علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۱، شماره‌ی۲، تابستان ۹۷، ص. ۵۹-۴۵

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر طول تبدیل بر میزان تلفات انرژی در تبدیل‌های تدریجی کانال‌های روباز در جریان زیربحرانی

عادل اثنی عشری[۱]، علی اکبر اختری[۲*]، امیر احمد دهقانی[۳] و حسین بنکداری[۴]

۱ - عضو هیات علمی موسسه غیرانتفاعی میرداماد گرگان، دانشکده مهندسی عمران.
۲* - نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه. akhtari@razi.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۴- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱۴

چکیده

تبدیل‌ها سازه‌هایی هستند که می‌توانند با ایجاد تغییر در نوع سطح مقطع کانال‌ها، هندسه کانال و نوع جریان را عوض کنند. با افزایش ابعاد در راستای مقطع در تبدیل، از سرعت جریان کاسته می‌شود. این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به‌وجود آورده و باعث تلفات انرژی می‌شود. در این مطالعه، الگوی جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده کانال‌های مستطیلی به ذوزنقه‌ای برای جریان زیربحرانی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی الگوی جریان با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل تنش رینولدز (RSM) انجام گرفته است. پروفیل‌های سطح آب و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه شده‌اند که مقایسه این نتایج مطابقت خوبی را بین آنها نشان می‌دهد. همچنین بازدهی هیدرولیکی تبدیل و ضریب تلفات انرژی در امتداد تبدیل به ازای طولهای مختلف تبدیل و اعداد فرود ورودی مختلف محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، بازدهی تبدیل و ضریب تلفات انرژی به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش طول تبدیل عریض‌شونده، بازدهی تبدیل و ضریب تلفات انرژی به‌ترتیب دچار افزایش و کاهش می‌شوند. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تاثیر عدد فرود بالادست و دبی ورودی بر نواحی چرخشی جریان ایجاد شده در دو طرف تبدیل و تنش برشی بستر در امتداد تبدیل بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش عدد فرود بالادست، طول و عرض ناحیه جدایی جریان ایجاد شده در دو طرف تبدیل افزایش یافت.

کلید واژه‌ها : تبدیل تدریجی عریض‌شونده، الگوی جریان، تلفات انرژی، نواحی جدایی جریان، تنش برشی بستر، مدل عددی فلوئنت.

مقدمه

تبدیل عبارت است از سازه هیدرولیکی کوتاهی که برای تغییر سطح مقطع و یا شکل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Henderson, 1966). تبدیل‌ها به‌طور معمول هم در کانال‌های باز و هم در کانال‌های طبیعی کاربرد دارند. وظیفه تبدیل این است که کانال باریک در مقطع بالادست را به کانال بزرگ در مقطع پایین دست یا بالعکس اتصال می‌دهد. تبدیل کانال‌های عریض شونده، تبدیل‌هایی با افزایش سطح مقطع در جهت جریان می‌باشند (Najafi Nejad Nasser, 2011). با افزایش ابعاد در راستای مقطع در تبدیل، از سرعت جریان کاسته می‌شود. این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به‌وجود آورده و باعث تلفات انرژی در جریان می‌شود. بدین منظور بایستی از تبدیل مناسب برای کنترل یا حداقل کردن تلفات انرژی برای جلوگیری از افزایش هزینه‌های نگه‌داری ناشی از افزایش فرسایش بستر و دیواره‌های کانال استفاده شود (Najafi Nejad Nasser, 2011). به‌طور کلی ساختمان تبدیل مانع ایجاد موج و سایر آشفتگی‌های جریان شده و در این‌صورت، افت انرژی ناشی از تغییر مقدار حرکت به حداقل خود خواهد رسید (Hosseini and Abrishami, 2014). با این شرایط تغییرات در شکل وضعیت جریان تدریجی و به تعبیری خطوط جریان به نحوی هدایت می‌شوند که تقریباً موازی و جریان آب آرام باشد. Abbott و Kline (1962) الگوهای جریان متقارن را تحت مطالعه آزمایشگاهی مشاهده کردند. آنها هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که عدد رینولدز و شدت آشفتگی هیچ تأثیری روی الگوی جریان ندارند. Ramamurthy et al. (1970) به بررسی آزمایشگاهی ناحیه جدایی جریان در تبدیل عریض شونده پرداختند و تاثیر ایجاد یک برآمدگی در کف کانال را بر ناحیه جدایی جریان

مشاهده کردند. آن‌ها نشان دادند که زاویه واگرایی و طول تبدیل بر روی ناحیه جدایی جریان تاثیر می‌گذارند. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر از تلفات انرژی ناشی از اصطکاک صرف نظر شود، بار آبی انرژی مخصوص در قبل و بعد از تبدیل افقی، تغییرات ناچیزی دارد. Alauddin و Basak (2006) ناحیه چرخشی جریان در یک تبدیل عریض شونده را به‌طور آزمایشگاهی مشاهده کردند. هدف از این مطالعه، طراحی تبدیل عریض شونده بر اساس حداقل ناحیه جدایی جریان و همچنین تلفات هد انرژی کمتر بود. Basak و Alauddin (2010) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر اعداد فرود مختلف ورودی و دبی‌های مختلف ورودی به تبدیل عریض شونده بر بازدهی تبدیل پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش عدد فرود ورودی و دبی ورودی به تبدیل، درصد بازدهی تبدیل کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به مطالعه آن‌ها، بازده تبدیل تدریجی عریض شونده به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{Q\rho g\,(y_2 - y_1)}{(\frac{1}{2}\rho Q V_1^{\,2})\alpha_1 - (\frac{1}{2}\rho Q V_2^{\,2})\alpha_2} = \frac{(y_2 - y_1)}{(\alpha_1 \frac{V_1^{\,2}}{2g} - \alpha_2 \frac{V_2^{\,2}}{2g})} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، y_1 و y_2 به‌ترتیب اعماق جریان در مقاطع ورودی (مقطع ۱) و خروجی (مقطع ۲) تبدیل، v_1 و v_2 به‌ترتیب میانگین سرعت در مقاطع ورودی و خروجی تبدیل و α_1 و α_2 ضرایب تصحیح انرژی می‌باشند. با استفاده از داده‌های عمق جریان و سرعت، و با توجه به مشخص بودن مساحت جریان و سرعت متوسط جریان، ضرایب تصحیح انرژی برای قرارگیری در معادله بازدهی تبدیل محاسبه می‌شوند. Howes et al. (2010) به بررسی آزمایشگاهی و عددی توزیع پروفیل سرعت جریان در طول تبدیل تنگ شونده به ازای اعداد فرود مختلف ورودی و در موقعیت‌های مختلف ورودی جریان زیربحرانی پرداختند. Najafi Nejad Nasser (2011) به بررسی آزمایشگاهی میزان تلفات انرژی در تبدیل عریض شونده و تأثیر استفاده از یک برآمدگی در کف کانال بر روی کاهش تلفات انرژی پرداخت. او نشان داد که میزان تلفات انرژی در حالت استفاده از برآمدگی نسبت به حالت بدون برآمدگی، حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. در مطالعه ایشان ضریب تلفات انرژی بصورت رابطه زیر تعریف شده است (Najafi Nejad Nasser, 2011):

$$k_e = \frac{H_1 - H_2}{\frac{v_1^{\,2}}{2g}} \qquad (۲)$$

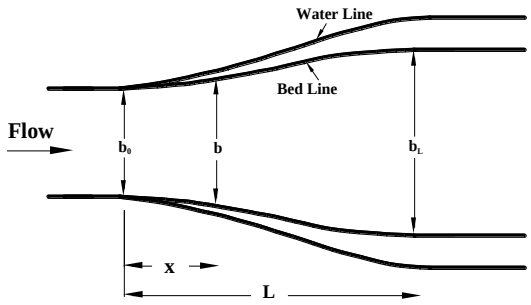
که k_e ضریب تلفات انرژی و H_i ارتفاع معادل انرژی کل شامل مجموع ارتفاع معادل سرعت، ارتفاع و فشار می‌باشد. Najmeddin (2012) به بررسی عددی الگوی جریان در تبدیل عریض شونده با استفاده از مدل عددی CFX پرداخت. در این مطالعه، پروفیل‌های سرعت جریان و نواحی جدایی جریان در سه زاویه مختلف دیواره تبدیل و به ازای عدد فرود ورودی ثابت مورد بررسی قرار گرفتند.

در مطالعه حاضر، الگوی جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده کانال‌های مستطیلی به ذوزنقه‌ای برای جریان زیربحرانی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از مطالعه حاضر، تاثیر طول تبدیل تدریجی عریض‌شونده بر میزان تلفات انرژی در امتداد تبدیل می‌باشد. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی هیدرولیک جریان با استفاده از نرم افزار فلوئنت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) انجام گرفته است.

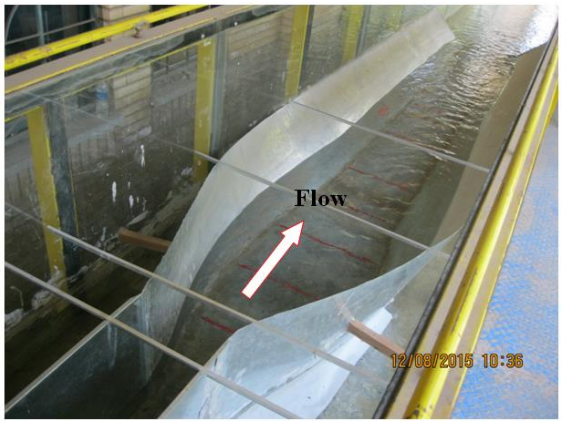
مواد و روش‌ها

روش طراحی

در مطالعه حاضر، برای طراحی تبدیل تدریجی عریض شونده مستطیلی به ذوزنقه‌ای از روش مطالعه Swamee و Basak (1992) استفاده شده است. خلاصه‌ای از این روش در ادامه آمده است (شکل ۱).



شکل ۱- طرح تبدیل تدریجی عریض شونده مستطیلی به ذوزنقه‌ای



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی ساخته شده در این مطالعه

برای پروفیل عرض بستر می‌توان نوشت :

$$B=[a(\frac{1-\xi}{\xi})^{p}+1]^{-q} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، a، p و q اعداد مثبتی هستند که پارامترهای تبدیل نامیده می‌شوند. رابطه (۱)، شرایط مرزی در ورودی و خروجی تبدیل را ارضا می‌کند. پارامترهای تبدیل با به حداقل رساندن تابع E(a,p,q) که در زیر آمده است، به‌دست می‌آیند (Basak, 1992 and Swamee):

$$E(a,p,q)=\frac{100}{N}\sum_{j=1}^{N}\left|\{B_i-[a(\frac{1-\xi_i}{\xi_i})^{p}+1]^{-q}\}\right| \qquad (۴)$$

که N تعداد کل پروفیل‌های عرض بستر می‌باشد. با به حداقل رساندن تابع E(a,p,q) پروفیل عرض بستر بهینه مطابق زیر نوشته می‌شود:

$$B=[2.52(\frac{1-\xi}{\xi})^{1.35}+1]^{-0.775} \qquad (۵)$$

رابطه (۵) می‌تواند به فرم زیر نوشته شود:

$$b=b_0+(b_L-b_0)[2.52(\frac{L}{x}-1)^{1.35}+1]^{-0.775} \qquad (۶)$$

که b، b_0 و b_L به‌ترتیب عرض بستر کانال مستطیلی، عرض بستر تبدیل و عرض بستر کانال ذوزنقه‌ای و L طول تبدیل می‌باشند. با تحلیل کردن تعداد زیادی از پروفیل‌های شیب جانبی، یک معادله برای طراحی تبدیل‌های مستطیلی به ذوزنقه‌ای مطابق زیر به‌دست آمد.

$$\frac{m}{m_L}=\xi^{1.23} \qquad (۷)$$

که در این رابطه، m و m_L به‌ترتیب شیب جانبی تبدیل و شیب جانبی کانال ذوزنقه‌ای می‌باشند. رابطه (۷) می‌تواند به فرم ساده‌تر زیر نوشته شود:

$$m = m_L \left(\frac{x}{L}\right)^{1.23} \quad (۸)$$

مدل آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف این تحقیق آزمایش هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. تجهیزات آزمایشگاهی شامل فلوم اصلی به طول ۱۱ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع مفید ۰/۸۰ متر بود. طول و عرض کانال مستطیلی بالادست تبدیل به ترتیب ۳متر و ۰/۲۵ متر، طول تبدیل تدریجی ۱ متر و طول و عرض کف کانال ذوزنقه‌ای پایین دست تبدیل ۳ متر و ۰/۴۰ متر می‌باشند. شیب جانبی کانال ذوزنقه‌ای ۱:۱ در نظر گرفته شده است. دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی از جنس شیشه بوده که با قاب فلزی مهار شده‌اند. اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از فلومتر مافوق صوت تعبیه شده در لوله انتقال آب انجام گرفته و بوسیله یک سرریز لبه تیز در کانال برگشتی پایین دست کنترل می‌شود. سطح آب جریان به‌وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای فلوم تنظیم شده و برای اندازه‌گیری سطح آب از دستگاه عمق سنج نقطه‌ای با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میلیمتر استفاده شد. فلوم آزمایشگاهی مجهز به ریل غلطکی برای حمل ابزارهای اندازه‌گیری بوده و برای اندازه‌گیری سرعت جریان از لوله پیتو بهره گرفته شده است (شکل ۲).

برای بررسی توزیع سرعت جریان در امتداد تبدیل، محاسبه بازدهی تبدیل و ضریب تلفات انرژی در طول تبدیل، مقادیر عمق و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل اندازه‌گیری شدند. مطابق شکل (۳)، سرعتهای جریان در امتداد عمق جریان و در مقاطع نزدیک سطح آب، ۰/۲۰، ۰/۴۰، ۰/۶۰، ۰/۸۰ برابر عمق جریان و نزدیک بستر برای مقاطع ابتدا، وسط و انتهای تبدیل برداشت گردیدند. آزمایشات برای پنج دبی مختلف ورودی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. جدول (۱) محدوده پارامترهای هیدرولیکی جریان را نشان می‌دهد.

مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

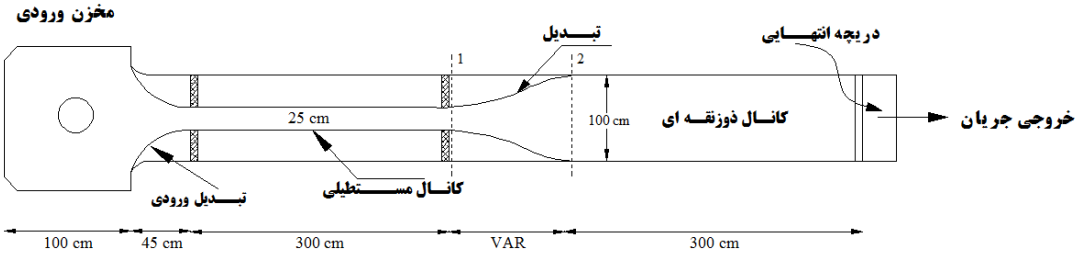
مدل عددی فلوئنت معادلات ناویر- استوکس را با استفاده از روش احجام محدود حل می‌کند. روش احجام محدود بر اساس گسسته‌سازی مستقیم شکل انتگرالی قوانین بقا در فضای فیزیکی استوار است. تحلیل جریان نیز در حالت ماندگار صورت گرفته و از الگوریتم simple برای کوپل سرعت و فشار استفاده شده است. برای حل کردن معادلات آشفتگی و مومنتوم، به‌ترتیب روش‌های Second Order Upwind و Quick استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی معادلات فشار از روش استاندارد انتخاب شده است. معادلات حاکم برحرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که برای جریان آشفته در سیال تراکم‌ناپذیر در یک هندسه سه بعدی به‌ترتیب روابط (۹) و (۱۰) می‌باشند. همچنین در مدل‌های آشفتگی مختلف، انرژی جنبشی آشفتگی بصورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود (Haque, 2008).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۹)$$

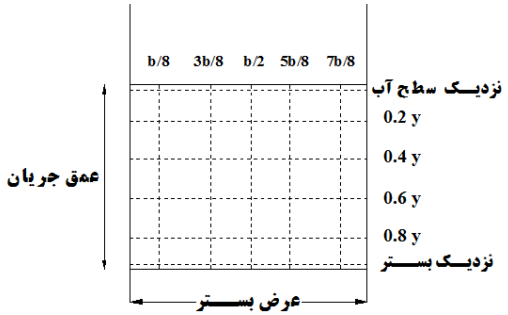
$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_{xi} + \alpha \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (۱۰)$$

جدول ۱- محدوده پارامترهای هیدرولیکی جریان

عدد فرود ورودی (Fr)	سرعت ورودی جریان (u_0، متر بر ثانیه)	عمق جریان بالادست (میلی‌متر)	دبی جریان ورودی (لیتر بر ثانیه)
۰/۳۲-۰/۷۰	۰/۳۴۵-۰/۸۳۳	۶۹-۲۴۳	۱۰-۳۰

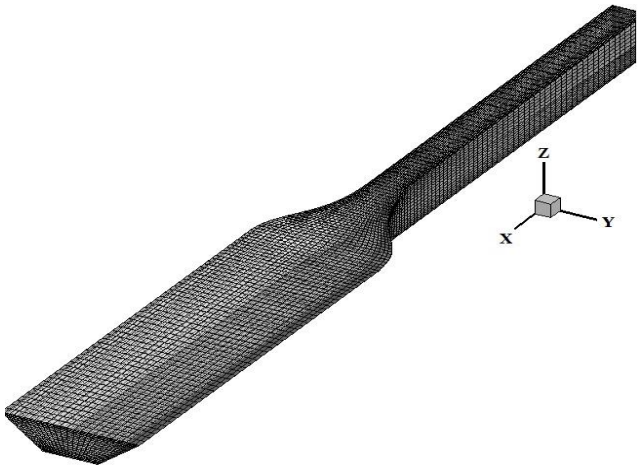


(الف)



(ب)

شکل ۳- شماتیکی از الف) پلان فلوم آزمایشگاهی و ب) مقاطع انتخابی جهت برداشت سرعت جریان



شکل ٤- نمای سه بعدی شبکه‌بندی میدان محاسباتی

$$K = \frac{1}{2}\overline{U_i U_i} \qquad (۱۱)$$

که در این روابط، $R_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'}$ تنش رینولدز، U_i و U_j به ترتیب سرعت جریان برای x و y، t زمان، p فشار، k انرژی جنبشی آشفتگی، ρ چگالی سیال، α ویسکوزیته دینامیکی سیال و g_{xi} شتاب گرانشی در جهت x_i می‌باشند. در مطالعه حاضر، مدل آشفتگی RSM با تابع دیواره استاندارد جهت شبیه‌سازی عددی جریان آشفته مورد استفاده قرار گرفته است.در این مدل آشفتگی، شکل تانسوری معادله انتقال به‌صورت زیر می‌باشد:

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه، P_{ij} تانسور تولید، Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش، D_{ij} تانسور پخش شدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف می‌باشند. جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است. (Fluent 6.3.26 User Manual, 2006)

شبکه‌بندی و شرایط مرزی میدان محاسباتی

در این مطالعه، ورودی کانال بالادست تبدیل از شرط مرزی سرعت معین و مرزهای خروجی میدان (کانال پایین دست تبدیل)، از شرط مرزی جریان خروجی مطابق مطالعه آزمایشگاهی بهره می‌گیرند.

دو ورودی مجزا برای ورودی هوا و آب در نظر گرفته شده است. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، شرط مرزی تقارن به سطح آب اعمال شده است. شرط مرزی دیواره برای مرزهای صلب اعمال شده و دیواره‌ها از لحاظ هیدرولیکی صاف در نظر گرفته شده‌اند. که در این روابط، U_0 متوسط سرعت ورودی، T_u شدت آشفتگی که بین ۱٪ الی ۵٪ می‌باشد، C_μ ثابت و برابر ۰/۰۹ و L ۰/۰۷ برابر قطر هیدرولیکی می‌باشند. برای محاسبه درصد خطای حاصله از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، از روش خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و فرمول درصد خطا (E) به‌صورت زیر استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum\left(\frac{X_{obs} - X_{model}}{X_{model}}\right)^2} \qquad (۱۳)$$

$$\%E = \left|\frac{X_{obs} - X_{model}}{X_{model}}\right| \times 100 \qquad (۱۴)$$

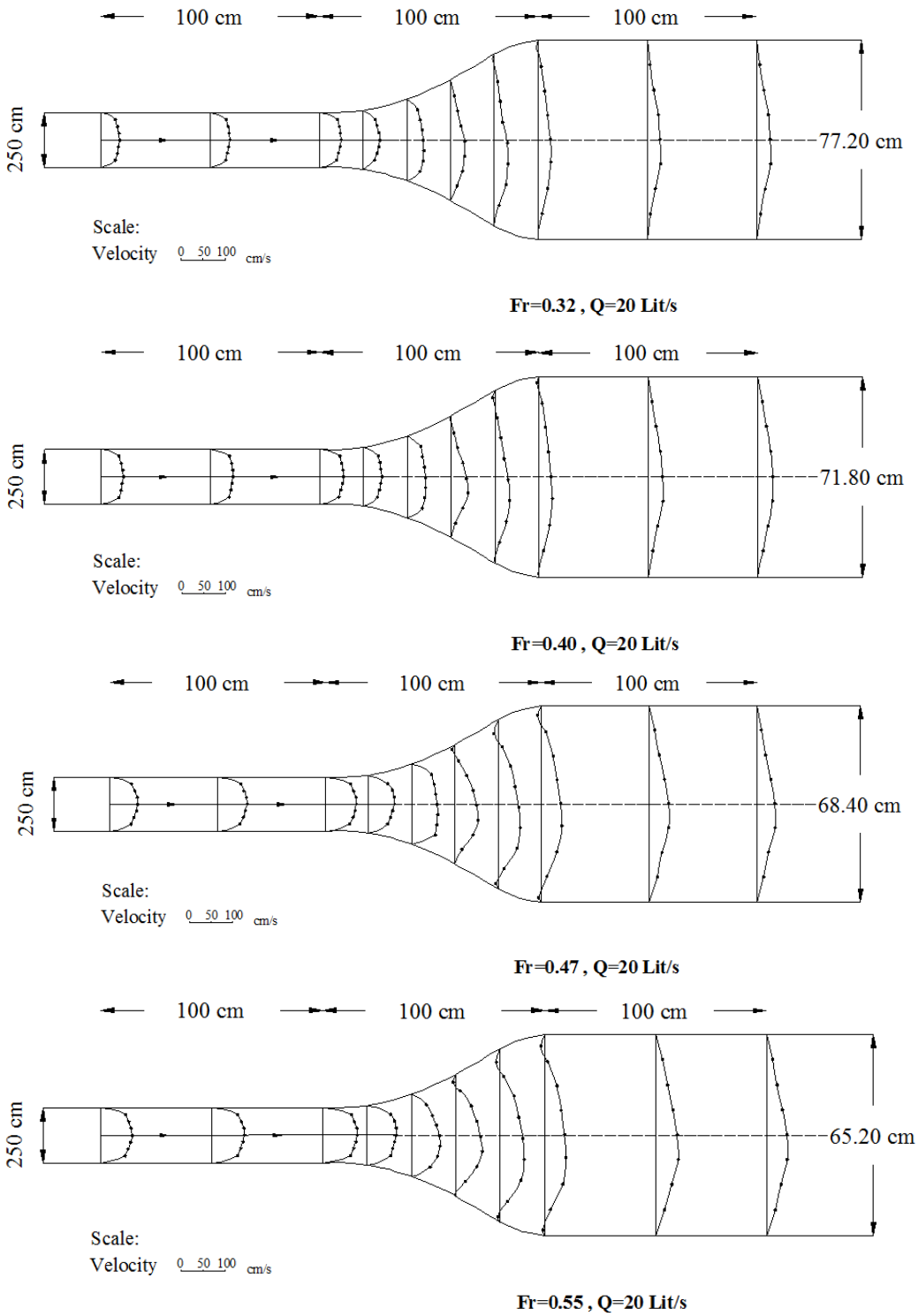
در این رابطه، X_{obs} داده‌های مشاهده شده، X_{model} داده‌های مدلسازی شده، N تعداد داده‌ها و E درصد خطا می‌باشند. شکل (۴)، نمای سه بعدی شبکه‌بندی میدان محاسباتی را نشان می‌دهد. تعداد سلول‌های شبکه میدان محاسباتی به ترتیب در جهات مختلف x، y و z در کانال مستطیلی بالادست ۶۰، ۱۵ و ۲۱، در تبدیل ۳۰، ۱۵ و ۲۱ و در کانال ذوزنقه‌ای پایین دست ۵۰، ۱۵ و ۲۱ عدد می باشند.

نتایج و بحث

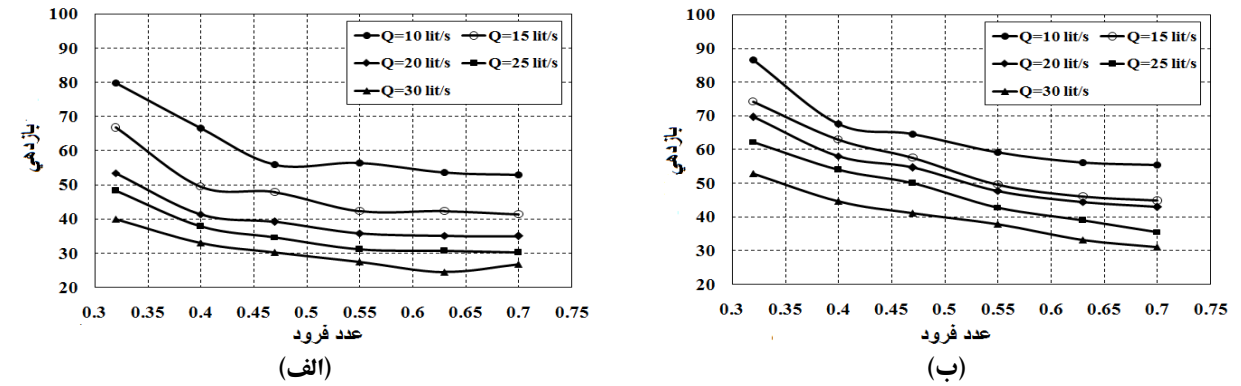
همان‌طورکه گفته شد، برای محاسبه بازدهی تبدیل، اندازه‌گیری عمق و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل ضروری می‌باشد. در جدول (۲) مقادیر سطح آب اندازه‌گیری شده تبدیل با طول ۱/۰۰ متر، به ازای اعداد فرود مختلف بالادست آورده شده است. همچنین مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در امتداد کانالها در نزدیکی سطح آب به ازای دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه و اعداد فرود بالادست ۰/۳۲، ۰/۴۰، ۰/۴۷و ۰/۵۵ در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۲-مقادیر سطح آب اندازه‌گیری شده در محور مرکزی تبدیل با طول ۱ متر

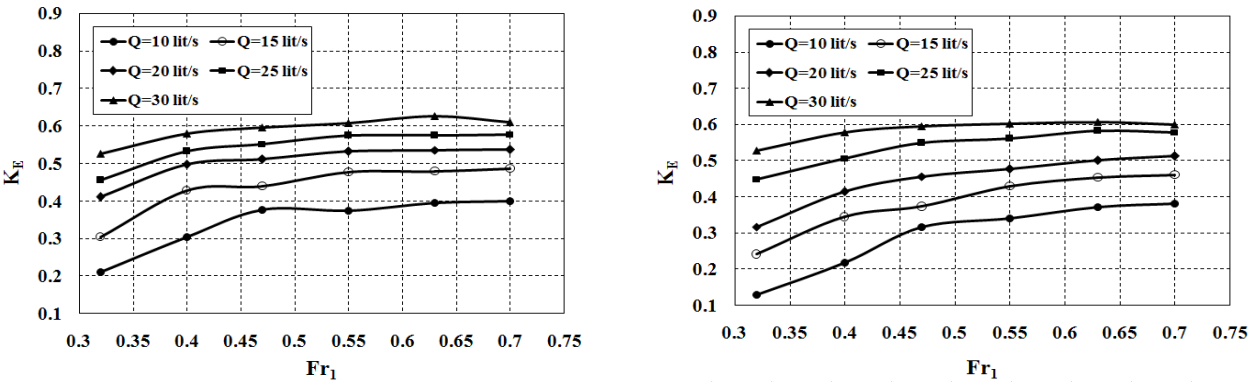
دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود بالادست	عمق جریان در ورودی تبدیل (میلیمتر)	عمق جریان در L/6 (میلیمتر)	عمق جریان در L/3 (میلیمتر)	عمق جریان در L/2 (میلیمتر)	عمق جریان در 4L/6 (میلیمتر)	عمق جریان در 5L/6 (میلیمتر)	عمق جریان در خروجی تبدیل (میلیمتر)
۲۰	۰/۳۲	۱۸۳/۱۸	۱۸۳/۶۶	۱۸۴/۷۷	۱۸۵/۷۳	۱۸۶/۰۲	۱۸۶/۸۹	۱۸۷/۲۲
	۰/۴۰	۱۵۶/۶۱	۱۵۸/۱۴	۱۵۸/۹۲	۱۵۹/۴۱	۱۵۹/۸۳	۱۶۰/۰۳	۱۶۰/۷۸
	۰/۴۷	۱۳۸/۸۸	۱۴۰/۷۳	۱۴۱/۲۵	۱۴۱/۹۸	۱۴۲/۲۳	۱۴۳/۰۷	۱۴۳/۸۲
	۰/۵۵	۱۲۳/۷۵	۱۲۵/۳۹	۱۲۶/۴۴	۱۲۷/۸۳	۱۲۸/۲۲	۱۲۸/۹۳	۱۲۹/۳۸
	۰/۶۳	۱۱۱/۳۲	۱۱۳/۶۶	۱۱۴/۷۱	۱۱۵/۸۲	۱۱۶/۲۸	۱۱۷/۱۱	۱۱۸/۰۹
	۰/۷۰	۱۰۳/۰۴	۱۰۵/۶۹	۱۰۶/۷۴	۱۰۸/۶۹	۱۰۹/۴۱	۱۱۰/۰۱	۱۱۰/۹۲
۳۰	۰/۳۲	۲۴۰/۱۳	۲۴۰/۴۶	۲۴۱/۵۷	۲۴۲/۵۳	۲۴۳/۱۷	۲۴۳/۶۹	۲۴۴/۳۰
	۰/۴۰	۲۰۶/۰۹	۲۰۷/۱۲	۲۰۷/۴۴	۲۰۷/۸۹	۲۰۸/۸۴	۲۰۹/۵۳	۲۱۰/۵۸
	۰/۴۷	۱۸۳/۶۱	۱۸۴/۳۳	۱۸۵/۲۰	۱۸۶/۳۲	۱۸۷/۲۴	۱۸۷/۸۰	۱۸۸/۷۸
	۰/۵۵	۱۶۳/۸۷	۱۶۵/۳۱	۱۶۶/۸۹	۱۶۷/۳۳	۱۶۷/۸۰	۱۶۸/۷۹	۱۶۹/۶۷
	۰/۶۳	۱۴۸/۳۶	۱۴۹/۷۸	۱۵۰/۸۳	۱۵۲/۷۸	۱۵۳/۴۷	۱۵۳/۸۱	۱۵۴/۵۶
	۰/۷۰	۱۳۷/۴۱	۱۴۰/۵۵	۱۴۱/۶۰	۱۴۳/۵۵	۱۴۴/۰۵	۱۴۴/۷۹	۱۴۵/۲۹



شکل ۵-توزیع سرعت جریان نزدیکی سطح آب در امتداد طول تبدیل ۱ متر به ازای دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه



شکل ٦-تاثیر اعداد فرود بالادست بر راندمان هیدرولیکی تبدیل برای طولهای تبدیل الف) ۱/۰۰متر و ب)۱/۵۰ متر

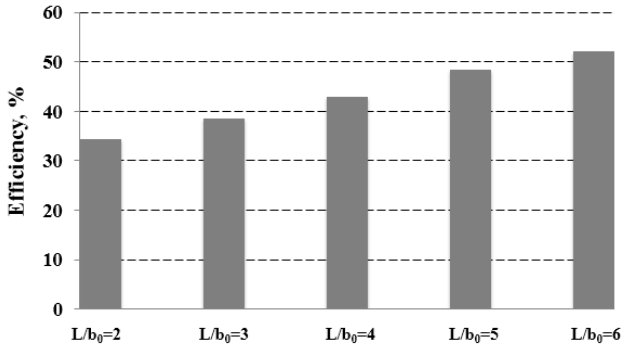


شکل ۷- تاثیر اعداد فرود بالادست بر ضریب تلفات انرژی به ازای دبی‌های مختلف برای طول‌های تبدیل الف) ۱/۰۰متر و ب)۱/۵۰ متر

با توجه به جدول (۲)، به ازای همه دبی‌های ورودی، عمق جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده افزایش می‌یابد. حداکثر و حداقل شیب سطح آب به ترتیب در اعداد فرود ۰/۷۰ و ۰/۳۲ رخ می‌دهد که نشان‌گر این مطلب است که افزایش شیب سطح آب در طول تبدیل، ارتباط مستقیم با عدد فرود بالادست داشته به‌طوری‌که با افزایش عدد فرود بالادست، شیب سطح آب افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۵)، در تمامی اعداد فرود بالادست، در قبل و بعد از تبدیل جریان تقریباً متقارن مشاهده می‌شود. ولی در طول تبدیل، خط حداکثر سرعت جریان به‌طور کامل منطبق بر خط مرکزی کانال نبوده و به علت نواحی چرخشی ایجاد شده در دو طرف تبدیل و آشفتگی جریان در این ناحیه، کمی به سمت دیواره سمت راست تبدیل جابه‌جا می‌شود. تاثیر اعداد فرود بالادست بر بازدهی تبدیل و ضریب تلفات انرژی به‌ترتیب در اشکال (۶) و (۷) نشان داده شده اند.

همان‌طورکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود بالادست، منجر به افزایش شیب سطح آب در طول تبدیل، بازدهی هیدرولیکی تبدیل کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۷)، با افزایش عدد فرود ورودی ضریب تلفات انرژی افزایش یافته به‌طوریکه حداکثر ضریب تلفات انرژی در عدد فرود ۰/۷۰ رخ داده و برابر ۰/۶۱ می‌باشد. مقایسه بازدهی هیدرولیکی کل به‌دست آمده برای پنج طول مختلف تبدیل در شکل (۸) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۸) همانطورکه مشاهده می‌شود، با افزایش طول تبدیل عریض‌شونده، بازدهی هیدرولیکی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش ۵۰ درصدی طول تبدیل، بازدهی هیدرولیکی کل به میزان ۲۰/۳۸ درصد افزایش می‌یابد. بازدهی هیدرولیکی کل به‌دست آمده به ازای دبی‌های ورودی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه برای طول تبدیل ۱ متر به ترتیب ۶۰/۸۳، ۳۹/۹۸ و ۳۰/۳۶ درصد و برای طول تبدیل ۱/۵۰ متر به ترتیب ۶۴/۹۰، ۵۲/۹۰ و ۴۰/۰۸ درصد به‌دست آمدند. ضریب تلفات انرژی در امتداد تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف بالادست و دبی‌های ورودی جریان برای نسبت طول تبدیل به عرض کانال بالادست تبدیل در جدول (۳) آورده شده است.

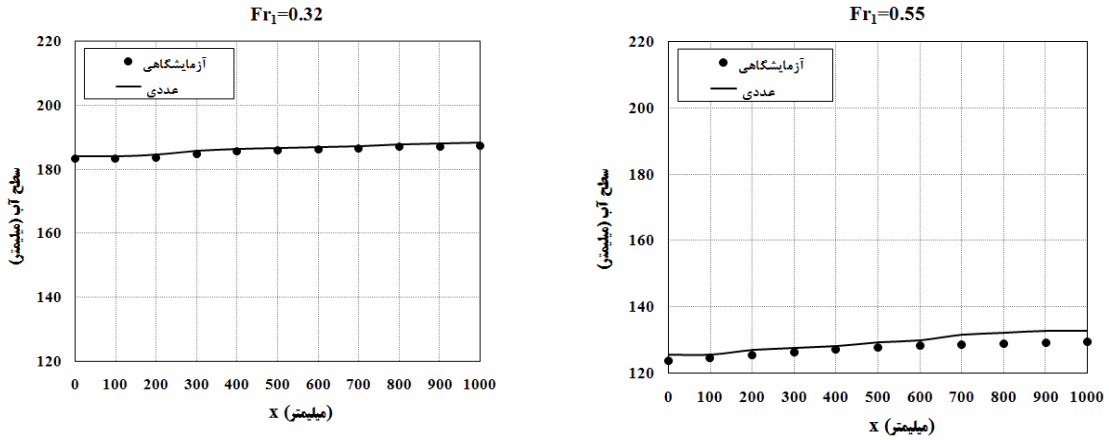


شکل ۸- مقایسه راندمان هیدرولیکی کل تبدیل عریض‌شونده

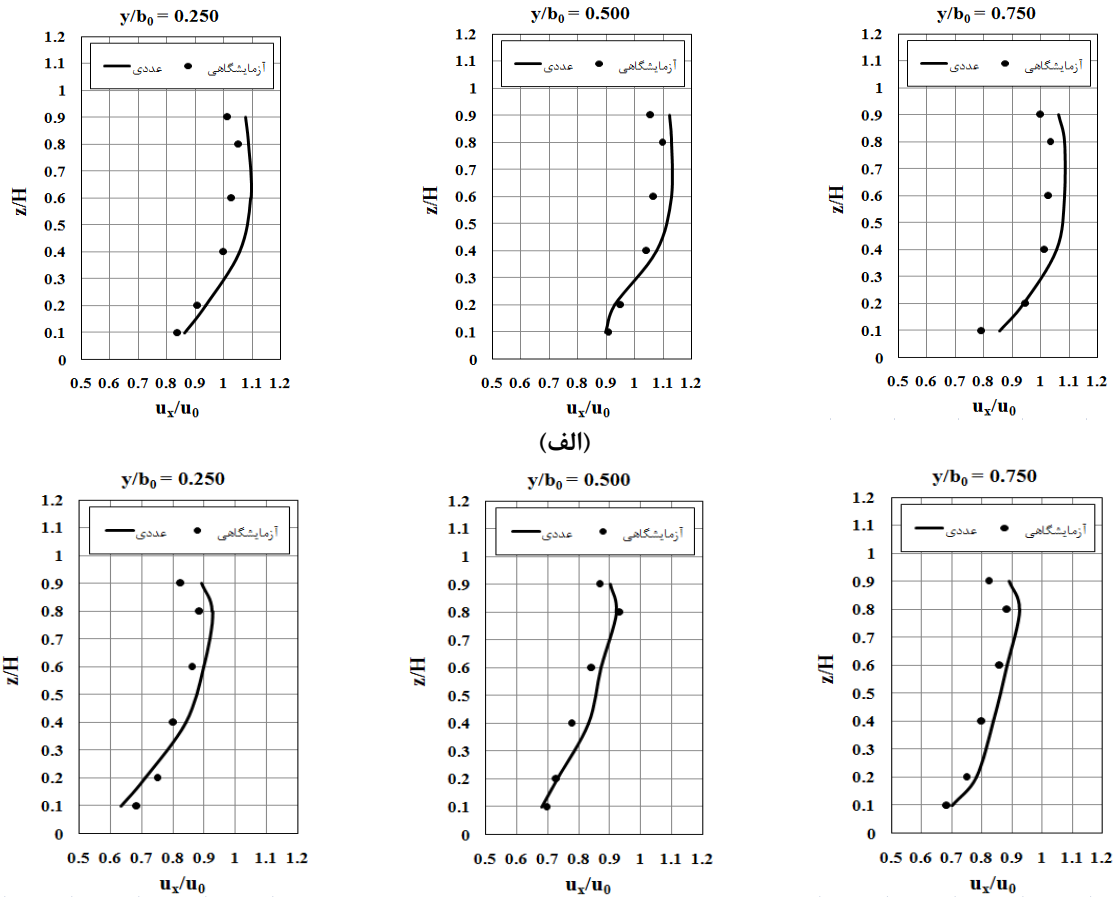
جدول ۳-ضریب تلفات انرژی در امتداد تبدیل عریض شونده برای نسبتهای طول به عرض کانال بالادست تبدیل

دبی ورودی	عدد فرود ورودی	$L/b_0=6$	$L/b_0=4$	$L/b_0=3$	$L/b_0=2$
		ضریب تلفات انرژی	ضریب تلفات انرژی	ضریب تلفات انرژی	ضریب تلفات انرژی
۲۰	۰/۳۲	۰/۳۱۷	۰/۴۱۱	۰/۴۳۹	۰/۵۱۴
	۰/۴۰	۰/۴۱۴	۰/۴۹۷	۰/۵۲۳	۰/۵۷۲
	۰/۴۷	۰/۴۵۶	۰/۵۱۱	۰/۵۳۴	۰/۵۹۱
	۰/۵۵	۰/۴۷۶	۰/۵۳۲	۰/۵۵۴	۰/۵۹۹
	۰/۶۳	۰/۵۰۰	۰/۵۳۶	۰/۵۶۳	۰/۶۰۳
	۰/۷۰	۰/۵۱۲	۰/۵۳۹	۰/۵۶۸	۰/۶۰۸
۳۰	۰/۳۲	۰/۵۲۷	۰/۵۲۷	۰/۵۶۶	۰/۵۹۷
	۰/۴۰	۰/۵۷۹	۰/۵۷۹	۰/۶۱۸	۰/۶۴۸
	۰/۴۷	۰/۵۹۵	۰/۵۹۵	۰/۶۲۶	۰/۷۱۸
	۰/۵۵	۰/۶۰۲	۰/۶۰۸	۰/۶۳۲	۰/۷۲۵
	۰/۶۳	۰/۶۰۶	۰/۶۲۶	۰/۶۳۸	۰/۷۳۱
	۰/۷۰	۰/۵۹۹	۰/۶۰۹	۰/۶۴۲	۰/۷۳۶

با توجه به جدول (۳)، با افزایش L/b_0، ضریب تلفات انرژی کاهش یافته به‌طوری‌که با افزایش نسبت طول از $L/b_0=2$ به $L/b_0=6$، ضریب تلفات انرژی حدود ۳۱/۹۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی از ۱۰ لیتر بر ثانیه به ۳۰ لیتر بر ثانیه، ضریب تلفات انرژی حدود ۱/۶۵ برابر افزایش یافته است. شکل (۹) مقایسه نتایج پروفیل‌های سطح آب شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی را به ازای اعداد فرود مختلف ۰/۳۲ و ۰/۵۵ برای طول تبدیل ۱ متر و دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹)، مطابقت خوبی بین نتایج شبیه سازی شده عددی و نتایج آزمایشگاهی برقرار است. خطای میانگین مربعات و درصد خطا حاصل از مقایسه نتایج پروفیل سطح آب برای اعداد فرود ورودی ۰/۳۲و ۰/۵۵ بر اساس روابط (۱۳) و (۱۴) به‌ترتیب ۰/۳۰ و ۱/۶۰ درصد و ۰/۴۵ و ۱/۸۰ درصد به‌دست آمدند. شکل (۱۰)، پروفیل‌های سرعت طولی بی بعد شده (u_x/u_0) را در مقاطع مختلف تبدیل یک متری و به ازای دبی ورودی ۱۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ورودی ۰/۴۷ نشان می‌دهد.



شکل ۹-مقایسه پروفیل‌های سطح آب شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی به ازای دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه

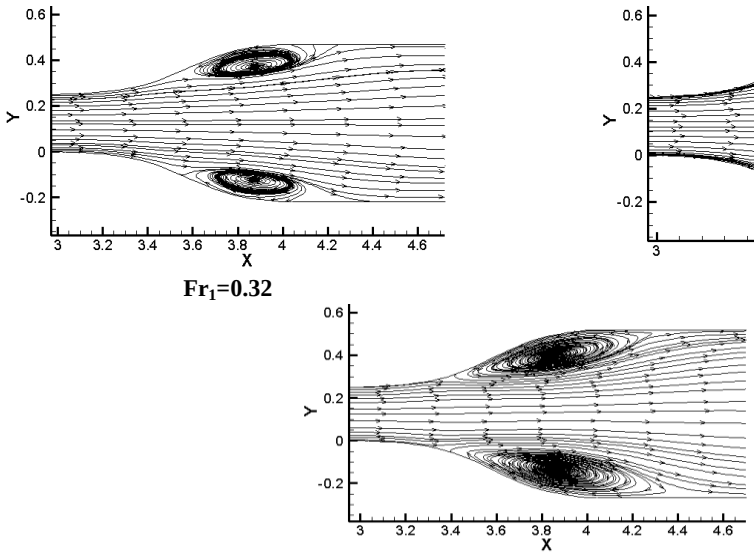


شکل ۱۰- پروفیل‌های سرعت شبیه‌سازی شده در الف) ابتدای تبدیل و ب) انتهای تبدیل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

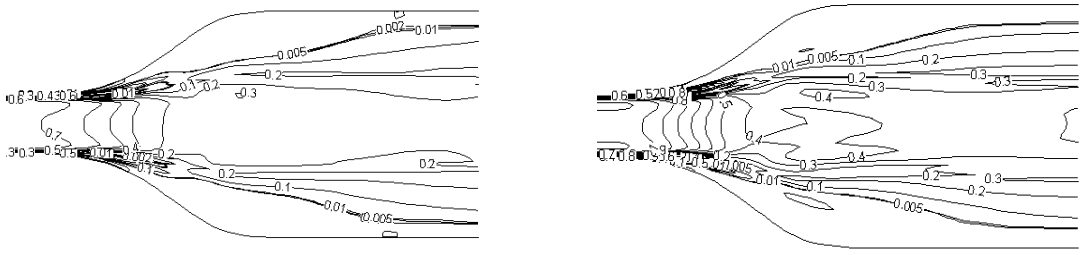
همان‌طورکه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مشابه نتایج آزمایشگاهی با نزدیک شدن به خروجی تبدیل، سرعت طولی کاهش می‌یابد. همچنین مطابقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده پروفیل‌های سرعت جریان و نتایج آزمایشگاهی برقرار است. درصد خطا و خطای میانگین مربعات حاصل از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در مقاطع ورودی، میانه و خروجی تبدیل به‌ترتیب ۴/۶۰،

۵/۹۵ و ۴/۲۰ درصد و ۴/۹۶، ۶/۲۳ و ۴/۵۸ درصد به‌دست آمدند. در ادامه برای بررسی نواحی جدایی جریان ایجاد شده در تبدیل، شکل (۱۱) خطوط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی در نزدیکی سطح آب را برای طول تبدیل یک متر و دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه به ازای اعداد فرود مختلف بالادست نشان می‌دهد.

عدد فرود بالادست یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر الگوی جریان در تبدیل‌های تدریجی عریض شونده می‌باشد (شکل ۱۱). با توجه به شکل (۱۱)، با افزایش عدد فرود بالادست به ازای دبی ورودی ثابت، طول و عرض ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد. طول ناحیه جدایی جریان ایجاد شده به ازای اعداد فرود ۰/۳۲، ۰/۴۷، ۰/۵۵ و ۰/۶۳ به ترتیب ۰/۴۱ متر، ۰/۵۶ متر، ۰/۶۳ متر و ۰/۸۵ متر می‌باشند. همچنین عرض ناحیه چرخشی ایجاد شده به ازای اعداد فرود ۰/۳۲، ۰/۴۷، ۰/۵۵ و ۰/۶۳ به ترتیب ۰/۱۱ متر، ۰/۱۴ متر، ۰/۱۶ متر و ۰/۲۲ متر بدست آمدند. کانتورهای تنش برشی بستر شبیه‌سازی شده در مقاطع مختلف تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف و دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. همانطورکه در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، تنش برشی بستر از مقطع ورودی تبدیل به سمت میانه تبدیل کاهش یافته و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل افزایش می‌یابد. به علت ایجاد نواحی چرخشی جریان در گوشه‌های دو طرف تبدیل، تنش برشی بستر در جهت طولی جریان کاهش می‌یابد. حداکثر تنش برشی بستر در مقطع ورودی و میانه تبدیل رخ داده و همچنین با افزایش عدد فرود بالادست، تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که از عدد فرود ورودی ۰/۳۲ الی ۰/۶۳، مقدار میانگین تنش برشی بستر حدود دو برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- خطوط جریان شبیه‌سازی شده به ازای دبی ورودی ۲۰ لیتر بر ثانیه و اعداد فرود مختلف بالادست



شکل ۱۲-خطوط تنش برشی بستر در مقاطع مختلف تبدیل به ازای الف) عدد فرود ۰/۳۲، ب) عدد فرود ۰/۴۷، ج) عدد فرود ۰/۵۵ و د) عدد فرود ۰/۶۳

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، هیدرولیک جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده کانال‌های مستطیلی به ذوزنقه‌ای تحت جریان زیربحرانی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی الگوی جریان با استفاده از نرم افزار فلوئنت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) به انجام رسید. در مجموع نتایج حاصله برای میدان جریان با شرایط اعمال شده در این تحقیق عبارتنداز:

پروفیل‌های سطح آب شبیه سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند و مطابقت خوبی بین آنها برقرار بود. عمق جریان در امتداد طول تبدیل افزایش یافت. عدد فرود ورودی تاثیر بسزایی بر شیب سطح آب داشت به‌طوریکه با افزایش آن، شیب سطح آب افزایش پیدا کرد. در تمامی اعداد فرود بالادست، در قبل و بعد از تبدیل جریان تقریباً متقارن مشاهده شد. ولی در طول تبدیل، خط حداکثر سرعت جریان به‌طور کامل منطبق بر خط مرکزی کانال نبوده و به علت نواحی چرخشی ایجاد شده در دو طرف تبدیل و آشفتگی جریان در این ناحیه، کمی به سمت دیواره سمت راست تبدیل جابجا می‌شود. با افزایش عدد فرود بالادست، بازدهی تبدیل کاهش یافت. بازدهی هیدرولیکی با افزایش طول تبدیل عریض‌شونده، افزایش یافته به‌طوریکه با افزایش طول تبدیل از ۱ متر به ۱/۵۰ متر، بازدهی هیدرولیکی کل به میزان ۲۰/۳۸ درصد دچار افزایش شد. با افزایش عدد فرود بالادست به ازای دبی ورودی ثابت، طول و عرض ناحیه جدایی جریان افزایش یافتند. تنش برشی بستر از مقطع ورودی تبدیل به سمت میانه تبدیل کاهش یافت و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل افزایش پیدا کرد.

منابع

1- Abbott, D. E., and S. J. Kline. 1962. Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps. *Journal of Basic Engineering* 84, 317.

2- Alauddin, M., and B. C. Basak. 2006. Development of an Expansion Transition in Open Channel Sub-Critical Flow. *Journal of Civil Engineering*, 34(2): 91-101.

3- Basak, B. C., and M. Alauddin. 2010. Efficiency of an Expansive Transition in an Open Channel Subcritical Flow. *DUET Journal*., Dhaka University of Engineering & Technology: 27-32.

4- Fluent 6.3.26 User Manual, Fluent Inc, 2006.

5- Haque, A. 2008. *Some Characteristics of Open Channel Transition Flow*. Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University.

6- Henderson, F. M. 1966. *Open Channel Flow*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.

7- Hosseini, S. M., and J. Abrishami. 2014. *Hydraulic open channels*. Imam Reza University Publishers, Thirty-First Edition. (In Persian).

8- Howes, D. J., Burt, C. M. and B. F. Sanders. 2010. Subcritical contraction for improved open-channel flow measurement accuracy with an upward-looking ADVM. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136: 617–626.

9- Najafi Nejad Nasser, A. 2011. *An Experimental Investigation of Flow Energy Losses in Open- Channel Expansions*, Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University.

10- Najmeddin, S. 2012. *CFD Modeling of Turbulent Flow in Open-Channel Expansions*. Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University.

11- Ramamurthy, A. S., Basak, S. and P. R. Rao. 1970. Open channel expansions fitted with local hump. *Journal of hydraulics division*, ASCE 96(HY5): 1105–1113.

12- Swamee, P. K. and B. C. Basak. 1992. Design of trapezoidal expansive transitions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 118(1): 61-73.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering **Vol. 41, No. 2, Summer 2018, p. 45-59**

EXTENDED ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Transition Length on Energy Losses in Gradual Transitions Open Channels Under Subcritical Flow

A. Asnaashari [1], A. A.r Akhtari[2*], A. A. Dehghani[3], and H. Bonakdari[4]

1- Ph.D. Candidate of Civil Engineering, Hydraulic Structures, Razi University, Kermanshah, Iran.
2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.*(akhtari@razi.ac.ir)*
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
4- Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Received:2 January 2016 Accepted:4 December 2016

Keywords: Expansive Gradual Transition, Flow Pattern, Energy Losses, Flow Separation Zones, Bed Shear Stress, Fluent Model.

Introduction

'Transition' is a short hydraulic structure used to change the cross-sectional shape or flow shape. Transitions are commonly used both in the open-channels and natural waterways. The task of a transition is to connect a narrow channel at the upstream to a wider downstream channel or vice-versa. This, creates a disturbance region of turbulent flow causing energy losses. In general, the structure of a transition prevents the formation of wave and other turbulencies. In this case, the energy loss, due to the change in the amount of the momentum, will be minimized.

Methodology

In the present study, a rectangular-to-trapezoidal transition with a gradual expansion is designed according to the method proposed by Swamee and Basak (1992). In this process, an equation is written for the width of the bed, and by optimizing the proposed equation, the parameters of the equation are obtained. Using a trial and error scheme, the best transition equation can be obtained in terms of different transition lengths. Achieving the objectives of this study, experiments were carried out in the Hydraulic Laboratory of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The laboratory equipment consistes of a main flume with a length of 11 meters,and the width of 1 meter, with a useful height of 0.08 meters. The length and width of the upstream rectangular channel are 3 and 0.25 meters, respectively. The length of the transitions is variable and the length and width of the bottom of the trapezoidal channel floor are 3 and 0.4 meters, respectively. The lateral slope is considered as a one-to-one trapezoidal channel. The measurement of the flow rate is performed using an ultrasonic flow meter embedded in the water transfer tube and controlled by a sharp-crested weir in the downstream channel. The water flow level was fixed by an adjustable gate located at the end of the flume. A depth gauge is used for measuring the water level with a 0.1 mm accuracy level. The Pitot tube is used to measure flow velocity at water level. In order to study the

distribution of flow velocity along the transition, the depth and flow velocity values are measured at different stages while calculating the efficiency and energy loss factor during the transition.

The flow velocity data are gauged along the depth of flow and near-water levels at the 0.20, 0.4, 0.6, and 0.8 times of water depth and near the bed at the beginning, middle, and end of the transition. Experiments were performed for five different discharges including 10, 15, 20, 25, and 30 liters per second. Subsequently, a numerical model is used to examine all flow pattern characteristics. Given that in the laboratory model the secondary flow, flow separation, and other parameters are not measurable it was necessary to use numerical model.

In this study, the Fluent software package with the RSM turbulence model is selected and used. The longitudinal velocity and the flow depthwere gauged in both models in order to adapt the experimental model and its numerical model and validate it. The models are verified using the error (E) and the root mean square error (RMSE) of the numerical simulations. For the length of one meter and discharge of 20 liters per second, the RMSE and E rates obtained from the comparison of the results of the water surface profile at a Froude number of 0.32 were 0.3 and 1.60 respectively and at a Froude number of 0.55, were 0.45 and 1.80 respectively.

Results and Discussion

There is also a good match for the velocities obtained from the numerical model and the experimental results. The RMSE error obtained from the comparisons at the input, middle and output sections are 4.60, 5.95, and 4.20 per-cent at the Froude numbers of 0.32 and 4.96, 6.23 and 4.58 per-cent at the Froude number of 0.55.

To calculate the transition efficiency, the depth and velocity data were gauged at different sections. Therefore, the depth of velocity flow is obtained from the numerical and laboratory models. Observations indicate that, for all inlet discharges, the flow depth increases along the length of the transition. The maximum and minimum gradients of the water surface occur at the Froude numbers of 0.70 and 0.32, respectively, indicating that the change in the gradient of the water surface during the transition is directly related to the Froude number. Accordingly, the Froude number increases as the slope of the water level increases.

In this study, it has been shown that increasing the length of the transition increases the hydraulic efficiency, so that by a 50 percent transition length increment, the total hydraulic efficiency increases up to 20.38 per-cent. By increasing of the L / b0 ratio, the energy loss factor decreases so that by increasing this ratio from L / b0 = 2 to L / b0 = 6, the energy loss coefficient decreases by 31.93 per-cent. Also, with an increase in discharge from 10 liters per second to 30 liters per second, the energy loss ratio increases by 1.65 times.

Conclusions

The results of this research showed that increasing the Froude number increases the length and width of the flow separation region. The length of the separation zone created for the Froude numbers of 0.32, 0.47, 0.55, and 0.63 are 0.41, 0.56, 0.63, and 0.85 meters, respectively. Furthermore, for the same Froude numbers, the separation widths are 0.1, 0.14, 0.16, and 0.22 meters, respectively.

Observations showed that the shear stress is decreased along the inlet section to the midpoint section of the transition while increasing near the end of the transition. The maximum shear stress of the bed occurs at the inlet section. Moreover, increasing the Froude number results in an increase in the shear stress of the bed.

References

1- Hosseini, S. M., and J. Abrishami. 2014. *Hydraulic open channels*. Imam Reza University Publishers, thirty-first edition. In Persian.

2- Abbott, D. E., and S. J. Kline. 1962. Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps. *Journal of Basic Engineering* 84, 317.

3- Alauddin, M., and B. C. Basak. 2006. Development of an Expansion Transition in Open Channel Sub-Critical Flow. *Journal of Civil Engineering*, 34(2): 91-101.

4- Basak, B. C., and M. Alauddin. 2010. Efficiency of an Expansive Transition in an Open Channel Subcritical Flow. *DUET Journal*., Dhaka University of Engineering & Technology: 27-32.

5- Fluent 6.3.26 User Manual, Fluent Inc, 2006.

6- Haque, A. 2008. *Some Characteristics of Open Channel Transition Flow*. Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University.

7- Henderson, F. M. 1966. *Open Channel Flow*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.

8- Howes, D. J., Burt, C. M. and B. F. Sanders. 2010. Subcritical contraction for improved open-channel flow measurement accuracy with an upward-looking ADVM. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136: 617–626.