

مهار امواج جریان فوق بحرانی در خمها با تعبیه تبدیل باز شوونده در ورودی خم

- علیرضا شمخانیچیان، کارشناس ارشد مهندسی آب - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد،
shamkhalchian_alireza@yahoo.com
- محبوبه جمعهزاده، کارشناس ارشد مهندسی آب - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
- محمدرضا جعفرزاده، دانشیار گروه عمران - دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد،
Jafarzarad@um.ac.ir

خلاصه

در این مقاله جریان فوق بحرانی در کانال‌های خمیده مدلسازی می‌شود و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی رینر و هاگر و همچنین حل‌های تحلیلی ناپ و ایبن مقایسه می‌گردد سپس به منظور کاهش ارتفاع موج در دیوار خارجی کانال خمیده، از یک تبدیل بازشوونده کوچک در دیوار داخلی ورودی خم استفاده می‌شود. در این صورت امواج منفی ناشی از بازشدگی و امواج مثبت خم در دیواره بیرونی ترکیب می‌شوند. این مطالعات بر روی سه کانال با خمیدگی‌های مختلف انجام می‌گیرد. مطالعات عددی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از تبدیل بازشوونده با ضوابط و معیارهای بیان شده در این مقاله می‌توان شدت امواج را در سه خم مورد مطالعه تا حداکثر ۴۵٪ کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: کانال‌های خمیده، جریان فوق بحرانی، امواج مورب، تبدیل بازشوونده، روش Roe-TVD.

مقدمه

هنگامیکه یک جریان فوق بحرانی وارد کانال خمیده‌ای می‌شود، دسته‌ای از امواج مورب در خم توسعه پیدا می‌کنند. پیدا کردن شکل کلی، موقعیت و ارتفاع این امواج در دیواره‌ها مورد علاقه محققین متعددی بوده است از جمله کارمن و ناپ-ایبن با اعمال فرضیاتی، روابطی تحلیلی برای تعیین موقعیت امواج و ارتفاع سطح آب در خم ارائه کردند. [1]. در سالهای اخیر جریان فوق بحرانی در خمها عمدتاً به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده است، در این زمینه می‌توان به بررسی‌های آزمایشگاهی رینر و هاگر و همچنین مطالعات عددی ویانی و کالفی اشاره کرد، [2]، [3].

بطور کلی تولید و توسعه امواج در خمها در حالت رژیم فوق بحرانی به لحاظ مهندسی نامطلوب

است. بالا رفتن ارتفاع آب در قله امواج باندازه چندین برابر عمق جریان ورودی، ارتفاع دیواره‌های کانال را افزایش می‌دهد. بعلاوه این امواج در محدوده بزرگی از کانال پایین دست خم نیز توسعه پیدا می‌کنند و سطح آب را ناهموار می‌سازند، بنابراین ابداع روش‌هایی که به کمک آن‌ها از ارتفاع امواج کاسته شود و سطح هموارتری ایجاد گردد ارزش فراوانی خواهند داشت. برای نیل به این هدف، بلترامی و همکاران در سال ۲۰۰۷ با قراردادن موانع کوچکی، در کانال بالادست، از شدت امواج در خم کاستند، [4]. در این مقاله نیز طرح یک تبدیل بازشوونده کوچک در ورودی خم پیشنهاد شده است که امواج منفی تولید می‌کند، این امواج با امواج مثبت دیوار خارجی خم ترکیب شده و ارتفاع آنها را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند.

نتیجه گیری

در این تحقیق جریان فوق بحرانی در کانال‌های خمیده مدلسازی شد. بدین منظور از اطلاعات کانال خمیده رینر و هاگر با نسبت $r/b=15$ ، استفاده شد و نتایج روش عددی Roe-TVD با نتایج عددی HLL ویانی و کالفی و همچنین با داده‌ها و روابط آزمایشگاهی رینر و هاگر مقایسه شد. جواب‌های عددی علی‌الخصوص برای $Fr_0 < 4/5$ رضایت بخش بود. در ادامه به منظور کاهش شدت امواج در جریان فوق بحرانی خمها از یک تبدیل بازشوونده کوچک در دهانه دیوار داخلی ورودی خم استفاده شد تا با ترکیب امواج منفی ناشی از بازشدگی با امواج مثبت دیوار خارجی خم از شدت امواج کاسته شود. در این بررسی سه خم بانسبتهای ۲۰ و ۱۵ و $r/b=10$ مطالعه شد. نتایج عددی نشان داد که در این خمها ارتفاع امواج تا حداکثر ۴۵٪ کاهش پیدا کرد. با استفاده از تجربیات عددی و ضوابط و معیارهای مشخصات هندسی تبدیل بازشوونده بدست آمد و نشان داده شد که میزان بازشدگی بهینه به نسبت r/b خم، d/b در نظر گرفته شده و عدد فرود ورودی به خم بستگی دارد.

مهار امواج جریان فوق بحرانی در خمها با تعبیه تبدیل باز شونده در ورودی خم

علیرضا شمخالچیان¹، محبوبه جمعه زاده²، محمدرضا جعفرزاده³

1- کارشناس ارشد مهندسی آب- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

2- کارشناس ارشد مهندسی آب- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشیار گروه عمران- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

shamkhalchian_alireza@yahoo.com

Jafarzad@um.ac.ir

خلاصه

در این مقاله جریان فوق بحرانی در کانالهای خمیده مدلسازی می‌شود و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی رینر و هاگر و همچنین حل‌های تحلیلی ناپ و این مقایسه می‌گردد سپس به منظور کاهش ارتفاع موج در دیوار خارجی کانال خمیده، از یک تبدیل بازشونده کوچک در دیوار داخلی ورودی خم استفاده می‌شود، در این صورت امواج منفی ناشی از بازشدگی و امواج مثبت خم در دیواره بیرونی ترکیب می‌شوند. این مطالعات بر روی سه کانال با خمیدگی‌های مختلف انجام می‌گیرد. مطالعات عددی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از تبدیل بازشونده با ضوابط و معیارهای بیان شده در این مقاله می‌توان شدت امواج را در سه خم مورد مطالعه تا حداکثر 45٪ کاهش داد.

کلمات کلیدی: کانال‌های خمیده، جریان فوق بحرانی، امواج مورب، تبدیل بازشونده، روش Roe-TV D.

1. مقدمه

هنگامیکه یک جریان فوق بحرانی وارد کانال خمیده‌ای می‌شود، دسته‌ای از امواج مورب در خم توسعه پیدا می‌کنند. پیدا کردن شکل کلی، موقعیت و ارتفاع این امواج در دیواره‌ها مورد علاقه محققین متعددی بوده است از جمله کارمن و ناپ-این با اعمال فرضیاتی، روابطی تحلیلی برای تعیین موقعیت امواج و ارتفاع سطح آب در خم ارائه کردند، [1]. در سالهای اخیر جریان فوق بحرانی در خم‌ها عمدتاً به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده است، در این زمینه می‌توان به بررسی‌های آزمایشگاهی رینر و هاگر و همچنین مطالعات عددی ولیانی و کالفی اشاره کرد، [2]، [3]. بطور کلی تولید و توسعه امواج در خم‌ها در حالت رژیم فوق بحرانی به لحاظ مهندسی نامطلوب است. بالا رفتن ارتفاع آب در قله امواج باندازه چندین برابر عمق جریان ورودی، ارتفاع دیواره‌های کانال را افزایش می‌دهد. بعلاوه این امواج در محدوده بزرگی از کانال پایین دست خم نیز توسعه پیدا می‌کنند و سطح آب را ناهموار می‌سازند، بنابراین ابداع روش‌هایی که به کمک آن‌ها از ارتفاع امواج کاسته شود و سطح هموارتری ایجاد گردد ارزش فراوانی خواهند داشت. برای نیل به این هدف، بلترامی و همکاران در سال 2007 با قراردادن موانع کوچکی، در کانال بالادست، از شدت امواج در خم کاستند، [4]. در این مقاله نیز طرح یک تبدیل بازشونده کوچک در ورودی خم پیشنهاد شده است که امواج منفی تولید می‌کند، این امواج با امواج مثبت دیوار خارجی خم ترکیب شده و ارتفاع آن‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند.

2. هیدرولیک جریان فوق بحرانی در خمها و بازشدگی‌ها

هنگامی که یک جریان فوق بحرانی وارد کانال خمیده‌ای می‌شود بر اثر انحنای دیواره‌های کانال، مجموعه‌ای از امواج مورب در سطح آب به وجود می‌آیند. در شکل 1، امواج فوق بحرانی مثبت و منفی در یک خم ترسیم شده است. اولین فراز موج در دیواره خارجی با زاویه θ_{max} از ورودی خم و

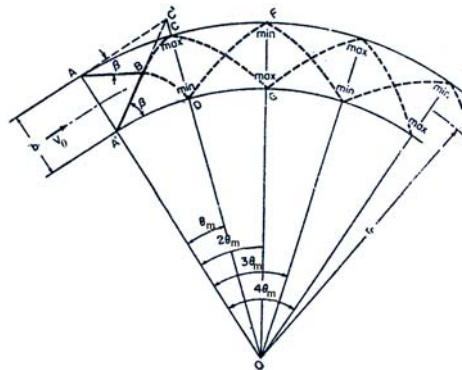
اولین نشیب آن در دیواره داخلی با زاویه θ_{min} تولید می شود. در محاسبات نظری فرض بر آن است که $\theta_{max} = \theta_{min} = \theta_m$ باشد. موقعیت فراز و نشیب این امواج از هندسه کانال و مشخصات جریان بدست می آید و بر این اساس داریم، [1]، [5]:

$$\theta_m = \tan^{-1} \frac{2b}{(2r_c + b) \tan(\beta)} \quad (1)$$

در معادله (1)، b عرض کانال خمیده، r_c شعاع مرکزی خم و زاویه β بر حسب عدد فرود ورودی کانال (Fr_0) تعریف می شود.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{1}{Fr_0} \right) ; Fr_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gh_0}} \quad (2)$$

در معادله (2) پارامترهای V_0 و h_0 به ترتیب عمق و سرعت آب در ورودی خم و g شتاب جاذبه می باشد. در محاسبات تحلیلی فرض می شود که پس از تشکیل اولین موج در زاویه θ_m ، مجموعه امواج متوالی با فراز و نشیب های پی در پی در امتداد خم در زوایای $(2\theta_m, 3\theta_m, \dots)$ ، عیناً بدون استهلاک مطابق شکل 1 توسعه پیدا می کنند، [1].



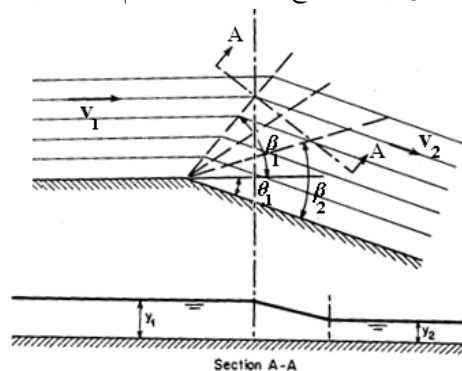
شکل 1 - تشکیل امواج مورب جریان فوق بحرانی در یک خم، [1]

ناپ و بین رابطه زیر را برای پروفیل سطح آب در دیوار خارجی و داخلی ارائه دادند، [5]:

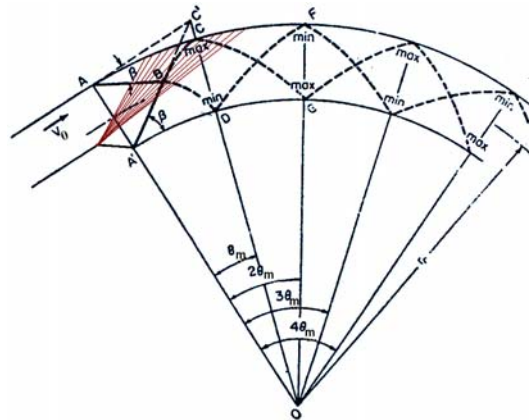
$$\frac{h}{h_0} = Fr_0^2 \sin^2 \left(\beta \pm \frac{\theta}{2} \right) \quad 0 < \theta < \theta_m \quad (3)$$

در معادله (3)، h ارتفاع آب در زاویه θ و h_0 ارتفاع آب در ورودی خم تعریف می شود. با استفاده از معادلات (1) تا (3)، موقعیت و ارتفاع اولین فراز موج در دیوار خارجی محاسبه می گردد.

مطالعات نظری نشان می دهد که بازشدگی در یک کانال مستقیم در جریان فوق بحرانی امواج منفی انبساطی تولید می کند، (شکل 2). این امواج انبساطی در کانال پایین دست منتشر می شوند و ارتفاع آب را به تدریج کم می کنند، [1]. از این خاصیت می توان برای کاهش شدت اولین موج مثبت در دیوار خارجی یک کانال خمیده استفاده کرد (شکل 3)، بدین ترتیب که با طراحی مناسب یک بازشدگی در دیوار داخلی کانال ورودی، امواج انبساطی منفی را می توان بر روی قله موج مثبت کانال خمیده قرار داد تا از ارتفاع آن کاسته شود. کاهش ارتفاع موج در اولین قله منجر به افزایش عمق آب در نقاط کم ارتفاع و کاهش ارتفاع در سایر قله می شود و سطح آب در را در طول خم هموارتر می سازد.



شکل 2 - امواج انبساطی ناشی از بازشدگی کانال در رژیم فوق بحرانی، [1]



شکل 3- ترکیب امواج مثبت دیوار خارجی خم با امواج منفی بازشدگی

3. معادلات آب‌های کم عمق

برای تحلیل جریان فوق بحرانی در خم‌ها از معادلات آب‌های کم عمق استفاده می‌شود. شکل دیفرانسیلی معادلات آب‌های کم عمق در دو بعد برای یک کانال افقی با صرفنظر کردن از اثرات اصطکاکی به صورت زیر نوشته می‌شود، [6]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

در معادله فوق، U بردار متغیرهای بقاء و F و G بردار شار در راستای محور x (y) می‌باشند و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}; G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در این معادلات، h ارتفاع سطح آب در هر نقطه، g شتاب ثقل، u مؤلفه سرعت متوسط گیری شده در عمق در راستای x (y) می‌باشند.

4. الگوی دو بعدی روش عددی Roe-TVD

در این تحقیق به منظور حل عددی معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق (معادلات سنت ونانت) از روش حجم محدود Roe-TVD بر یک شبکه با سازمان چهار گوشه استفاده می‌شود. این روش از نوع گدونف با قدرت تفکیک بالا می‌باشد و قادر است تا ناپیوستگی‌ها را در جریان‌های فوق بحرانی به خوبی شبیه سازی کند برای کنترل نوسان‌ها از محدود کننده شیب Minmod استفاده می‌شود، [7].

5. مدل سازی جریان در خم‌ها و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی سایر محققین

رینر و هاگر در سال 1997 جریان فوق بحرانی در کانال‌های خمیده را به طور آزمایشگاهی مطالعه کردند. مشخصات هندسی یکی از کانال‌های آنها به شرح زیر بود، [2].

$$\text{شیب کانال} = 0^\circ \quad \text{شعاع مرکزی کانال} = 3.607\text{m} \quad \text{زاویه مرکزی خم} = 51^\circ \quad \text{عرض کانال} = 0.25\text{m}$$

در شکل 4 نتایج مدل عددی Roe-TVD با روابط آزمایشگاهی رینر و هاگر در دیوار خارجی خم به ازای اعداد فرود ورودی مختلف مقایسه شده است. در این شکل τ_{0W} عمق بی بعد شده در دیواره خارجی می‌باشد و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود، [2]:

$$\tau_{ow} = \frac{h - h_0}{h_{\max} - h_0} \quad (6)$$

در این رابطه h_{\max} ارتفاع بیشینه موج در خم است. رینر و هاگر همچنین بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، دو رابطه زیر را برای محاسبه θ_{\max} (محل تشکیل اولین فراز در دیوار خارجی) و عمق آب در دیوار خارجی ارائه دادند،

$$\tan \theta_{\max} = \begin{cases} Fr_0 \frac{b}{r_c} & Fr_0 \frac{b}{r_c} \leq 0.35 \\ 0.6 \sqrt{Fr_0 \frac{b}{r_c}} & Fr_0 \frac{b}{r_c} > 0.35 \end{cases} \quad (7)$$

$$\tau_{ow} = \sin^{1.5} \left[\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta}{\theta_{\max}} \right) \right], \quad 0 \leq \theta / \theta_{\max} < 1.25 \quad (8)$$

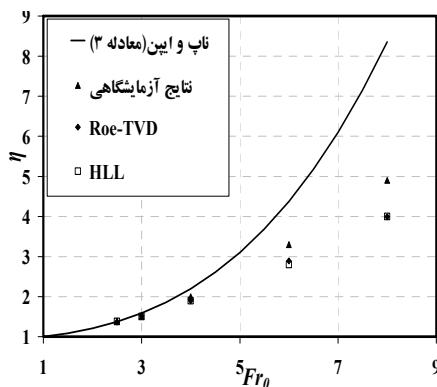
مطالعات رینر و هاگر نشان داد که رابطه (8) پاسخهای مناسبی در محدوده $0.75 < \theta / \theta_{\max} \leq 1.25$ دارد و از آنجاییکه بزرگترین اعماق در این محدوده قرار دارند، از نظر مهندسی نیز مورد علاقه می باشد، [2]، [4].

رینر و هاگر برای محاسبه سطح آب در دیوار خارجی رابطه دیگری نیز ارائه دادند:

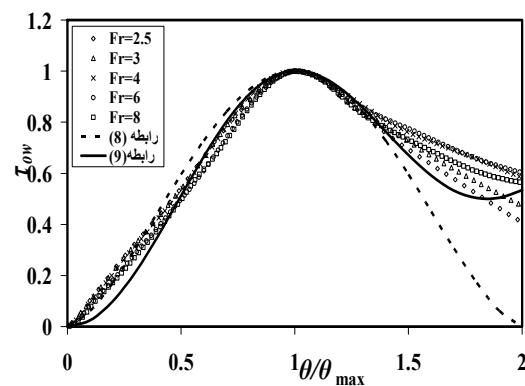
$$\tau_{ow} = \frac{1 - j_0(3.8 \frac{\theta}{\theta_{\max}})}{1.4} \quad (9)$$

j_0 تابع بسل مرتبه صفر است (Bessel function of zero order). بر اساس مطالعات این محققین رابطه (9) در محدوده $0.75 < \theta / \theta_{\max} \leq 2$ جوابهای نزدیکی به رابطه (8) دارد و در محدوده $1.25 < \theta / \theta_{\max} \leq 2$ نیز پاسخ مناسبی می دهد [2]، [4].

در سال 2005 ویلانی و کالفی کانال خمیده رینر و هاگر را با استفاده از روش حجم محدود HLL مدل سازی کردند، [3]. در تحقیق حاضر نیز کانال خمیده رینر و هاگر به کمک روش حجم محدود Roe-TVD مدل شد. در شکل 5، نتایج مدل عددی Roe-TVD با نتایج آزمایشگاهی رینر و هاگر، روش عددی HLL ویلانی و کالفی و همچنین روابط تحلیلی ناپ- این به ازای عددهای فرود ورودی برابر 2/5، 3، 4، 6 و 8 مقایسه شده است. η نسبت عمق اولین فراز موج به عمق اولیه جریان در کانال بالادست ($\eta = h_{\max} / h_0$) می باشد. عمق جریان در کانال بالادست در تمام حالات برابر 5 cm است. همانطور که مشاهده می شود، پاسخ روش های عددی HLL و Roe-TVD، بریکدیگر منطبق است و در اعداد فرود کمتر از 4/5، جواب های عددی و روابط تحلیلی به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است در حالیکه با افزایش عدد فرود، فاصله جواب های عددی و علی الخصوص حل تحلیلی از نتایج آزمایشگاهی بیشتر می شود. لازم به ذکر است که بر اساس تجربیات عددی به ازای $Fr_0 > 4/5$ دیواره داخلی کانال خشک می شود، [7].



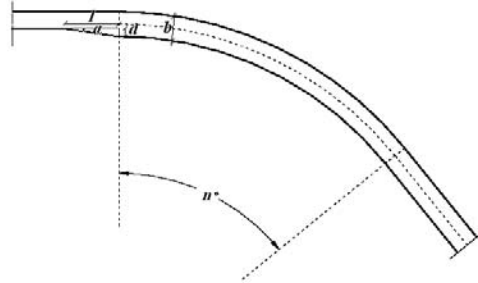
شکل 5 - مقایسه نتایج عددی با روابط تحلیلی و آزمایشگاهی



شکل 4 - مقایسه نتایج عددی و روابط تجربی رینر و هاگر در دیوار خارجی

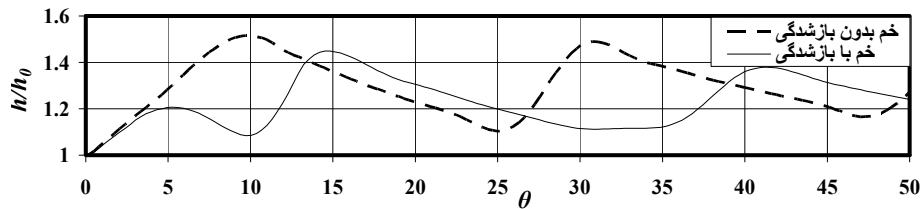
6. اثر بازشدگی بر پروفیل عددی سطح آب

همانطور که ذکر شد، با ایجاد یک بازشدگی در دیوار داخلی کانال ورودی خم، امواج منفی تولید می‌شود، این امواج با امواج مثبت دیوار خارجی ترکیب شده ارتفاع آنها را کاهش می‌دهند. مشخصات هندسی این تبدیل بازشونده در ورودی دیوار داخلی مطابق شکل 6 تعریف می‌شود و در آن، b عرض کانال خمیده، d عرض تبدیل، l طول آن و α زاویه بازشدگی می‌باشد. بنابراین $\tan(\alpha) = d/l$ است. در این تحقیق از کانال خمیده‌ای با مشخصات کانال رینر و هاگر که دارای $r/b = 15$ می‌باشد و دو کانال دیگر با نسبت‌های 20 و 10 استفاده شده است. در تمامی این خم‌ها به جهت سهولت مقایسه، عرض کانال خمیده برابر $b = 0.25$ متر در نظر گرفته شده است و شعاع خط مرکزی کانال متناسب با نسبت r/b انتخاب گردیده است.



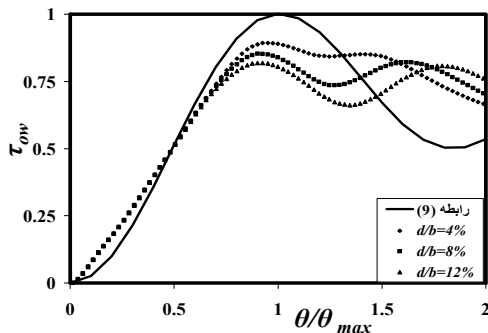
شکل 6 - بازشدگی کانال بالادست در ورودی خم.

در شکل 7 به عنوان نمونه پروفیل عددی سطح آب در دیواره خارجی خم با وجود بازشدگی و بدون آن ترسیم شده است، همانطور که ملاحظه می‌شود، وجود تبدیل بازشونده، ارتفاع بیشینه موج در دیوار خارجی خم را به مقدار زیادی کاهش داده است و موج یک قله آن را به موج دو قله‌ای تبدیل کرده است. در این شکل $Fr_0 = 3$ ، $\tan(\alpha) = 0.05$ و $d/b = 0.12$ می‌باشند.

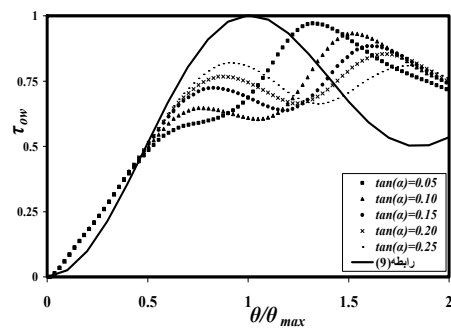


شکل 7 - اثرات بازشدگی بر پروفیل جریان در دیوار خارجی.

در شکل 8-الف نمودارهایی در صفحه $\tau_{ow} - \theta/\theta_{max}$ با $r/b = 15$ و $Fr_0 = 4.5$ و $d/b = 0.12$ به ازای زوایای بازشدگی مختلف ترسیم شده است، همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه بازشدگی، ارتفاع دو قله موج به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا اینکه در زاویه بازشدگی $\tan(\alpha) = 0.25$ حداکثر کاهش ارتفاع قله حاصل می‌گردد. در شکل 8-ب پروفیل دیوار خارجی برای $Fr_0 = 4.5$ و $\tan(\alpha) = 0.25$ به ازای d/b های مختلف ترسیم شده است که مشاهده می‌گردد با افزایش d/b ارتفاع قله نیز کمتر می‌گردد.



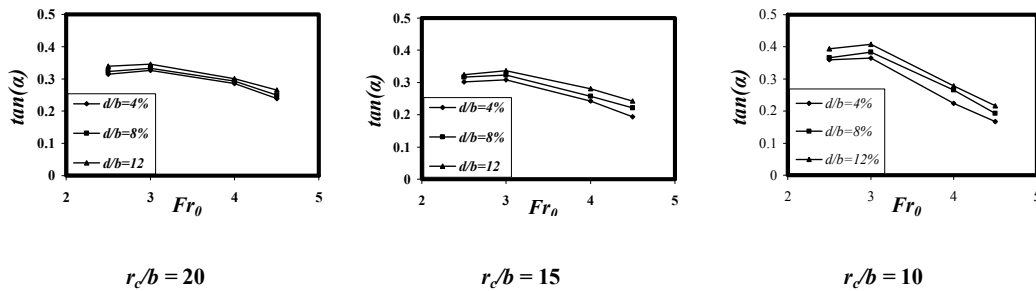
شکل 8-ب - پروفیل سطح آب دیوار خارجی به ازای d/b های مختلف در $\tan(\alpha) = 0.25$ و $Fr_0 = 4.5$



شکل 8-الف - پروفیل سطح آب دیوار خارجی به ازای $\tan(\alpha)$ های مختلف در $d/b = 12\%$ و $Fr_0 = 4.5$

تجربیات عددی نشان می‌دهد که با تغییر عرض و طول بازشدگی، موقعیت و ارتفاع موج دو قله‌ای تغییر می‌کند. در یک بازشدگی با d/b مشخص، بهترین طول بازشدگی (l)، طولی است که در آن، ارتفاع دو قله ناشی از بازشدگی با یکدیگر برابر باشند. در این صورت حداکثر کاهش در سطح آب اتفاق می‌افتد. در تحقیق حاضر بجای تعیین طول بهینه از زاویه بازشدگی بهینه استفاده می‌شود که بدیهی است با توجه به آن، طول بهینه نیز بدست می‌آید.

مطالعات عددی برای سه عرض بازشدگی بدون بعد $d/b = 4\%, 8\%, 12\%$ ، تناژات زوایای بازشدگی $0/1, 0/15, 0/2, 0/25$ و $\tan \alpha$ و به ازای عدد فرودهای ورودی $2/5, 3, 4, 4/5$ صورت گرفت و در هر d/b بر اساس اطلاعات عددی بدست آمده، زاویه بازشدگی بهینه تعیین گردید. واضح است که در هر نسبت r_c/b و بازا یک d/b مشخص با عدد فرود ورودی مورد نظر فقط یک زاویه بهینه وجود دارد. در شکل 9 مقدار تناژات زاویه بهینه به ازای $d/b = 4\%, 8\%, 12\%$ ، اعداد فرود ورودی $2/5, 3, 4, 4/5$ و $r_c/b = 10, 15, 20$ ترسیم شده است.



شکل 9 - محاسبه α بهینه بر اساس پارامترهای مختلف.

همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، در یک نسبت r_c/b مشخص، زاویه بهینه در $3 < Fr_0$ تقریباً مستقل از عدد فرود ورودی به خم است و فقط تابع نسبت d/b می‌باشد. با افزایش عدد فرود ($Fr_0 = 3$)، زاویه بهینه بازشدگی به تدریج کم می‌شود و این کاهش تقریباً با یک شیب ثابت صورت می‌گیرد که مستقل از نسبت بدون بعد d/b می‌باشد.

در نهایت با توجه به نکات بیان شده روابط زیر برای محاسبه زاویه بهینه بازشدگی منتج از نمودارها و نتایج عددی محاسبه می‌شود..

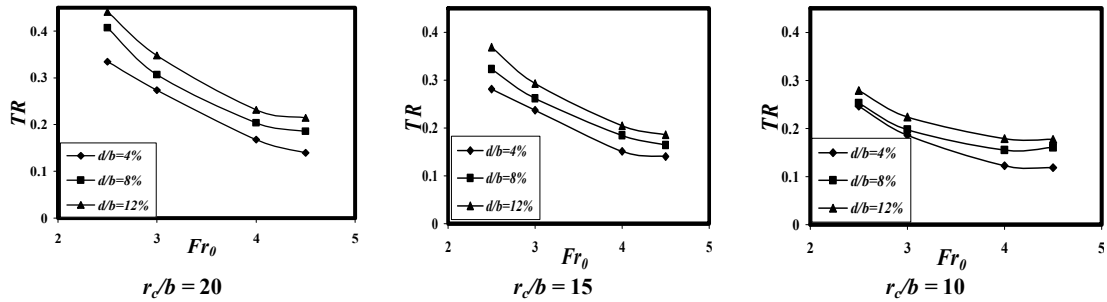
$$\tan(\alpha) = \begin{cases} \left[(4.2784 * (d/b) + 0.7633) * \frac{1}{r_c/b} + 0.0479 * (d/b) + 0.259 \right] & Fr_0 \leq 3 \\ \left[4.2784 * (d/b) + 0.7633 + 1.7323 * (3 - Fr_0) \right] * \frac{1}{r_c/b} & \\ -0.0451(3 - Fr_0) + 0.0479 * (d/b) + 0.259 & Fr_0 > 3 \end{cases} \quad (10)$$

7. بررسی کارایی بازشدگی

به منظور ارزیابی کارایی تبدیل بازشونده واقع در ورودی خم برای کاهش شدت امواج جریان فوق بحرانی پارامتر TR را مشابه بلترامی و همکاران به شرح زیر تعریف می‌کنیم، [4].

$$TR = 1 - \frac{h_{\max}^* - h_0}{h_{\max} - h_0} \quad (11)$$

در این رابطه h_{\max}^* ارتفاع بیشینه موج در خم پس از تبدیل بازشونده و TR پارامتر کاهش کل است. این پارامتر راندمان کاهش ارتفاع بیشینه موج را مشخص می‌کند، در نمودارهای شکل 10 پارامتر TR بر حسب عدد فرود ورودی Fr_0 ترسیم شده است. با استفاده از این نمودارها میزان کاهش ارتفاع امواج در هر بازشدگی به ازای عدد فرود مشخص و زاویه α تعیین می‌شود. به عنوان نمونه در صورت استفاده از زاویه بهینه ارتفاع قله موج به ازای $d/b = 12\%$ و $Fr_0 = 2/5$ و $r_c/b = 20$ تا 45% کاهش پیدا می‌کند.



شکل 10 - پارامتر کاهش کل در صورت استفاده از α بهینه در صفحه Fr_0-TR

از نمودارهای شکل 10 نتیجه گیری می شود که در انواع خم ها، با افزایش عدد فرود ورودی، نسبت TR کاهش می یابد، برعکس با افزایش نسبت های d/b و r_c/b پارامتر TR افزایش می یابد.

در یک خم مشخص (r_c/b معلوم) با نسبت d/b ثابت، یک معادله سهمی بر نمودارهای شکل 10 برازش داده می شود. در این حالت رابطه TR بر حسب عدد فرود به صورت کلی زیر بدست می آید.

$$TR = a' Fr_0^2 + b' Fr_0 + c' \quad (12)$$

در جدول 1 ضرایب ثابت a' ، b' و c' همراه با ضریب آماری R^2 تخمین زده شده است. بدیهی است با استفاده از اطلاعات این جدول، مقادیر TR مربوط به خم های با r_c/b و d/b متفاوت با درونیابی بدست می آید.

جدول 1. - ضرایب a' ، b' و c' برای محاسبه TR در خم های $r_c/b=10,15,20$.

r_c/b	d/b	a'	b'	c'	R^2
10	0.04	0.0347	- 0.2939	0.7452	0.9893
	0.08	0.035	- 0.2951	0.7722	0.9939
	0.12	0.0353	- 0.2964	0.7981	0.9979
15	0.04	0.0225	- 0.2313	0.7221	0.9932
	0.08	0.0272	- 0.2691	0.8254	0.9999
	0.12	0.0385	- 0.3602	1.0283	0.9998
20	0.04	0.0355	- 0.3474	0.9935	0.9989
	0.08	0.0368	- 0.3558	1.0405	0.9995
	0.12	0.0437	- 0.415	1.1965	0.999

8. نتیجه گیری

در این تحقیق جریان فوق بحرانی در کانال های خمیده مدل سازی شد. بدین منظور از اطلاعات کانال خمیده رینر و هاگر با نسبت $r_c/b=15$ استفاده شد و نتایج روش عددی Roe-TVD با نتایج عددی HLL ولیانی و کالفی و همچنین با داده ها و روابط آزمایشگاهی رینر و هاگر مقایسه شد. جواب های عددی علی الخصوص برای $Fr_0 < 4/5$ رضایت بخش بود. در ادامه به منظور کاهش شدت امواج در جریان فوق بحرانی خم ها از یک تبدیل بازشونده کوچک در دهانه دیوار داخلی ورودی خم استفاده شد تا با ترکیب امواج منفی ناشی از بازشدگی با امواج مثبت دیوار خارجی خم از شدت امواج کاسته شود. در این بررسی سه خم بانسبتهای 20 و 15 و $r_c/b=10$ مطالعه شد. نتایج عددی نشان داد که در این خم ها ارتفاع امواج تا حداکثر 45٪ کاهش پیدا کرد. با استفاده از تجربیات عددی و ضوابط و معیارهای مشخصات هندسی تبدیل بازشونده بدست آمد و نشان داده شد که میزان بازشدگی بهینه به نسبت r_c/b خم، d/b در نظر گرفته شده و عدد فرود ورودی به خم بستگی دارد.

9. مراجع

1. Chow, V.T., (1986), "Open Channel Hydraulics," McGraw-Hill Intern, 680p.
2. Reinauer, R. and Hager, H. (1997), "Supercritical Bend Flow," ASCE, Vol. 123(3), pp. 208-218.
3. Valiani, A. and Caleffi, V. (2005), "Brief Analysis Of Shallow Water Equations Suitability To Numerically Simulate Supercritical Flow In Sharp Bends," ASCE Vol. 131, No. 10, pp. 912-916.
4. Beltrami, G.M., Repetto, R. and Del guzzo, A. (2007), "A Simple Method To Regularize Supercritical Flow Profiles In Bends." Journal of Hydraulic Research Vol. 45, No.6, pp.773-786.
5. Knapp, R. T. (1951), "Design Of Channel Curves For Supercritical Flow," 2nd paper in High-velocity flow in open channels: A symposium, Transactions, ASCE, Vol. 116, pp. 296-325.
6. Toro, E., (2001), "Shock Capturing Methods For Free Surface Shallow Flows," John Wiley, ChiChester, New York, 308p.

7. شمخالچیان، ع. ر.، (1387)، "جریان فوق بحرانی در کانال‌های خمیده"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه شهید عباسپور، تهران.