



دانشگاه گورگان
فصلکده مهندسی عمران

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد نوزدهم، شماره سوم، ۱۳۹۱

<http://jwfst.gau.ac.ir>

مدل ریاضی شبه دوبعدی تخمین دبی جریان در سرریزهای لبه تیز مرکب

عبدالرضا ظهیری*

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۸

چکیده

سرریزها به‌عنوان مهم‌ترین سازه‌های اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های آبیاری و زهکشی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. سرریزهای لبه‌تیز معمولی از نظر دقت اندازه‌گیری دبی جریان دارای محدودیت بوده و به همین دلیل به تازگی سرریزهای لبه‌تیز با مقطع مرکب^۱ (ترکیبی) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اندازه‌گیری دقیق جریان در محدوده وسیعی از دبی‌ها از جمله موارد مزیت این گونه سرریزها می‌باشد. در مطالعات محققان مختلف، مجموع دبی‌های سرریزهای ساده که از روابط معمول سرریزهای لبه‌تیز محاسبه می‌شود، به‌عنوان دبی کل سرریز مرکب در نظر گرفته شده است. در این مقاله از ایده تشابه هیدرولیک جریان در سرریزهای مرکب با هیدرولیک کانال‌های مرکب استفاده شده و به کمک مدل ریاضی شبه دوبعدی توزیع عرضی سرعت، دبی جریان این گونه سرریزها محاسبه شده است. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که خطای نسبی نتایج روابط معمول سرریزهای ساده در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی بیش از ۸ درصد می‌باشد در حالی که این خطا برای نتایج مدل ریاضی شبه دوبعدی حدود ۱ درصد است.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری دبی، سرریزهای لبه‌تیز مرکب، مدل ریاضی شبه دوبعدی، توزیع عرضی دبی

1- Compound sharp crested weirs

* مسئول مکاتبه: zahiri_reza@yahoo.com

مقدمه

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های آزمایشگاهی، سدهای مخزنی و شبکه‌های آبیاری دارای اهمیت زیادی است. به این منظور از سازه‌های مختلفی مانند دریچه، پارشال فلوم و سرریز استفاده می‌شود. سرریزها از مهم‌ترین سازه‌های اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان بوده و کاربرد گسترده‌ای در اندازه‌گیری آزمایشگاهی و صحرایی دبی جریان دارند. این سازه‌های نرمال به دو صورت لبه‌تیز و لبه‌پهن می‌باشند که در سرریزهای لبه‌تیز، ضخامت تاج ۱ تا ۲ میلی‌متر است. تاکنون مطالعات بسیار زیادی در زمینه هیدرولیک جریان در این سرریزها انجام شده که تحقیقات باس (۱۹۸۹)، سوامی و همکاران (۱۹۹۸)، برقی و همکاران (۱۹۹۹)، جانسون (۲۰۰۰)، کلمنس و همکاران (۲۰۰۱) و آیدین و همکاران (۲۰۰۲) قابل اشاره است. اگرچه سرریزهای لبه‌تیز ساده دارای تئوری محاسباتی مشخصی بوده و روابط و جداول زیادی برای محاسبه دبی جریان آنها ارائه شده است، اما دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. به طور مثال سرریزهای لبه‌تیز مثلثی اگرچه دبی جریان را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کنند، اما فقط برای دبی‌های کم مناسب بوده و برای تخلیه‌ی دبی‌های بالا کارایی کمتری دارند.

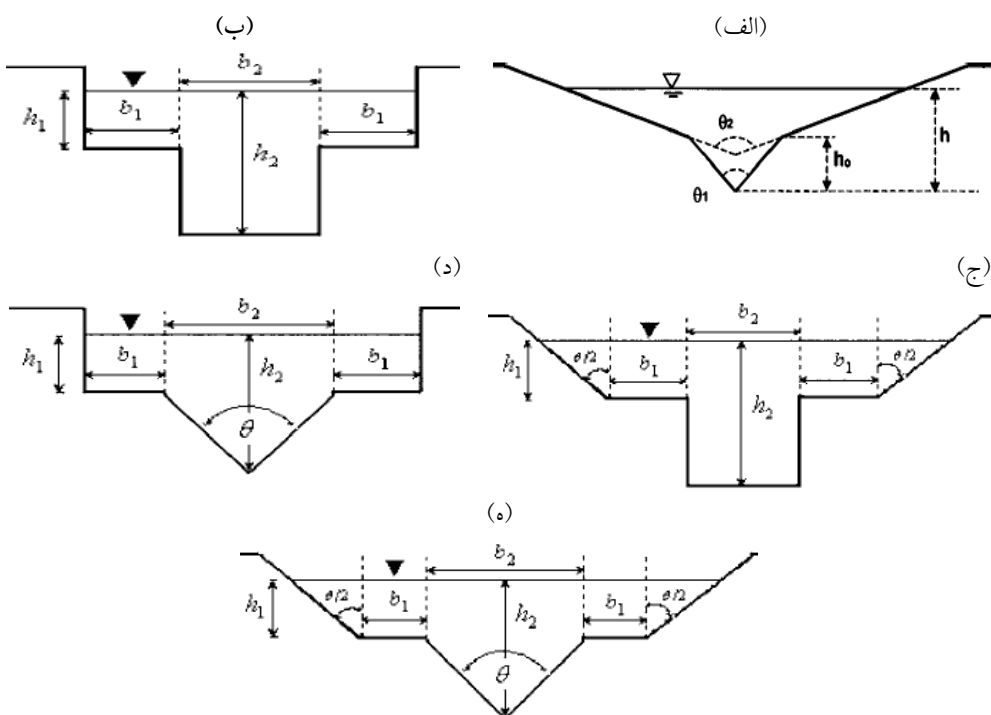
برای افزایش کارایی سرریزهای ساده، راه‌حل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. نجم و همکاران (۲۰۰۲) از ترکیب یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی و یک دریچه کشویی (سیستم سرریز-دریچه) برای جلوگیری از رسوب‌گذاری در جلوی سرریز و نیز عبور آسان اجسام شناور استفاده کردند. این سیستم برای تخلیه سیلاب کارایی بهتری نسبت به کاربرد مجزای سرریز یا دریچه دارد. تحقیقات فرو (۲۰۰۰)، هیای و همکاران (۲۰۰۸) و شهابی و همکاران (۲۰۱۱) در زمینه هیدرولیک جریان و رسوب در سیستم سرریز-دریچه قابل اشاره است. به تازگی گزینه ترکیب سرریزها با شکل‌های مختلف کاربرد زیادی پیدا نموده که به آنها سرریزهای لبه‌تیز مرکب گفته می‌شود. تحقیقات انجام شده در زمینه این گونه سرریزها تقریباً محدود می‌باشد. اولین بار سازمان احیای اراضی امریکا^۱ (۱۹۶۳) از یک سرریز لبه‌تیز مثلثی-مستطیلی برای اندازه‌گیری جریان استفاده نمود. مزیت مهم این گونه سرریزها، دقت مناسب در اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آبی تا سیلاب) است. یاسی و عباسپور (۲۰۰۵) با بررسی جریان در سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه راس ۹۰ درجه در حالت با و بدون فشردگی جانبی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح

1- United States Bureau of Reclamation (USBR)

آب روی سرریز و در محدوده تداخل جریان در مرز سرریزهای مثلثی و مستطیلی، ضریب دبی به صورت متناوب افزایش و کاهش می‌یابد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی آزمایشگاهی یک سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی (شکل ۱-الف)، این نوع سرریز را برای استفاده در سدهای رسوبگیر در حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد نمودند. انتخاب این نوع سرریز به دلیل پیوستگی رابطه دبی-اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز است. این سرریز برای اندازه‌گیری هیدروگراف رواناب و بررسی تاثیر گزینه‌های مختلف پوشش گیاهی در کاهش رواناب و فرسایش خاک حوضه‌های کوهستانی طراحی و اجرا شده است. با توجه به تغییرات شدید هیدروگراف دبی رواناب از شروع بارش تا خاتمه سيل، کاربرد این سرریز بسیار مناسب می‌باشد، به این صورت که از سرریز مثلثی پایین برای اندازه‌گیری دقیق دبی‌های کم و از سرریز مثلثی بالایی برای اندازه‌گیری دقیق دبی‌های بالا (دبی اوج هیدروگراف) استفاده می‌شود. پیراتیان و همکاران (۲۰۰۶) نیز با بررسی آزمایشگاهی همین نوع سرریز مرکب با زوایای راس ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه، رابطه دقیقی برای محاسبه دبی جریان سرریز مرکب مثلثی-مثلثی ارائه نمودند. جان و همکاران (۲۰۰۶) با انجام یک سری آزمایش، دبی جریان برای چهار نوع سرریز لبه‌تیز مرکب را اندازه‌گیری نمودند. در این آزمایش‌ها، از ترکیب سرریزهای مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-دو زونقه‌ای، مثلثی-مستطیلی و مثلثی-دو زونقه‌ای استفاده شده است (شکل‌های ۱-ب تا ۱-ه). محدودیت این چهار نوع سرریز مرکب این است که به دلیل ایجاد ناپیوستگی در منحنی دبی-اشل سرریز، اندازه‌گیری تراز سطح آب در محل اتصال سرریزهای پایین و بالا دارای حساسیت زیادی بوده و محاسبه دقیق دبی در این ناحیه غیرممکن است. در مطالعات فوق برای محاسبه دبی جریان و استخراج رابطه دبی-اشل در سرریزهای مرکب از مجموع دبی سرریزهای ساده (به صورت ترکیب خطی) به عنوان دبی کل سرریز مرکب استفاده شده است. محمدی و همکاران (۲۰۱۰) دبی جریان در سرریزهای مرکب لبه‌تیز را به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی محاسبه نمودند. دقت این نتایج تقریباً معادل نتایج روابط تئوری سرریزهای لبه‌تیز ساده گزارش شده است.

با بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه سرریزهای لبه‌تیز و به‌ویژه سرریزهای مرکب، مشخص شده است که اغلب این مطالعات یا به صورت آزمایشگاهی و یا بر اساس روابط تئوری سرریزها انجام شده و مطالعات بسیار کمی بر اساس مدل‌سازی ریاضی پدیده‌های حاکم بوده است. در این زمینه مطالعه رامامورتی و همکاران (۲۰۰۹) در شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان در سرریزهای لبه‌تیز ساده به کمک نرم‌افزار FLOW-3D قابل اشاره است. در این مقاله از ایده بهتری برای محاسبه دبی

سرریزهای لبه‌تیز مرکب استفاده شده است. در این ایده از تشابه هیدرولیک جریان در سرریزهای لبه‌تیز مرکب با هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب^۱ استفاده شده و به کمک مدل ریاضی شبه دویبعدی کانال‌های مرکب، ابتدا توزیع عرضی سرعت روی سرریز مرکب حل شده و سپس دبی جریان در انواع مختلف سرریزهای مرکب محاسبه شده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل ۱- سرریزهای لبه‌تیز مرکب مورد استفاده در تحقیقات مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) و جان و همکاران (۲۰۰۶).
 الف) مثلثی - مثلثی، ب) مستطیلی - مستطیلی، ج) مستطیلی - دوزنقه‌ای، د) مثلثی - مستطیلی و ه) مثلثی - دوزنقه‌ای).

1- Compound channels

مواد و روش‌ها

مبانی مدل ریاضی شبه دوبعدی: کانال‌های مرکب شامل یک مقطع اصلی و یک یا دو دشت سیلابی هستند که به دلیل انتقال موثر دبی جریان در شرایط کم‌آبی و سیلاب دارای اهمیت زیادی بوده به طوری که هیدرولیک جریان این کانال‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. به دلیل تغییرات شدید عمق جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز اختلاف ضرایب زبری، تنش برشی قابل ملاحظه‌ای در مرز اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی ایجاد شده و باعث کاهش دبی کل کانال می‌شود. به همین دلیل استفاده از مجموع دبی‌های مقاطع ساده و سیلابی که به کمک روابط ساده مقاومت جریان (فرمول مانینگ یا شزی) به دست آمده‌اند، به عنوان دبی کل کانال قابل قبول نمی‌باشد. به دلیل در نظر نگرفتن تنش برشی عرضی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در این حالت، دبی جریان به دست آمده همواره از دبی واقعی کانال مرکب بیشتر است. محققان روش‌های زیادی برای تخمین دقیق دبی کل جریان در کانال‌های مرکب ارائه داده‌اند که مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت (۱۹۸۸) از کارآمدترین این روش‌ها است.

شیونو و نایت (۱۹۸۸) برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب مستقیم و تعیین دبی کل کانال، معادله‌ی دیفرانسیل متوسط در عمق زیر را ارائه نمودند:

$$\rho g H S_0 - \rho \frac{f}{\lambda} U_d^2 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{s^2}\right)} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{\lambda}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho \overline{UV})_d] \quad (1)$$

که u_d سرعت متوسط در عمق، ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل، λ ضریب بدون بعد لزجت جریان آشفته (لزجت گردابه‌ای)، f ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ، s شیب جانبی کانال، H عمق جریان در هر گره محاسباتی، S_0 شیب کف کانال و y جهت عرضی است. مقدار ضریب λ معمولاً در محدوده ۰/۰۷ تا ۰/۵۰ تغییر می‌کند، اما با توجه به این که معادله دیفرانسیل فوق به این ضریب حساس نیست، در نظر گرفتن یک ضریب ثابت در کل مقطع نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد (ظهیری و همکاران، ۲۰۰۹). عبارت سمت راست معادله فوق، مربوط به اثر جریان ثانویه است که در آن، \bar{U} و \bar{V} به ترتیب سرعت‌های متوسط زمانی در جهت‌های طول و عرض می‌باشد. طبق مطالعات اروین و همکاران (۲۰۰۰) و اسپونر و شیونو (۲۰۰۳)، جریان ثانویه معمولاً در کانال‌های پیچانرود مهم بوده و در کانال‌های مستقیم عریض تقریباً ناچیز است. به همین دلیل در این پژوهش عبارت سمت

راست معادله‌ی ۱ برابر صفر فرض شده است. در شکل ۲ پارامترهای این معادله در یک کانال مرکب نشان داده شده است.

معادله (۱) یک معادله دیفرانسیل غیرخطی از نوع مقادیر مرزی است که برای حل تحلیلی یا عددی، نیاز به معرفی دو شرط مرزی دارد. شرایط مرزی این معادله، صفر بودن مقادیر سرعت‌ها در دو لبه ابتدایی و انتهایی سطح آب است. به دلیل منظم بودن کانال‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، حل تحلیلی ارجحیت دارد. حل تحلیلی معادله بالا با فرض عدم دخالت اثر جریان ثانویه در دو حالت عمق جریان ثابت و متغیر به صورت زیر است (شیونو و نایت، ۱۹۸۸):
برای ناحیه‌هایی که عمق جریان روی سرریز ثابت است:

$$u_d = \sqrt{A_r e^{\eta H} + A_f e^{-\eta H} + \frac{\lambda g S_0 H}{f}} \quad (2)$$

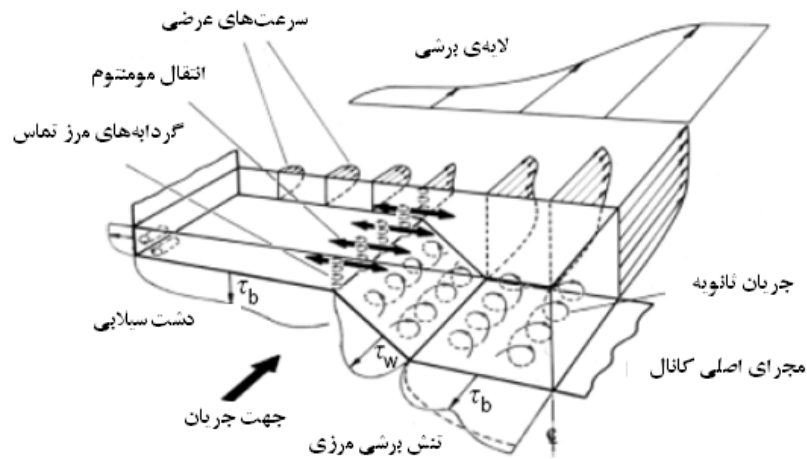
برای ناحیه‌هایی که عمق جریان روی سرریز متغیر است (شیب‌های جانبی):

$$u_d = \sqrt{A_r H^\psi + A_f H^{-\psi-1} + \psi H} \quad (3)$$

در این روابط، متغیرهای مورد استفاده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{f}{\lambda}}}}{H}, \psi = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s \sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{\lambda f}} - \frac{1}{2}, \omega = \frac{g S_0}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{f}{\lambda} - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{\lambda}}} \quad (4)$$

ضرایب مجهول A در روابط فوق به کمک شرایط مرزی قابل محاسبه هستند.



شکل ۲- نمایش پارامترهای معادله‌ی دیفرانسیل (۱) در یک کانال مرکب مستقیم.

روابط هیدرولیکی سرریزهای لبه‌تیز: برای محاسبه دبی جریان در سرریزهای لبه‌تیز ساده، روابط هیدرولیکی با دقت مناسبی ارائه شده است. مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) و جان و همکاران (۲۰۰۶) بر اساس این روابط، دبی جریان در سرریزهای لبه‌تیز مرکب نشان داده شده در شکل ۱ را محاسبه نمودند. برای سرریز مرکب مثلثی- مثلثی رابطه‌ی زیر ارائه شده است (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۵):

$$Q_t = \frac{\Lambda}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) h^{2.5} + \frac{\Lambda}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h-h_1)^{2.5} - \frac{\Lambda}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) (h-h_1)^{2.5} \quad (5)$$

که Q_t دبی کل سرریز، C_{td} ضریب آگذری سرریز مثلثی، θ_1 و θ_2 به ترتیب زوایای سرریز مثلثی پایینی و بالایی، h عمق جریان روی سرریز، h_1 ارتفاع سرریز مثلثی پایینی و g شتاب ثقل می‌باشد. در سرریزهای مثلثی ساده، ضریب آگذری تابع زاویه‌ی سرریز بوده و به صورت زیر ارائه شده است (موسسه تحقیقات LMNO، ۱۹۹۹):

$$C_{td} = 0.6072 - 0.000874\theta + 6.1 \times 10^{-6} \theta^2 \quad (6)$$

که θ بر حسب درجه است. برای سرریزهای مستطیلی - مستطیلی، مستطیلی - مستطیلی - دوزنقه‌ای، مثلثی - مستطیلی و مثلثی - دوزنقه‌ای به ترتیب روابط زیر توسط جان و همکاران (۲۰۰۶) ارائه شده است:

$$Q_t = \frac{2}{3} C_{rd1} \sqrt{2g} (2b_1) h_1^{1.5} + \frac{2}{3} C_{rd2} \sqrt{2g} b_2 h_2^{1.5} \quad (7)$$

$$Q_t = \frac{2}{3} C_{rd2} \sqrt{2g} b_2 h_2^{1.5} + \frac{2}{3} C_{rd1} \sqrt{2g} (2b_1) h_1^{1.5} + \frac{\lambda}{15} C_{td} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_e^{2.5} \quad (8)$$

$$Q_t = \frac{\lambda}{15} C_{td} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h_{re}^{2.5} - h_{re}^{2.5}) + \frac{2}{3} C_{rd} \sqrt{2g} (2b_1) h_1^{1.5} \quad (9)$$

$$Q_t = \frac{\lambda}{15} C_{td} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h_{re}^{2.5} - h_{re}^{2.5}) + \frac{2}{3} C_{rd} \sqrt{2g} (2b_1) h_1^{1.5} + \frac{\lambda}{15} C_{td} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_e^{2.5} \quad (10)$$

در روابط فوق C_{rd} ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز مستطیلی، h_e ارتفاع یا بار موثر آب روی سرریز بوده و بقیه پارامترها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. ارتفاع موثر روی سرریز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_e = h + k_h \quad (11)$$

که k_h مقدار اصلاحی برای در نظر گرفتن اثرات لزجت و کشش سطحی آب است. این مقدار تابع زاویه سرریز بوده و به ازای زوایای ۲۰ تا ۱۰۰ درجه در محدوده ۲/۷۴ تا ۰/۸ میلیمتر تغییر می‌کند (باس، ۱۹۸۹). برای زاویه ۹۰ درجه مورد استفاده در تحقیق جان و همکاران (۲۰۰۶)، مقدار k_h تقریباً برابر ۰/۸ میلی‌متر به دست می‌آید.

جان و همکاران (۲۰۰۶) از رابطه زیر برای محاسبه ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز مستطیلی ساده استفاده نمودند:

$$C_{rd} = \frac{0.611 + 2.23 \left(\frac{B}{b} - 1\right)^{1.7}}{1 + 3.8 \left(\frac{B}{b} - 1\right)^{1.7}} + \frac{0.075 - 0.01 \left(\frac{B}{b} - 1\right)^{1.46}}{1 + 4.8 \left(\frac{B}{b} - 1\right)^{1.46}} \frac{h}{P} \quad (12)$$

که B عرض کانال و P ارتفاع سرریز است.

ضریب آبگذری سرریز مثلثی در تحقیق جان و همکاران (۲۰۰۶) و به ازای زاویه ۹۰ درجه، از رابطه (۴) حدود ۰/۵۷۹ به دست می‌آید.

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده: برای بررسی دقت نتایج روابط معمول سرریزهای لبه‌تیز ساده و نیز واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی شبه‌دوبعدی پیشنهادی در این پژوهش، از نتایج آزمایشگاهی دبی جریان در سرریزهای مرکب حاصل از آزمایش‌های مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) و جان و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شده است. در مطالعه مارتینز و همکاران، عرض کانال ۱ متر، تراز تاج سرریز ۱/۲۶ متر، ارتفاع و زاویه سرریز مثلثی پایینی به ترتیب ۰/۰۸ متر و ۹۰ درجه و زاویه سرریز مثلثی بالایی ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه در نظر گرفته شده است. حداکثر دبی جریان در این آزمایش ۱۶ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

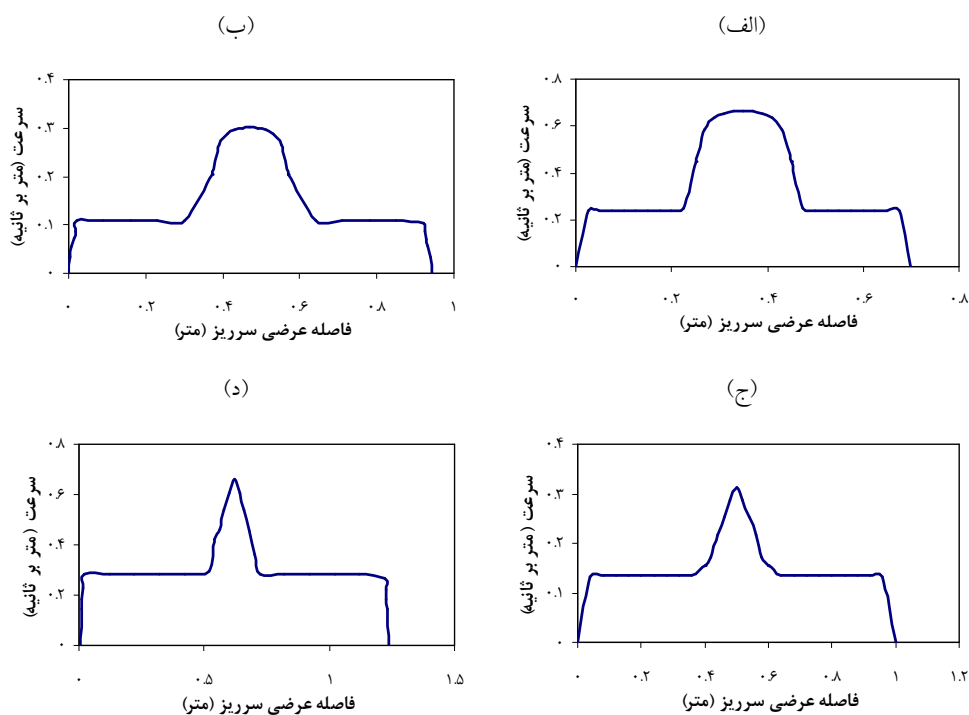
در تحقیق جان و همکاران (۲۰۰۶) از ۲ کانال مستطیلی استفاده شده است. کانال اولی دارای طول ۱۱ متر، شیب طولی ۰/۰۰۱، عرض ۱/۴۹ متر و ارتفاع ۰/۲۵ متر و کانال دومی دارای طول ۱۹ متر، شیب طولی ۰/۰۰۵، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر می‌باشد. در این آزمایش‌ها ارتفاع سرریز پایینی ۰/۱ متر و عمق جریان روی سرریز (h_p در شکل ۱) از ۰/۱۱ تا ۰/۱۸۸ متر متغیر است. عرض سرریز پایینی (b_p) برابر ۰/۲۰ متر و عرض سرریز بالایی (b_1) در کانال اول برابر ۰/۲۰ و ۰/۵۰ متر و در کانال دومی برابر ۰/۴۰ متر در نظر گرفته شده است. در این آزمایش‌ها حداکثر دبی جریان حدود ۷۶ لیتر بر ثانیه بوده و زاویه سرریز مثلثی در این تحقیق ۹۰ درجه می‌باشد.

نتایج

در این مقاله، با فرض تشابه هیدرولیک جریان در سرریزها و کانال‌های مرکب، معادله دیفرانسیل (۱) به کمک روابط (۲) تا (۴) به صورت تحلیلی حل شده است. با حل توزیع عرضی سرعت در فاصله‌ی مناسبی از بالادست سرریز، دبی جریان عبوری از سرریزهای مرکب به کمک انتگرال‌گیری عددی محاسبه شده است. برای حل توزیع عرضی سرعت، ضرایب اصطکاک دارسی-ویسباخ باید به کمک واسنجی مدل ریاضی محاسبه شوند. برای انجام این کار ابتدا با استفاده از داده‌های یک آزمایش، مقدار ضریب زبری مانینگ کانال واسنجی شده و سپس با ثابت فرض نمودن مقدار این ضریب در بقیه شرایط آزمایشگاهی، دبی سرریزهای مرکب محاسبه می‌شود. با توجه به مقدار ضریب زبری مانینگ و عمق جریان در عرض سرریز، ضرایب اصطکاک در عرض سرریز از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شوند:

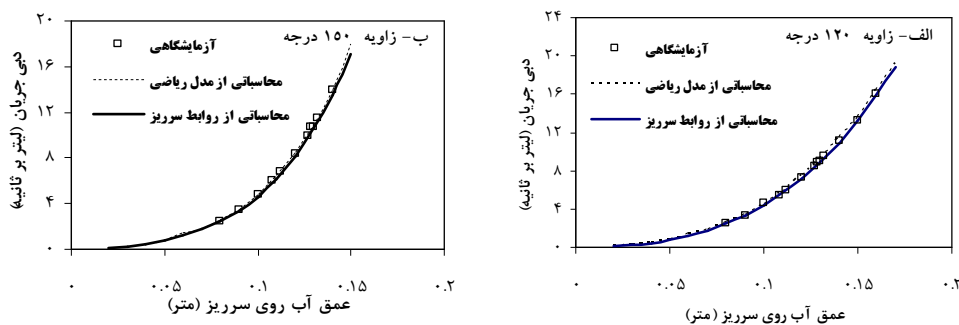
$$f = \frac{\lambda g n^2}{h^{1/3}} \quad (13)$$

که n ضریب زبری مانینگ است. برای هر کانال آزمایشگاهی (با تغییر شیب طولی) و هر نوع سرریز مرکب مورد استفاده باید ضریب زبری مانینگ به کمک واسنجی مدل ریاضی محاسبه شود. به‌طور مثال در شکل ۳، نتایج توزیع عرضی سرعت به‌دست آمده از حل مدل ریاضی در سرریزهای تحقیق جان و همکاران نشان داده شده است. در کلیه این نتایج، عمق جریان روی سرریز ۰/۱۲۱ متر و شیب طولی کانال ۰/۰۰۱ می‌باشد.

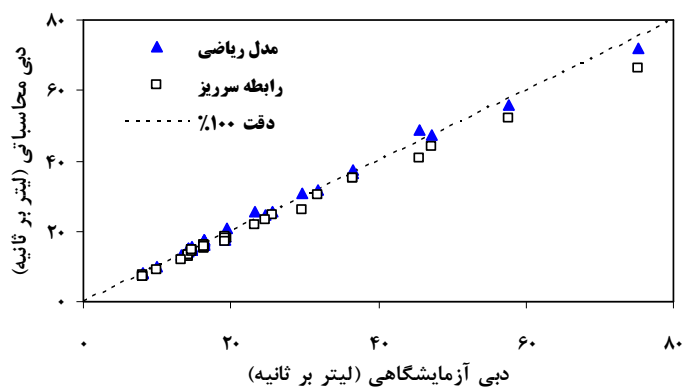


شکل ۳- نتایج مدل ریاضی شبه دوبعدی توزیع عرضی سرعت در سرریزهای مرکب جان و همکاران (۲۰۰۶).
الف) مستطیلی - مستطیلی، ب) مستطیلی - دوزنقه‌ای، ج) مثلثی - مستطیلی و د) مثلثی - دوزنقه‌ای.

نکته قابل تامل در شکل ۳ این است که در سرریزهای مرکب مستطیلی و دوزنقه، گرادیان عرضی سرعت و در نتیجه تنش برشی عرضی در مقایسه با سرریزهای مرکب مثلثی بسیار شدیدتر است. با استفاده از روابط هیدرولیکی سرریزها (روابط ۵ تا ۱۲) و با توجه به مشخصات هندسی کانال‌های آزمایشگاهی مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) و جان و همکاران (۲۰۰۶)، دبی جریان در سرریزهای مرکب محاسبه شده است. این نتایج در مقایسه با نتایج حل معادله‌ی دیفرانسیل (۱) و نیز داده‌های آزمایشگاهی مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) و جان و همکاران (۲۰۰۶) به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در سرریزهای مرکب مثلثی، نتایج به دست آمده از هر دو روش محاسباتی دارای دقت مناسبی می‌باشد که بیانگر اهمیت کمتر تنش برشی ایجاد شده در مرز تماس بخش پایینی سرریز با بخش بالایی آن است. در سرریزهای مرکب جان و همکاران (۲۰۰۶) و به ویژه برای سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای، تنش برشی در مرز تماس بخش‌های پایینی و بالایی سرریز قابل توجه می‌باشد.



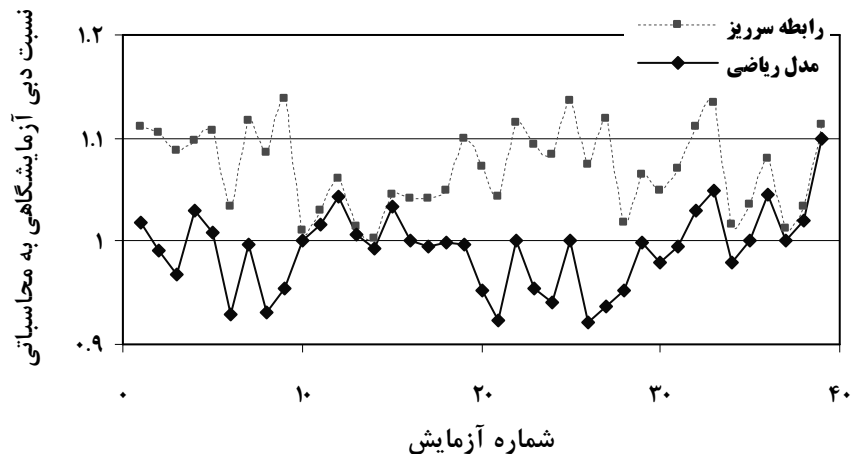
شکل ۴- مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی دبی- اشل سرریزهای مرکب مثلثی (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۵- مقایسه نتایج محاسباتی (مدل ریاضی و روابط سرریزها) با داده‌های آزمایشگاهی جان و همکاران (۲۰۰۶).

مشاهده می‌شود که در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی جان و همکاران (۲۰۰۶)، نتایج مدل ریاضی از دقت بالاتری برخوردار است. با تحلیل آماری این نتایج مشخص شده که خطای نسبی متوسط نتایج مدل ریاضی کمتر از ۱ درصد است در حالی که درصد خطای نسبی نتایج محاسباتی روابط هیدرولیکی سرریزها به‌طور متوسط بیش از ۸ درصد می‌باشد. همچنین بر خلاف نتایج محاسباتی حاصل از روابط هیدرولیکی سرریزها که همگی کوچک‌تر از داده‌های آزمایشگاهی است، نتایج حاصل از حل تحلیلی مدل ریاضی در اطراف مقادیر آزمایشگاهی پراکنده شده است.

در شکل ۶ همین مقایسه به‌صورت دیگری نشان داده شده است. مطابق این شکل، نسبت نتایج نسبت دبی‌های آزمایشگاهی به دبی‌های محاسباتی از روابط سرریزهای ساده همواره از یک بزرگ‌تر است. همچنین برای حدود ۳۰ درصد داده‌ها، این نسبت بزرگ‌تر از ۱/۱ (یعنی خطای ۱۰ درصد) می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه‌ی نسبت دبی محاسباتی (مدل ریاضی و روابط سرریزها) به دبی آزمایشگاهی جان و همکاران (۲۰۰۶).

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای محاسبه دقیق دبی جریان در سرریزهای لبه‌تیز مرکب (ترکیبی) از یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی استفاده شده و با نتایج آزمایشگاهی و نیز روابط هیدرولیکی معمول سرریزهای لبه‌تیز مقایسه شده است. یافته‌های مهم این پژوهش عبارتند از:

۱- نتایج مدل ریاضی پیشنهادی دارای دقت بهتری نسبت به روابط معمول سرریزهای لبه‌تیز است. با تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های جان و همکاران (۲۰۰۶) مشخص شده که خطای نسبی متوسط نتایج مدل ریاضی کمتر از ۱ درصد می‌باشد در حالی که درصد خطای نسبی نتایج محاسباتی از روابط تئوری سرریزها به‌طور متوسط بیش از ۸ درصد است.

۲- در تحقیق آزمایشگاهی جان و همکاران (۲۰۰۶)، روابط معمول هیدرولیکی در کلیه شرایط دبی جریان سرریزهای مرکب را کمتر از واقع تخمین می‌زنند، در حالی که تخمین نتایج به کمک مدل ریاضی دارای روند بهتری است.

۳- اگرچه نتایج مدل ریاضی این تحقیق دارای دقت بهتری نسبت به نتایج روابط معمول سرریزها است، اما روابط معمول از نظر کاربرد مزیت دارد چون به‌صورت صریح و فقط بر اساس عمق جریان روی سرریز، دبی جریان عبوری از سرریز قابل محاسبه می‌باشد. برای کاربردی نمودن این تحقیق،

الگوریتم مدل ریاضی پیشنهادی در محیط اکسل کدنویسی شده و به سادگی توسط کاربران قابل استفاده است.

منابع

1. Negm, A.M., Al-Brahim, A.M., and Alhamid, A.A. 2002. Combined-free flow over weirs and below gates. *J. Hydraul. Res.*, 40:3:359-365.
2. Aydin, I., Metin Ger, A., and Hincal, O. 2002. Measurement of small discharges in open channels by slit weir. *J. Hydraul. Eng.*, 128:2: 234-237.
3. Borghei, S.M., Jalili, M.R. and Ghodsian, M. 1999. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *J. Hydraul. Eng.*, 125:10:1051-1056.
4. Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures, 3rd ed., Int. Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, pp. 399.
5. Clemmens, A.J., Wahl, T.L., Bos, M.G. and Roplogle, J.A. 2001. Water measurement with flumes and weirs, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication 58, Wageningen, The Netherlands, pp. 382.
6. Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *J. Hydraul. Eng.*, 126:9: 653-669.
7. Ferro, V. 2000. Simultaneous flow over and under a gate. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 3: 190-193.
8. Hayawi, H. A., Yahia, A.A. and Hayawi, G.A. 2008. Free combined flow over a triangular weir and under rectangular gate. *Damascus Univ. J.*, 24:1:9:22.
9. Jan, C.D., Chang, C.D. and Lee, M.H. 2006. Discussion of "Design and calibration of a compound sharp-crested weir". *J. Hydraul. Eng.*, 132:8: 868-872.
10. Johnson, M.C. 2000. Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs. *Irrig. Sci.*, 19: 133-137.
11. LMNO Engineering, Research and Software, Ltd. 1999. Focus on open channel flow measurement: V-notch weirs. Newsletter, Vol. 1, Athens, Ohio.
12. Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T. and Lopez, J.G. 2005. Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *J. Hyd. Eng.*, 131:2:112-116.
13. Mohamadi, K., Roshani, M., and Hoseinzadeh, A. 2010. Prediction and comparison of flow discharges in compound sharp-crested weirs using theoretic formulas and artificial neural networks, 9th Iranian Hydraulic Conference, Tarbiat Modares University, Tehran.

14. Piratheepan, M., Winston, N.E.F. and Pathirana, K.P.P. 2006. Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs. *Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 3: 31-38.
15. Ramamurthy, A.S., Tadayon, R. and Chen, Z. 2009. Numerical simulation of sharp-crested weir flows. *J. Can. Civil Eng.*, 36: 9: 1530-1534.
16. Shahabi, M., Bidokhti, N., Dehghani, A.A. and Telvari, A. 2011. Experimental investigation of flow contraction on scour cone downstream of weir-gate structure. 6th National Civil Engineering Congress, Semnan, Iran.
17. Shiono, K., and Knight, D.W. 1988. Two dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd Int. Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan, Pp: 1-8.
18. Spooner, J. and Shiono, K. 2003. Compound meandering channels with overbank flow. *Water, Maritime and Energy*, 225-233.
19. Swamee, P.K., Ojha, C.S.P. and Kumar, S. 1998. Discharge equation for rectangular slots. *J. Hydraul. Eng.*, 124:9:973-974.
20. United States Bureau of Reclamation (USBR), 1963. Compound weir study, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505, pp. 34
21. Yasi, M., and Abbaspour, A. 2005. Flow over sharp-crested, truncated-triangular weirs. *The Scientific Journal of Agriculture*, 28:2:165-181.
22. Zahiri, A., Ayyoubzadeh, S.A. and Dahanzadeh, B. 2009. Numerical solution of velocity lateral distribution in rivers (Case study: Karoun river at Molasani station). *J. Agric. Sci. Natur. Resour.*, 16:2:273-283.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(3), 2012
<http://jwfst.gau.ac.ir>

Quasi-two dimensional mathematical model for prediction of flow discharge over compound sharp-crested weirs

*** A. Zahiri**

Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of
Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 2011-11-27; Accepted: 2012-5-7

Abstract

Water measurements play a pivotal role in the irrigation and drainage networks. Due to effective limitations of simple sharp crested weirs, compound sharp crested weirs have attracted the attention of scientists and civil engineers recently. With this kind of weirs, flow discharge is measured with a reasonable sensitivity over a wide flow range. In this paper, by assumption of flow similarity between compound sharp crested weirs and compound open channels, a new method based on numerical solution of a quasi-two-dimensional mathematical model has been proposed for discharge calculation of compound weir. The numerical results were compared with the experimental data of Jan et al. (2006) and the traditional method (theoretical equations of simple weirs). These comparisons revealed that the proposed method had nearly 1 percent error while the traditional method had more than 8 percent error.

Keywords: Flow measurement; Compound sharp crested weirs; Compound open channels; Quasi 2-D model.

*Corresponding Author; Email: zahiri_reza@yahoo.com