی بوجود می آید. در شکل ۴ تغییرات نسبت حداکثر ارتفاع موج در دیواره های داخلی و خارجی به عمق جریان قبل از ورودی جانبی (H_{max}/h) به ازای زبری های مختلف در کانال آمده است.



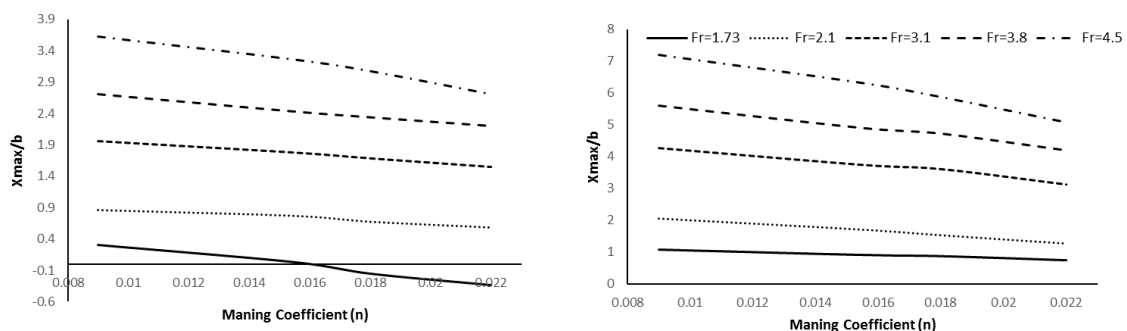
شکل ۴- الف) نمودار حداکثر ارتفاع امواج در دیواره داخلی به ازای زبری های مختلف کانال (ب) نمودار حداکثر ارتفاع امواج در دیواره خارجی به ازای زبری های مختلف کانال

در جریان با عدد فرود ۱/۲۳، اعماق بیشینه در دیواره های داخلی و خارجی با افزایش زبری، تغییر محسوسی نداشته و نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ در حدود ۱/۸ باقی می ماند. در دیواره داخلی با افزایش عدد فرود جریان تا ۲/۱، نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ افزایش و پس از آن این نسبت کاهش می یابد. افزایش زبری و عدد فرود جریان در کانال نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ را افزایش داده و در زبری ۰/۲۲، در همه حالتها عمق ماکزیمم در دیواره خارجی حدود ۱/۷ برابر عمق اولیه می گردد.

ملاحظه گردید روند گفته شده در دیواره خارجی نیز رخ می دهد با این تفاوت که با افزایش عدد فرود و زبری کانال، نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ به سمت یک مقدار مشخص (حدود ۱/۸ تا ۱/۹) همگرا شده ولی به آن نمی رسد.

همچنین در شرایط کانال با زبری بسیار درشت تا حدود ۱۰ درصد حالت صاف، عمق بیشتری برای موج ماکزیمم مشاهده می گردد.

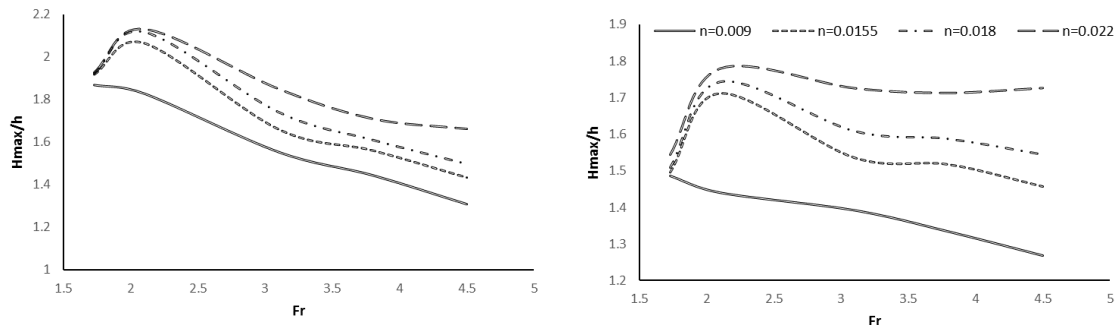
در شکل ۵ نسبت بی بعد موقعیت اولین قله موج مورب در دیواره های خارجی و داخلی از محل ورودی جریان جانبی به عرض کانال $\frac{H_{max}}{h}$ ترسیم شده است.



شکل ۵- الف) نمودار موقعیت ارتفاع حداکثر امواج در دیواره داخلی (ب) نمودار موقعیت ارتفاع حداکثر امواج در دیواره خارجی

با افزایش زبری کانال، موقعیت قله موج به سمت بالادست منتقل می گردد و در حالت جریان با عدد فرود ۱/۷، قله موج در زبری های بیشتر از ۰/۱۵ در قبل از ورودی جانبی رخ می دهد. با افزایش عدد فرود جریان موقعیت قله موج به پایین دست جریان منتقل می شود.

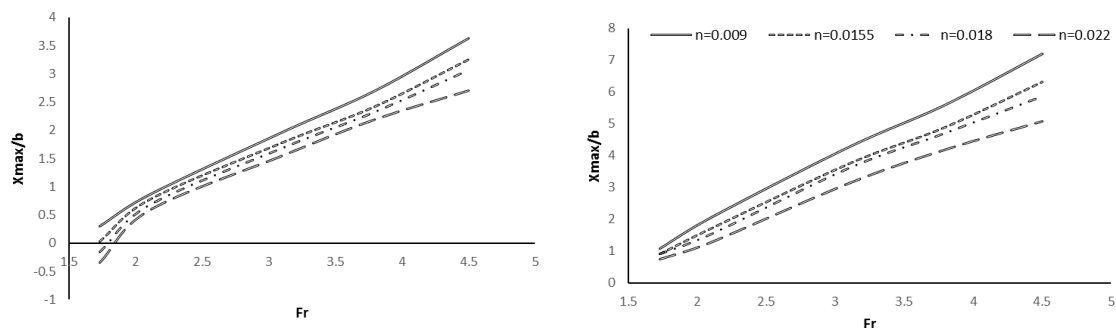
در شکل های ۶ تغییرات نسبت حداکثر ارتفاع موج در دیواره های داخلی و خارجی به عمق جریان قبل از ورودی جانبی $\frac{H_{max}}{h}$ به ازای اعداد فرود مختلف جریان در کانال آمده است.



شکل ۶- الف) نمودار حداکثر ارتفاع امواج در دیواره داخلی به ازای اعداد فرود مختلف جریان در کانال ب) نمودار حداکثر ارتفاع امواج در دیواره خارجی به ازای اعداد فرود مختلف جریان در کانال

در زبری های کمتر حداکثر افزایش ارتفاع امواج در دیواره خارجی تا حدود ۱/۸ برابر و در دیواره داخلی حدود ۱/۵ برابر عمق اولیه جریان است. با زبرتر شدن کانال، تا عدد فرود ۲/۱ ارتفاع امواج افزایش می یابد و تا حدود ۲/۲ در دیواره خارجی و ۱/۸ در دیواره داخلی می رسد و پس از آن نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ کاهش می یابد.

در شکل های ۷ نسبت بی بعد موقعیت اولین قله موج مورب در دیواره های خارجی و داخلی از محل ورودی جریان جانبی به عرض کانال (X_{Hmax}/b) ترسیم شده است.



شکل ۷- الف) نمودار موقعیت ارتفاع حداکثر امواج در دیواره داخلی به ازای اعداد فرود مختلف جریان در کانال ب) نمودار موقعیت ارتفاع حداکثر امواج در دیواره خارجی به ازای اعداد فرود مختلف جریان در کانال

با افزایش عدد فرود موقعیت قله موج به پایین دست جریان منتقل می شود و تا حدود ۵ تا ۷ برابر عرض کانال در دیواره داخلی و حدود ۲/۵ تا ۴ برابر در دیواره خارجی می رسد. همچنین افزایش زبری موجب کاهش میزان انتقال موقعیت قله موج بر اثر افزایش عدد فرود در کانال می گردد.

۶. نتیجه گیری

در مقاله حاضر تاثیر افزایش زبری کانال بر امواج مورب عرضی ایجاد شده در اثر ورود جریان جانبی ۹۰ درجه مستغرق به کانال با جریان فوق بحرانی بررسی گردید. در این مدل یک کانال با زبری های متفاوت و جریانی فوق بحرانی با اعداد فرود مختلف ایجاد و یک جریان جانبی با زاویه ۹۰ درجه به این کانال وارد می شود. بر اثر برخورد جریان جانبی به جریان اصلی امواج عرضی مورب در کانال ایجاد می گردد. ارتفاع و موقعیت امواج عرضی مورب به ازای تغییر اعداد فرود جریان و زبری کانال اندازه گیری شد. با افزایش زبری کانال امواج مورب به سرعت مستهلک و جریان نسبتاً یکنواختی برقرار شد اما با افزایش عدد فرود جریان اصلی و افزایش زبری کانال، از میزان استهلاک امواج کاسته شده و در جریان با عدد فرود ۴/۵، امواج تا انتهای کانال ادامه یافت. همچنین ملاحظه شد که با افزایش زبری، عمق نرمال نیز افزایش یافته به طوریکه عمق نرمال در پایین دست با زبرتر

شدن کانال و افزایش عدد فرود تا حدود ۲ برابر نسبت به حالتی که کف کانال صاف است افزایش می یابد. افزایش زبری و عدد فرود جریان در کانال نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ را افزایش داده و در زبری ۰/۰۲۲، در همه حالتها عمق ماکزیمم در دیواره خارجی حدود ۱/۷ برابر عمق اولیه می گردد. همچنین در شرایط کانال با زبری بسیار درشت تا حدود ۱۰ درصد حالت صاف، عمق بیشتری برای موج ماکزیمم مشاهده گردید. در زبری های کمتر حداکثر افزایش ارتفاع امواج در دیواره خارجی تا حدود ۱/۸ برابر و در دیواره داخلی حدود ۱/۵ برابر عمق اولیه جریان است. با زبرتر شدن کانال، تا عدد فرود ۲/۱ ارتفاع امواج افزایش می یابد و تا حدود ۲/۲ در دیواره خارجی و ۱/۸ در دیواره داخلی می رسد و پس از آن نسبت $\frac{H_{max}}{h}$ کاهش می یابد. با افزایش عدد فرود موقعیت قله موج به پایین دست جریان منتقل می شود و تا حدود ۵ تا ۷ برابر عرض کانال در دیواره داخلی و حدود ۲/۵ تا ۴ برابر در دیواره خارجی می رسد. همچنین افزایش زبری موجب کاهش میزان انتقال موقعیت قله موج بر اثر افزایش عدد فرود در کانال می گردد.

۷. منابع

1. Bowers CE. (1950), "Hydraulic model studies for whitening field naval air station". Part V; Studies of open channel junctions. Saint Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Project Report No. 24.
2. Behlke CE, Pritchett HD.(1966), "Design of supercritical flow control junctions". Highway Research Record No. 123. Highway Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
3. Rice CE. (1985), "Open channel junctions with supercritical flow". US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-14.
4. Weber, L. J., Shumate, E. D., and Mawer, N. (2001), "Experiments on Flow at a 90° Open-Channel Junction". Journal of Hydraulic. Engineering," 127(5), pp 340-350.

۵. مشرفی، ع و جعفرزاده، م. ر.، ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی تاثیر برخورد جریان جانبی تحت فشار به جریان اصلی فوق بحرانی در کانال باز، یازدهمین

کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

6. Yuen Y H K, 1989, A study of Boundary Shear Stress, Flow Resistance and Momentum Transfer in Open Channels with Simple and Compound Trapezoidal Cross-section. PhD Thesis, Univ. of Birmingham, Birmingham, England.
7. Tzelepis V, Moutsopoulos K N, Papaspyros J N and Tsihrantzis V A, 2015. Experimental investigation of flow behavior in smooth and rough artificial fractures. *Journal of Hydrology* 521:108-118.
8. Knight D W and Macdonald J A, 1979, "Open channel flow with varying bed roughness". *Journal of Hydraulics Division* 105(9):1167-1183.
9. Alhamid A I, 1991, "Boundary shear stress and velocity distributions in differentially roughened trapezoidal open channels", PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, England.

۱۰. تدین فر، ح و فغفور مغربی، م، ۱۳۸۸، اثر توزیع المانهای زبری بر ضریب زبری مانینگ n ، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز،

دانشگاه شهید چمران اهواز

11. Chow, V. T, 1959, "open channel hydraulics", *New York, Mc Graw-Hill Book company, Inc.*
12. Ladson, A. and Anderson, B. (2000), "Towards an Australian Handbook of Stream Roughness Coefficients", *New York, Mc Graw-Hill Book company, Inc*
13. Parshall, R. L. 1950, "Measuring Water in Irrigation Channel Parshall Flumes and small Weirs", *U.S. Soil Conservation Service*

۱۴. جعفرزاده، م. ر.، ۱۳۸۷، مکانیک رودخانه، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد