

مطالعه هیدرولیک جریان در تبدیل‌های تدریجی عریض شونده در کانال‌های روباز

عادل اثنی‌عشری*^۱، امیراحمد دهقانی^۲ و علی‌اکبر اختری^۳

^۱ عضو هیات علمی مؤسسه غیرانتفاعی میرداماد، گرگان

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۸، پذیرش: ۹۶/۶/۴، نشر آنلاین: ۹۶/۶/۵)

چکیده

تبدیل‌ها به طور معمول هم در کانال‌های باز مهندسی و هم در کانال‌های طبیعی کاربرد دارند. با افزایش ابعاد در راستای مقطع در تبدیل، از سرعت جریان کاسته می‌شود. تحت جریان زیربحرانی و در شرایط جریان دائمی، کاهش سرعت جریان منجر به افزایش فشار آب و همچنین گرادیان فشار معکوس می‌شود. که این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به وجود آورده و باعث تلفات انرژی در جریان می‌شود. در این مطالعه، هیدرولیک جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض‌شونده کانال‌های مستطیلی به دوزنقه‌ای تحت جریان زیربحرانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی الگوی جریان با استفاده از نرم‌افزار فلونت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) انجام گرفته است. پروفیل‌های سطح آب و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه شده است که مقایسه این نتایج مطابقت خوبی را بین آنها نشان می‌دهد. همچنین راندمان (بازدهی) تبدیل و ضریب تلفات انرژی در امتداد تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف ورودی محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، راندمان تبدیل و ضریب تلفات انرژی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تأثیر عدد فرود ورودی بر نواحی جدایی جریان، جریان‌های ثانویه ایجاد شده و تنش برشی بستر در امتداد تبدیل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. از ابتدای تبدیل به سمت میانه تبدیل، تعداد نواحی چرخشی ناشی از جریان‌های ثانویه افزایش یافته و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل تعداد این نواحی کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش عدد فرود ورودی، تنش برشی بستر در امتداد تبدیل افزایش یافت.

کلید واژه‌ها: تبدیل مستطیلی به دوزنقه‌ای، هیدرولیک جریان، راندمان تبدیل، نواحی جدایی جریان، جریان‌های ثانویه.

۱- مقدمه

از افزایش هزینه‌های نگهداری ناشی از افزایش فرسایش بستر و دیواره‌های کانال استفاده شود (Najafi, ۲۰۱۱). به طور کلی ساختمان تبدیل مانع ایجاد موج و سایر آشفتگی‌های جریان شده و در این صورت، افت انرژی ناشی از تغییر مقدار حرکت به حداقل خود خواهد رسید. 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 در سال ۱۹۶۲، الگوهای جریان متقارن را تحت مطالعه آزمایشگاهی مشاهده کردند. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که عدد رینولدز و شدت آشفتگی هیچ تأثیری بر روی الگوی جریان ندارند.

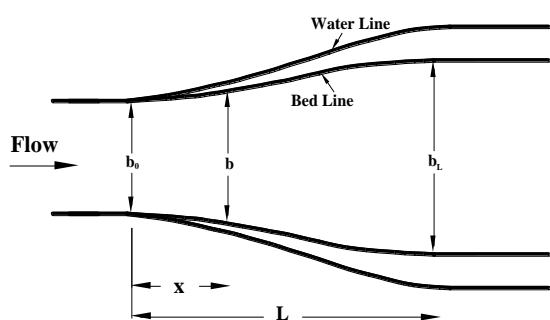
تبدیل عبارت است از سازه هیدرولیکی کوتاهی که برای تغییر سطح مقطع و یا شکل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Henderson, ۱۹۶۶). تبدیل‌ها به طور معمول هم در کانال‌های باز مهندسی و هم در کانال‌های طبیعی کاربرد دارند. وظیفه تبدیل این است که کانال باریک در مقطع بالادست را به کانال بزرگ در مقطع پایین دست یا بالعکس اتصال می‌دهد. تبدیل کانال‌های عریض شونده، تبدیل‌هایی با افزایش سطح مقطع در جهت جریان می‌باشند (Najafi, ۲۰۱۱). تحت جریان زیربحرانی و در شرایط جریان دائمی، کاهش سرعت جریان منجر به افزایش فشار آب و همچنین گرادیان فشار معکوس می‌شود. که این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به وجود آورده و باعث تلفات انرژی در جریان می‌شود. بدین منظور بایستی از تبدیل مناسب برای کنترل یا حداقل کردن تلفات انرژی جهت جلوگیری

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۱-۲۷۳۵۷۰۷

تبدیل با دیواره مستقیم با شدت کمتری صورت می‌گیرد. در این مطالعه، هیدرولیک جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده کانال‌های مستطیلی به دوزنقه‌ای تحت جریان زیر بحرانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی الگوی جریان با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) انجام گرفته است. پروفیل‌های سطح آب و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه شده است که مقایسه این نتایج مطابقت خوبی را بین آنها نشان می‌دهد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تأثیر عدد فرود ورودی بر نواحی جدایی جریان، جریان‌های ثانویه ایجاد شده و تنش برشی بستر در امتداد تبدیل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش طراحی تبدیل

در مطالعه حاضر، جهت طراحی تبدیل تدریجی عریض شونده مستطیلی به دوزنقه‌ای از روش مطالعه Swamee و Basak در سال ۱۹۹۲ استفاده شده است. خلاصه‌ای از این روش در ادامه آمده است (شکل (۱)).



شکل ۱- طرح تبدیل تدریجی عریض شونده مستطیلی به دوزنقه‌ای

برای پروفیل عرض بستر داریم (Basak و Swamee, ۱۹۹۲):

$$B = [a \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^p + 1]^q \quad (1)$$

که در این رابطه: B عرض بی بعد شده بستر تبدیل، 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، به دست می‌آیند (Basak و Swamee, ۱۹۹۲):

$$E(a,p,q) = \frac{100}{N} \sum [B - [a \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^p + 1]^q] \quad (2)$$

جدایی جریان مشاهده کردند. آنها نشان دادند که زاویه واگرایی و طول تبدیل بر روی ناحیه جدایی جریان تأثیر می‌گذارند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که اگر از تلفات انرژی ناشی از اصطکاک صرف نظر کنیم، هد انرژی مخصوص در قبل و بعد از تبدیل افقی، تغییرات ناچیزی دارد.

Basak و Alauddin در سال ۲۰۰۶ ناحیه چرخشی جریان در یک تبدیل عریض شونده را به طور آزمایشگاهی مشاهده کردند. هدف از این مطالعه، طراحی تبدیل عریض شونده بر اساس حداقل ناحیه جدایی جریان و همچنین تلفات هد انرژی کم‌تر بود. Haque در سال ۲۰۰۸ به بررسی آزمایشگاهی و عددی در تبدیل عریض شونده پرداخت. در این تحقیق، پروفیل‌های توزیع سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و شدت آشفتگی مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین تنش برشی در طول تبدیل در حالت‌های با و بدون استفاده از برآمدگی در کف کانال نیز مورد بررسی قرار گرفت.

Basak و Alauddin در سال ۲۰۱۰ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر اعداد فرود مختلف ورودی و دبی‌های مختلف ورودی به تبدیل عریض شونده بر راندمان تبدیل پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش عدد فرود ورودی و دبی ورودی به تبدیل، درصد راندمان و بازدهی تبدیل کاهش می‌یابد.

Howes و همکاران در سال ۲۰۱۰ 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 تحت جریان زیر بحرانی پرداختند.

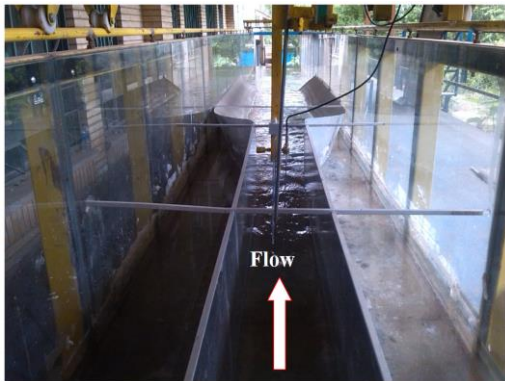
Najafi Nejad Nasser در سال ۲۰۱۱ به بررسی آزمایشگاهی میزان تلفات انرژی در تبدیل عریض شونده و تأثیر استفاده از یک برآمدگی در کف کانال بر روی کاهش تلفات انرژی پرداخت. او نشان داد که میزان تلفات انرژی در حالت استفاده از برآمدگی نسبت به حالت بدون برآمدگی، حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

Najmeddin در سال ۲۰۱۲ 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. سپس تأثیر استفاده از یک برآمدگی در کف کانال بر روی نواحی جدایی جریان ایجاد شده در تبدیل مورد مطالعه قرار گرفت. با قرارگیری برآمدگی در کف کانال، نواحی چرخشی کوچک‌تر شدند.

صادقی و همکاران در سال ۱۳۹۲ به بررسی آزمایشگاهی توزیع پروفیل‌های سرعت و میزان تلفات انرژی در مقاطع مختلف تبدیل‌های همگرا با دیواره مستقیم و دارای انحنا به ازای اعداد فرود مختلف ورودی پرداختند. آنها نشان دادند که در تبدیل انحنادار، کاهش سرعت جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به

شده است (شکل (۲)).

جهت بررسی توزیع سرعت جریان در امتداد تبدیل و محاسبه راندمان 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. آزمایش‌ها 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.



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی ساخته شده در این مطالعه

جهت محاسبه راندمان تبدیل، اندازه‌گیری سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل ضروری می‌باشد. با فرض این که در جهت محور کانال تبدیل می‌باشد، راندمان تبدیل تدریجی عریض شونده به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Basak و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\varepsilon = \frac{y_2 - y_1}{\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g}} \quad (7)$$

که در این رابطه، y_1 و y_2 به ترتیب اعماق جریان در مقاطع ورودی (مقطع ۱) و خروجی (مقطع ۲) تبدیل، v_1 و v_2 به ترتیب 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 جهت قرارگیری در معادله راندمان تبدیل محاسبه می‌شوند. همچنین ضریب تلفات انرژی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Najafi، ۲۰۱۱):

$$k_e = \frac{H_2 - H_1}{\frac{v_1^2}{2g}} \quad (8)$$

که k_e ضریب تلفات انرژی و H_i هد انرژی کل شامل مجموع هد سرعت، هد ارتفاع و هد فشار می‌باشد.

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:

$$B = [2.52 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{1.35} + 1]^{-0.775} \quad (3)$$

رابطه (۳) می‌تواند به فرم زیر نوشته شود (Swamee و Basak، ۱۹۹۲):

$$b = b_0 + (b_L - b_0) [2.52 \left(\frac{L}{x} - 1 \right)^{1.35} + 1]^{-0.775} \quad (4)$$

که در آن: b ، b_0 و b_L به ترتیب عرض بستر کانال مستطیلی، عرض بستر تبدیل و عرض بستر کانال دوزنقه‌ای و L طول تبدیل می‌باشند. با آنالیز کردن تعداد زیادی از پروفیل‌های شیب جانبی، یک معادله جهت طراحی تبدیل‌های مستطیلی به دوزنقه‌ای مطابق زیر به دست آمد (Swamee و Basak، ۱۹۹۲):

$$\frac{m}{m_L} = \varepsilon^{1.23} \quad (5)$$

که در این رابطه: m و m_L به ترتیب شیب جانبی تبدیل و شیب جانبی کانال دوزنقه‌ای می‌باشند. رابطه (۵) می‌تواند به فرم ساده‌تر زیر نوشته شود (Swamee و Basak، ۱۹۹۲):

$$m = m_L \left(\frac{x}{L} \right)^{1.23} \quad (6)$$

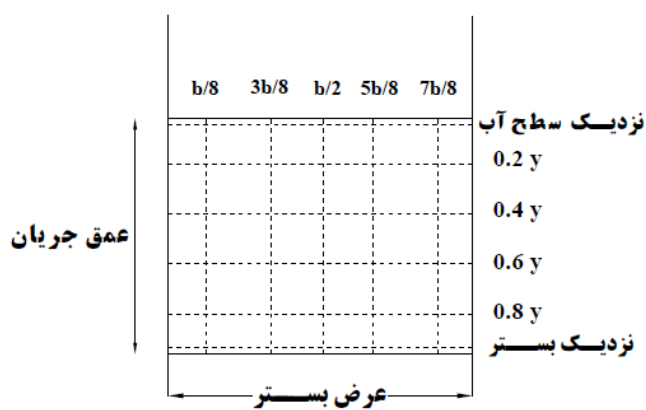
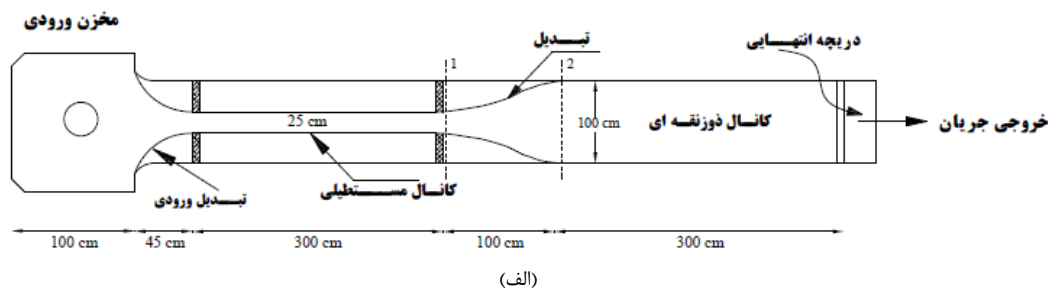
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مدل آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف این تحقیق آزمایش‌هایی 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 ۳ متر و ۰/۲۵ متر، طول تبدیل تدریجی ۱ متر و طول و عرض بستر کانال دوزنقه‌ای پایین دست تبدیل ۳ متر و ۰/۴۰ متر می‌باشند. شیب جانبی کانال دوزنقه‌ای 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 آلتراسونیک با دقت ۰/۲٪ تعبیه شده در لوله انتقال آب انجام گرفته و به وسیله یک سرریز لبه تیز در کانال برگشتی پایین دست کنترل می‌شود. سطح آب جریان به وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای فلوم تنظیم شده و جهت اندازه‌گیری سطح آب از دستگاه عمق سنج نقطه‌ای با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. فلوم آزمایشگاهی مجهز به ریل غلطکی جهت حمل ابزارهای اندازه‌گیری بوده و جهت اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت سنج میکرومولینه با بازه ۲/۵۰ الی ۱۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه بهره گرفته

جدول ۱- محدوده پارامترهای هیدرولیکی جریان

عدد فرود ورودی (Fr)	سرعت ورودی جریان (متر بر ثانیه، u_0)	عمق جریان بالادست (میلی متر)	دبی جریان ورودی (لیتر بر ثانیه، Q)
۰/۳۲-۰/۷۰	۰/۳۴۵-۰/۴۹۳	۱۱۵-۲۴۳	۱۰-۳۰



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

۳-۲- نرم افزار عددی و معادلات حاکم بر جریان

نرم افزار فلونت معادلات ناویر- استوکس را با استفاده از روش احجام محدود حل می کند. روش احجام محدود بر اساس گسسته سازی 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، به ترتیب روش های آپویند مرتبه دوم و کوئیک استفاده شده است. همچنین برای گسسته سازی معادلات فشار از روش استاندارد انتخاب شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که برای جریان آشفته در سیال تراکم ناپذیر در یک هندسه سه بعدی به ترتیب روابط (۹) و (۱۰) می باشند. همچنین در مدل های آشفتگی مختلف، انرژی جنبشی آشفتگی به صورت رابطه (۱۱) تعریف می شود (Olsen, Haque, ۲۰۰۸):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

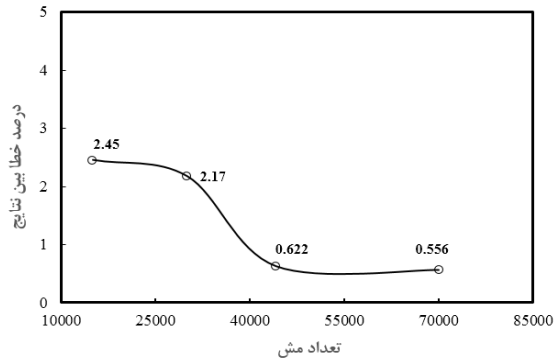
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + g_{xi} + \alpha \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$K = \frac{1}{2} u_i \cdot u_i \quad (11)$$

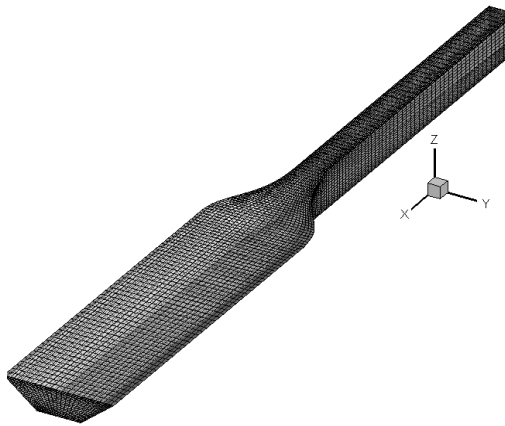
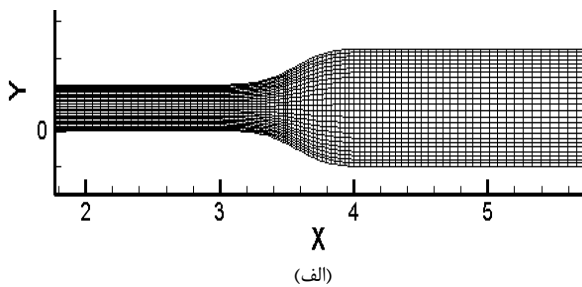
که در این روابط، $R_{ij} = -\rho \cdot \overline{u_i \cdot u_j}$ تنش رینولدز، U_i و U_j به ترتیب سرعت جریان در جهت x و y ، t زمان، p فشار، k انرژی جنبشی آشفتگی، ρ چگالی سیال، α ویسکوزیته دینامیکی سیال و g_{xi} شتاب گرانشی در جهت x_i می باشند. در مطالعه حاضر، مدل آشفتگی RSM با تابع دیواره استاندارد جهت شبیه سازی عددی جریان آشفته مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل آشفتگی، شکل تانسوری معادله انتقال به صورت زیر (User manual, ۲۰۰۶):

$$Uk \frac{\partial \overline{u_i \cdot u_j}}{\partial x_k} = P_{ij} + \phi_{ij} + D_{ij} - P \varepsilon_{ij} \quad (12)$$

که در این رابطه، P_{ij} تانسور تولید، ϕ_{ij} تانسور فشار- کرنش، D_{ij} تانسور پخش شدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف می باشند (User manual, ۲۰۰۶). جهت شبیه سازی سطح آزاد از روش حجم



شکل ۴- درصد خطای حاصل از مقایسه تغییرات عمق جریان در حالات مختلف شبکه بندی



شکل ۵- پلان (الف) و نمای سه بعدی (ب) شبکه بندی میدان محاسباتی

۴- نتایج و بحث

همان طور که گفته شد، جهت محاسبه راندمان تبدیل، اندازه گیری عمق و سرعت جریان در مقاطع مختلف تبدیل ضروری می باشد. در جدول (۲) مقادیر سطح آب اندازه گیری شده در محور مرکزی تبدیل را به ازای اعداد فرود مختلف ورودی آورده شده است. همچنین مقادیر سرعت اندازه گیری شده در امتداد کانالها در نزدیکی سطح آب به ازای عدد فرود بالادست ۰/۴۷ در شکل (۶) نشان داده شده است.

سیال (VOF) استفاده شده است.

۳-۳- شبکه بندی 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 می گیرند. 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 دیواره ها از لحاظ هیدرولیکی صاف در نظر گرفته شده اند. انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ لزجت آشفتگی (ϵ) در مرز ورودی به وسیله معادلات زیر تخمین زده شده اند (Versteeg, ۲۰۰۷):

$$K = \frac{3}{2} (T \cdot u_0)^2 \quad (13)$$

$$\epsilon = C_u 0.75 \left(\frac{k^{1.5}}{l}\right) \quad (14)$$

که در این روابط، u_0 متوسط سرعت ورودی، T_u شدت آشفتگی که بین ۰/۱ الی ۰/۵ می باشد، C_u ثابت و برابر ۰/۰۹ و $l = ۰/۰۷ L$ برابر قطر هیدرولیکی می باشند (Versteeg, ۲۰۰۷). برای محاسبه درصد میانگین خطای حاصله از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، از روش جذر میانگین مربعات (RMSE) به صورت زیر استفاده شده است.

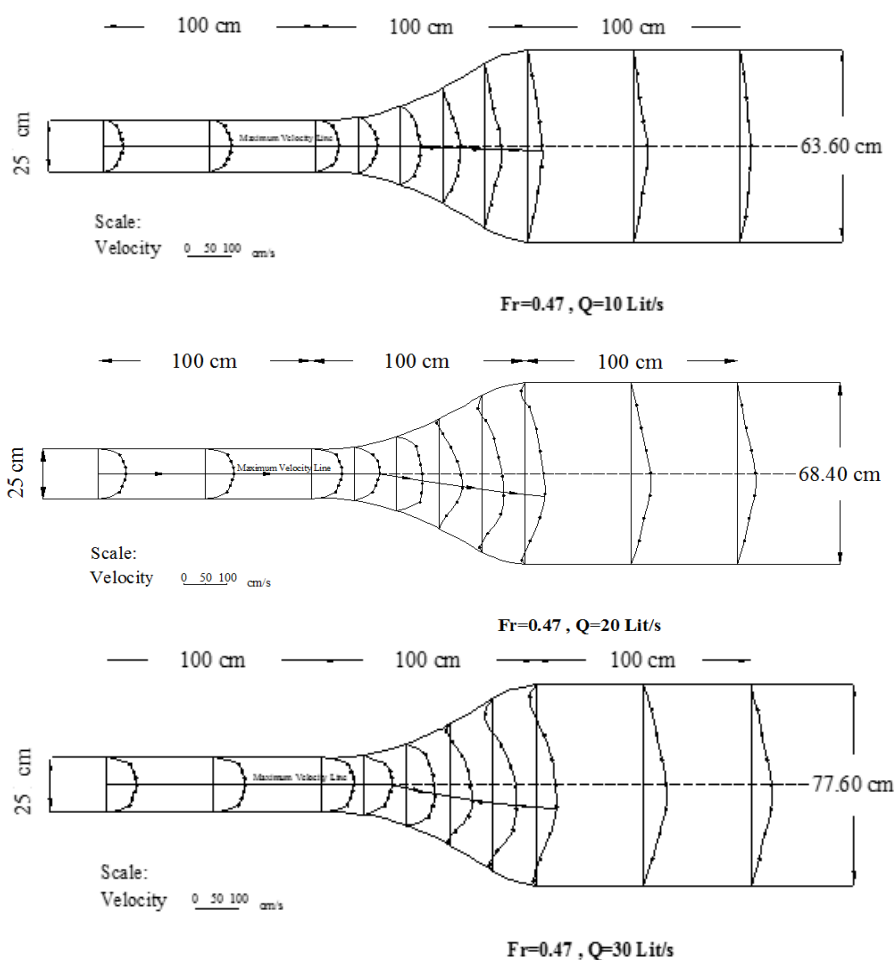
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{X_a - X_m}{X_m}\right)^2} * 100 \quad (15)$$

در این رابطه، X_{obs} داده های مشاهده شده، X_{model} داده های شبیه سازی عددی و N تعداد داده ها می باشند. همچنین یکی از پارامترهای مهم در سرعت اجرای مدل، شبکه بندی مناسب منطقه ای می باشد که جریان در آن برقرار است. نمودار تعداد سلول های شبکه در برابر درصد خطا در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۴) با افزایش تعداد مش از ۴۴۱۰۰ به ۷۰۰۰۰ اثر چندانی بر روی درصد خطا ندارد و تعداد مش ۴۴۱۰۰ به عنوان مش بهینه انتخاب شده است.

شکل (۵)، پلان و نمای سه بعدی شبکه بندی میدان محاسباتی را نشان می دهد. تعداد سلول های شبکه میدان محاسباتی به ترتیب در جهات مختلف x ، l و z در کانال مستطیلی بالادست ۶۰، ۱۵ و ۲۱، در تبدیل ۳۰، ۱۵ و ۲۱ و در کانال ذوزنقه ای پایین دست ۵۰، ۱۵ و ۲۱ عدد می باشند.

جدول ۲- مقادیر سطح آب اندازه گیری شده در محور مرکزی تبدیل

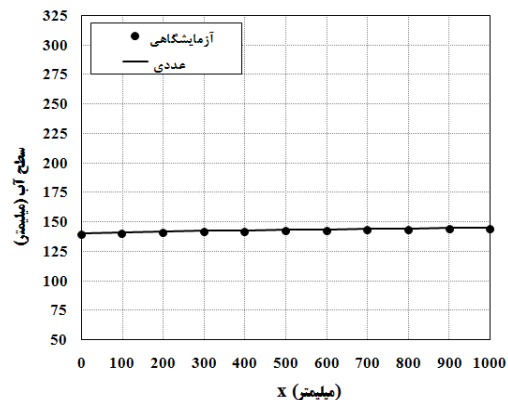
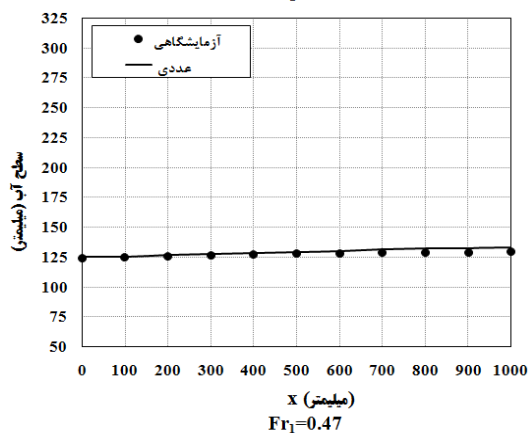
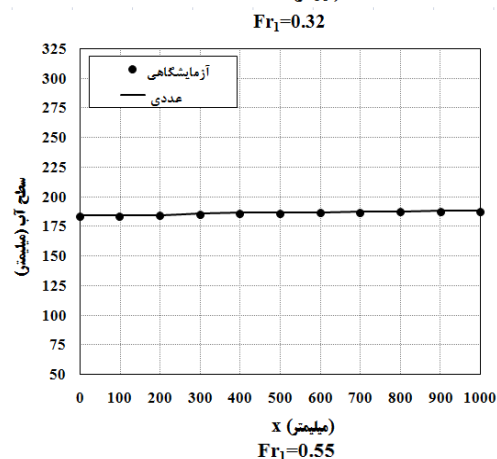
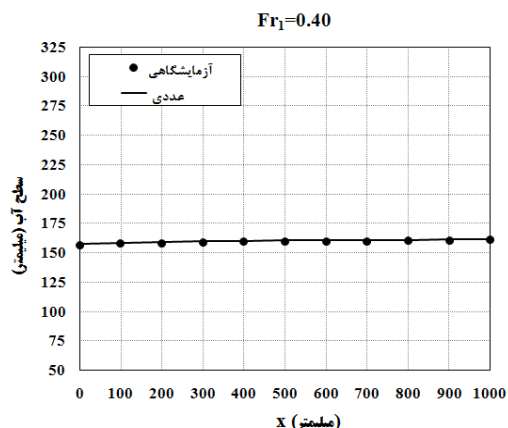
عمق جریان در خروجی (میلی متر)	عمق جریان در 5L/6 (میلی متر)	عمق جریان در 4L/6 (میلی متر)	عمق جریان در L/2 (میلی متر)	عمق جریان در L/3 (میلی متر)	عمق جریان در L/6 (میلی متر)	عمق جریان در ورودی (میلی متر)	عدد فرود ورودی (لیتر بر ثانیه)	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)
۱۱۶/۹۹	۱۱۶/۵۸	۱۱۶/۱۵	۱۱۵/۹۸	۱۱۵/۶۹	۱۱۴/۷۹	۱۱۳/۴۹	۰/۳۲	۰/۳۲
۱۰۱/۱۰	۱۰۰/۴۵	۹۹/۶۴	۹۹/۳۹	۹۸/۷۵	۹۷/۸۲	۹۷/۰۶	۰/۴۰	۰/۴۰
۸۹/۰۴	۸۸/۳۳	۸۷/۵۸	۸۷/۳۵	۸۷/۱۵	۸۶/۲۰	۸۴/۶۴	۰/۴۷	۰/۴۷
۸۱/۸۰	۸۱/۳۲	۸۱/۰۶	۸۰/۹۱	۷۹/۹۵	۷۸/۸۱	۷۶/۲۰	۰/۵۵	۰/۵۵
۷۴/۸۲	۷۴/۰۵	۷۳/۷۶	۷۲/۶۴	۷۱/۸۳	۶۹/۶۴	۶۸/۰۲	۰/۶۳	۰/۶۳
۷۰/۷۱	۶۹/۸۷	۶۹/۳۸	۶۸/۶۶	۶۷/۸۵	۶۵/۶۶	۶۳/۰۱	۰/۷۰	۰/۷۰



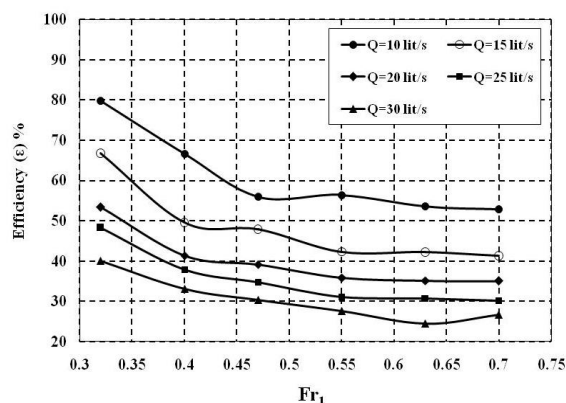
شکل ۶- توزیع سرعت جریان نزدیک سطح آب در راستای عرض و در امتداد طول تبدیل

کمی از ابتدای تبدیل منطبق بر خط مرکزی کانال بوده ولی بعد از آن به سمت دیواره سمت راست تبدیل جابجا می شود. به ازای دبی های بالاتر از ۱۰ لیتر بر ثانیه، سرعت جریان در کناره های تبدیل مقادیر منفی و نزدیک به صفر دارند که بیانگر این مطلب است که در این نواحی چرخش جریان وجود دارد. همچنین با نزدیک شدن به انتهای تبدیل، مقادیر سرعت کاهش می یابند. تأثیر اعداد فرود ورودی بر راندمان تبدیل و ضریب تلفات انرژی به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده اند.

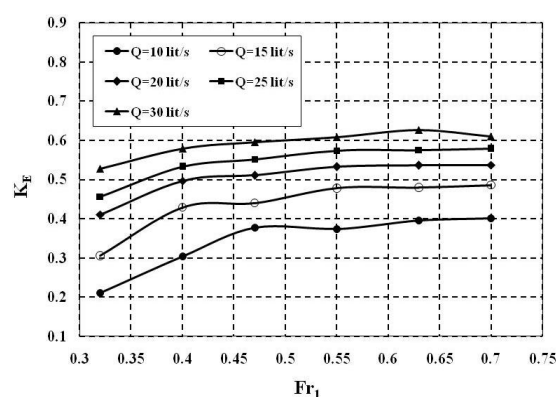
با توجه به جدول (۲)، عمق جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده افزایش می یابد. ماکزیمم و مینیمم شیب سطح آب به ترتیب در اعداد فرود ۰/۷۰ و ۰/۳۲ رخ می دهد که نشانگر این مطلب است که افزایش شیب سطح آب در طول تبدیل، ارتباط مستقیم با عدد فرود بالادست داشته به طوری که با افزایش عدد فرود ورودی، شیب سطح آب افزایش می یابد. مطابق شکل (۶)، در تمامی دبی ها به جز دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه جریان نامتقارن مشاهده می شود. خط ماکزیمم سرعت جریان در



شکل 9- مقایسه پروفیل‌های سطح آب شبیه‌سازی شده با



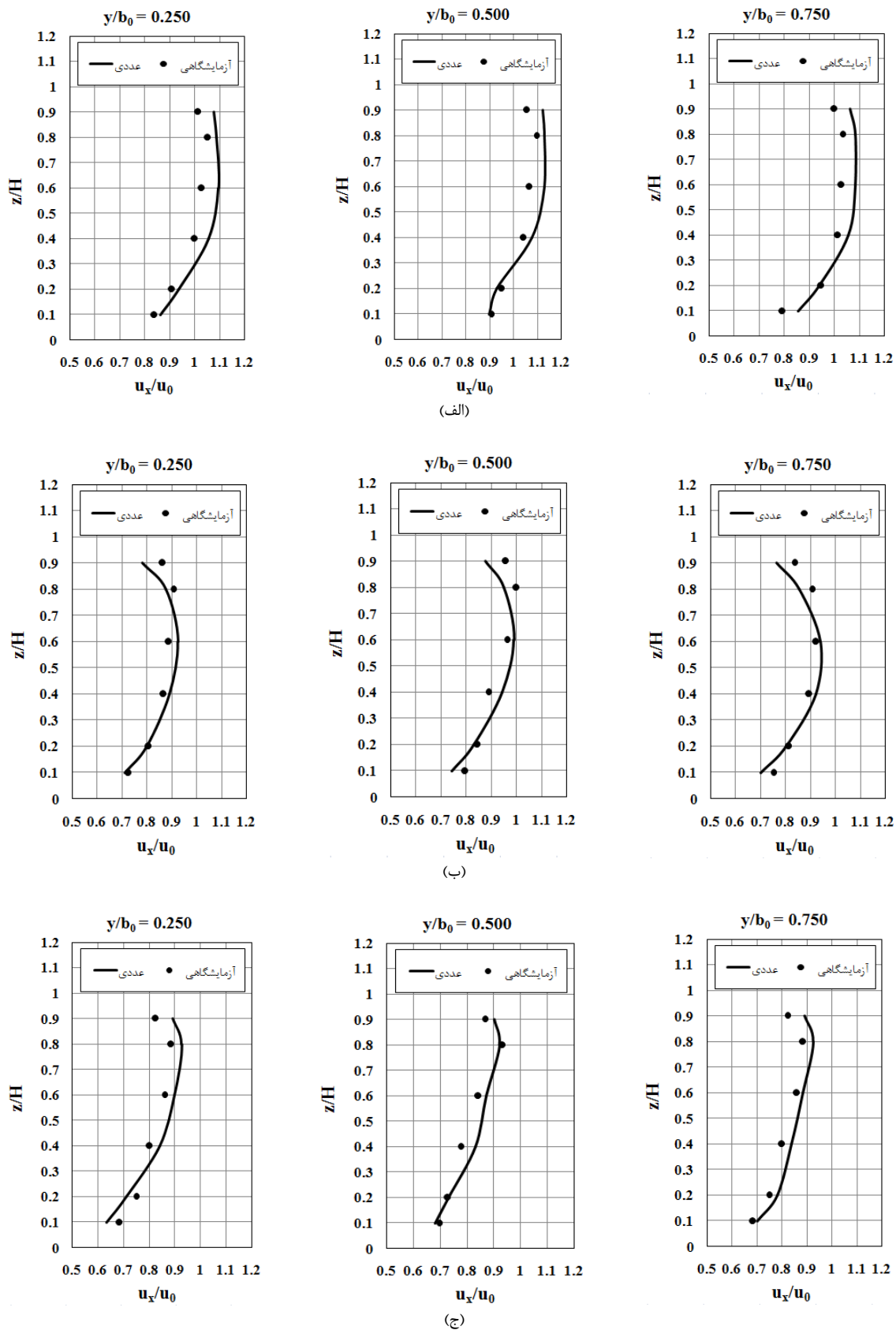
شکل 7- تأثیر اعداد فرود ورودی بر راندمان تبدیل به ازای دبی‌های مختلف ورودی



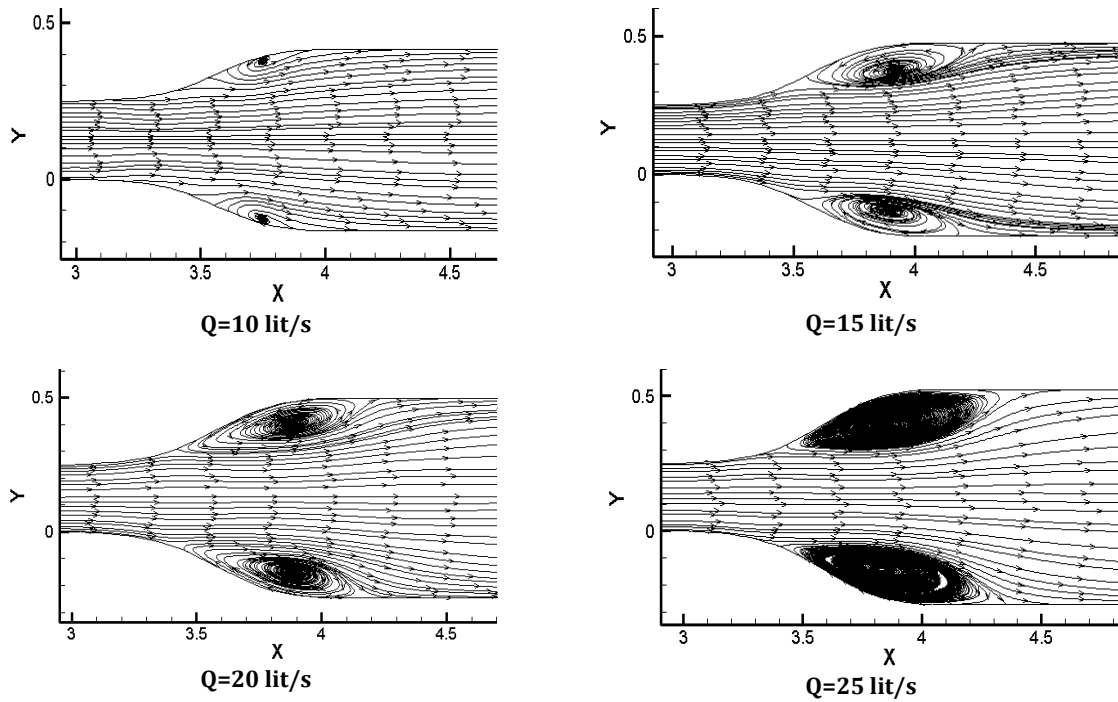
شکل 8- تأثیر اعداد فرود ورودی بر ضریب تلفات انرژی در امتداد تبدیل به ازای دبی‌های مختلف ورودی

همان‌طور که در شکل (7) مشاهده می‌شود، با افزایش دبی ورودی جریان راندمان هیدرولیکی تبدیل افزایش می‌یابد به طوری که راندمان تبدیل محاسبه شده در دبی‌های ورودی 10، 20 و 30 لیتر بر ثانیه به ترتیب به ترتیب 39/98٪، 48/32٪ و 60/83٪ می‌باشند. همچنین با افزایش عدد فرود ورودی، منجر به افزایش شیب سطح آب در طول تبدیل، راندمان هیدرولیکی تبدیل کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (8)، با افزایش عدد فرود ورودی ضریب تلفات انرژی افزایش می‌یابد به طوری که ماکزیمم ضریب تلفات انرژی در عدد فرود 0/70 رخ داده و برابر 0/609 می‌باشد. همچنین با افزایش دبی ورودی، ضریب تلفات انرژی افزایش می‌یابد.

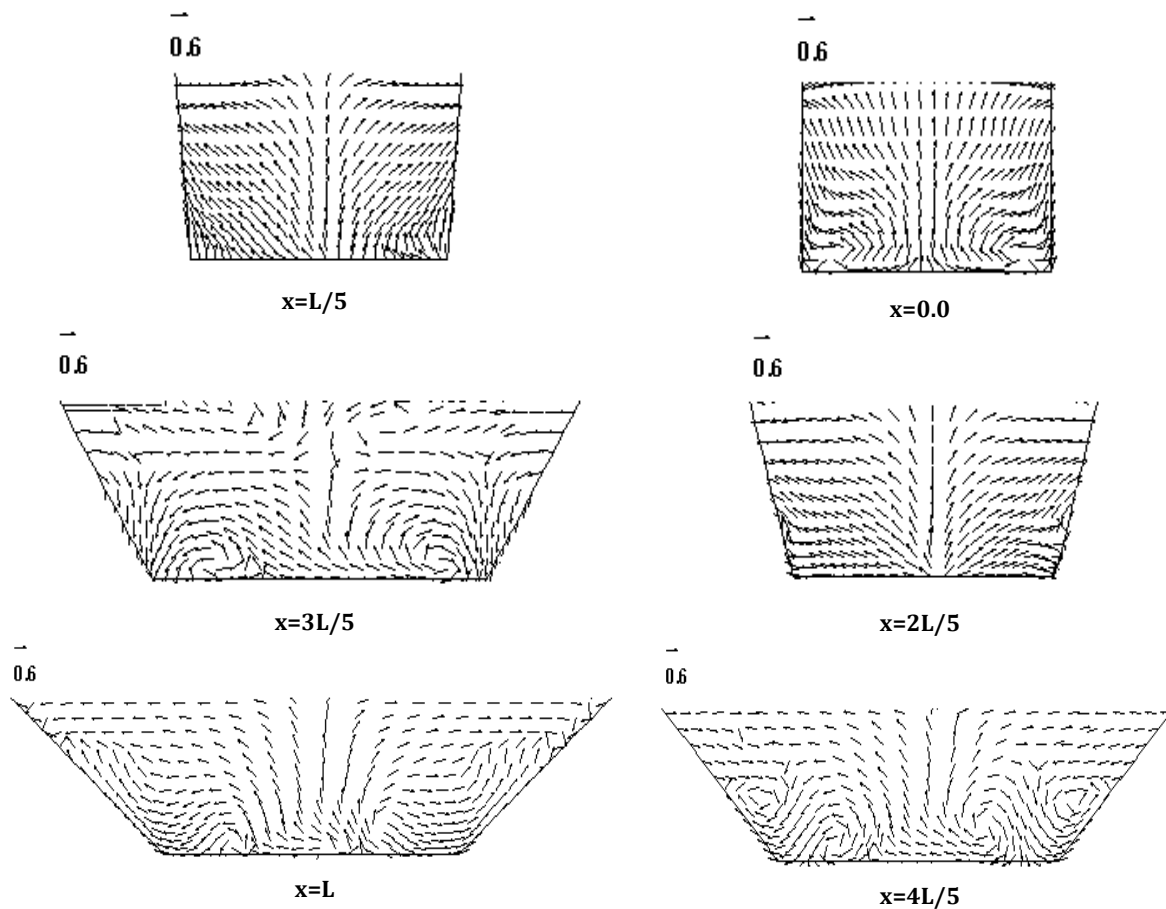
شکل (9) مقایسه نتایج پروفیل‌های سطح آب شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی را به ازای اعداد فرود مختلف ورودی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (9)، مطابقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده عددی و نتایج آزمایشگاهی برقرار است. درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج پروفیل سطح آب برای اعداد فرود ورودی 0/32، 0/40، 0/47، 0/55 به ترتیب 0/1676٪، 0/458٪، 0/676٪، 0/1795٪ و 0/895٪ به دست آمدند.



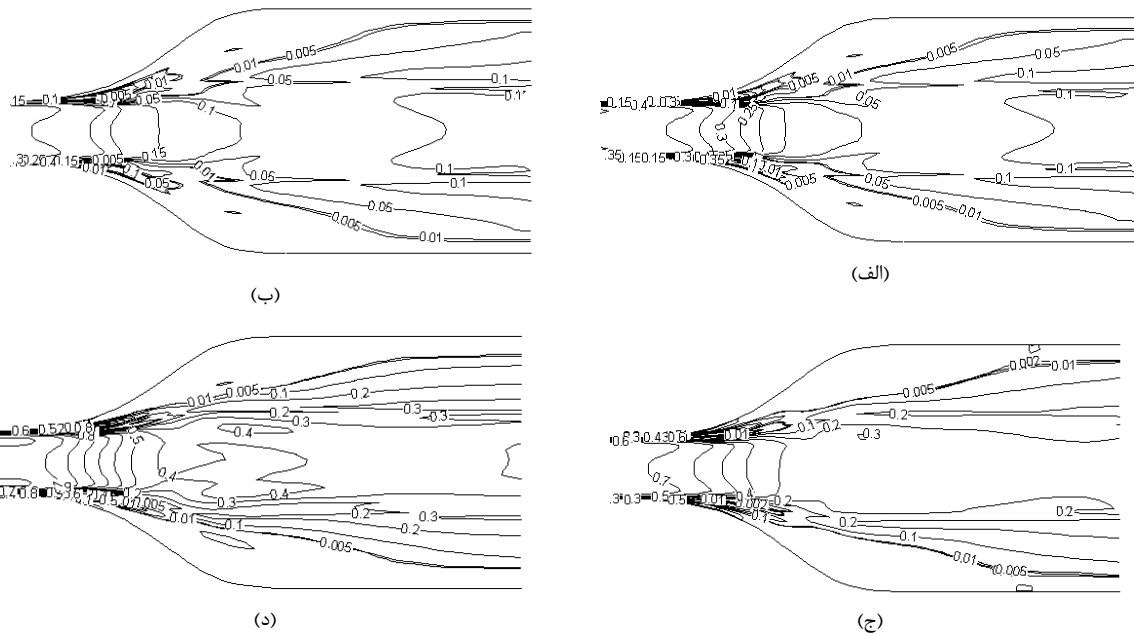
شکل ۱۰- پروفیل‌های سرعت طولی شبیه‌سازی شده در: الف) ابتدای تبدیل، ب) وسط تبدیل، ج) انتهای تبدیل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۱۱- خطوط جریان ایجاد شده در طول تبدیل به ازای دبی های ورودی مختلف



شکل ۱۲- جریان ثانویه ایجاد شده در امتداد تبدیل به ازای دبی ورودی ۲۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۳- کانتورهای تنش برشی بستر در مقاطع مختلف تبدیل به ازای: الف) عدد فرود ۰/۳۲، ب) عدد فرود ۰/۴۷، ج) عدد فرود ۰/۵۵، د) عدد فرود ۰/۶۳

ثانیه به دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، از ۰/۳۹ متر به ۰/۲۵ متر افزایش می‌یابد. به دلیل عدم تعادل بین گرادیان فشار جانبی، نیروی گریز از مرکز و نیروی برشی ناشی از انحنای خطوط جریان، در طول تبدیل جریان حلزونی (جریان‌های ثانویه) به وجود می‌آید (سیدیان و همکاران، ۱۳۹۰). برای بررسی این گرداب، جریان ثانویه ایجاد شده در مقاطع مختلف تبدیل مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام گرفته نتیجه می‌شود، ماکزیمم قدرت جریان ثانویه در مقاطع $x=4L/5$ و $x=3L/5$ از تبدیل رخ می‌دهد. کانتورهای تنش برشی بستر در مقاطع مختلف تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف ورودی در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۳) 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. ماکزیمم تنش برشی بستر در مقطع ورودی و میانه تبدیل رخ داده و همچنین با افزایش عدد فرود بالادست، تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. به طوری که از عدد فرود ورودی ۰/۳۲ الی ۰/۶۳، مقدار میانگین تنش برشی بستر حدود دو برابر افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، هیدرولیک جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض شونده کانال‌های مستطیلی به دوزنقه‌ای تحت جریان زیربحرانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در کنار

شکل (۱۰)، پروفیل‌های سرعت طولی بی بعد شده (u_x/u_0) را در مقاطع مختلف تبدیل و به ازای دبی ورودی ۱۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ورودی ۰/۴۷ نشان می‌دهد. در این شکل، u_x و u_0 به ترتیب سرعت طولی جریان در جهت x ، سرعت ورودی جریان و عمق جریان در هر مقطع می‌باشند.

همان‌طور که 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. میانگین درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در مقاطع ورودی، میانه و خروجی تبدیل به ترتیب ۴/۹۶۲٪، ۶/۲۳۴٪ و ۴/۵۷۵٪ به دست آمدند. در ادامه جهت بررسی نواحی جدایی جریان ایجاد شده در تبدیل، شکل (۱۱) خطوط جریان در نزدیکی سطح آب را به ازای عدد فرود ورودی ۰/۴۷ و دبی‌های مختلف ورودی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

دبی ورودی یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر الگوی جریان در تبدیل‌های تدریجی عریض شونده می‌باشد (شکل (۱۱)). با توجه به شکل (۱۱)، با افزایش دبی ورودی، طول و عرض ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد. طول ناحیه جدایی جریان ایجاد شده به ازای دبی‌های ورودی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۰/۱۶ متر، ۰/۶۲ متر، ۰/۶۷ متر و ۰/۹۸ متر می‌باشند.

همچنین عرض ناحیه چرخشی ایجاد شده از دبی ۱۰ لیتر بر

- Journal of Civil Engineering, 2006, 34 (2), 91-101.
- Basak BC, Alauddin M, "Efficiency of an Expansive Transition in an Open Channel Subcritical Flow", DUET Journal, Dhaka University of Engineering & Technology, 2010, 1, 27-32.
- Chun-quan FU, Hai-mei Jiang, Hong-jun Yin, Yu-chi SU, Ye-ming Zeng, "Finite Volume Method for Simulation of Viscoelastic Flow through an Expansion Channel", Journal of Hydrodynamics, 2009, 21, 360-365.
- Escudier MP, Oliveira PJ, Poole RJ, "Turbulent Flow through a Plane Sudden Expansion of Modest Aspect Ratio", Journal of Physics of Fluids, 2002, AIP 14 (10), 3641-3654.
- Fluent 6.3.26 User Manual, Fluent Inc, 2006.
- Haque A, "Some Characteristics of Open Channel Transition Flow", Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University, 2008.
- Henderson FM, "Open Channel Flow", Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, 1966.
- Mehta PR, "Separated Flow through Large Sudden Expansions", Journal of the Hydraulics Division, 1981, ASCE 107 (HY4), 451-460.
- Najafi Nejad Nasser A, "An Experimental Investigation of Flow Energy Losses in Open-Channel Expansions", Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University, 2011.
- Najmeddin S, "CFD Modeling of Turbulent Flow in Open-Channel Expansions", Msc Thesis, Civil Engineering, Concordia University, 2012.
- Olsen NRB, "Numerical Modelling and Hydraulics", Department of Hydraulic and Environmental Engineering the Norwegian University of Science and Technology, 2008, ISBN 82-7598-074-7.
- Ramamurthy AS, Basak S, Rao PR, "Open channel expansions fitted with local hump", journal of hydraulics division- ASCE 1970, 96 (HY5), 1105-1113.
- Swamee PK, Basak BC, "Design of trapezoidal expansive transitions", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, ASCE 118 (1), 61-73.
- Versteeg HK, Malalasekera W, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", ISBN: 978-0-13-127498-3, London, Second Edition, 2007, 1-517.
- مطالعه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی سه بعدی الگوی جریان با استفاده از نرم‌افزار فلونت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) به انجام رسید. در مجموع نتایج حاصله برای میدان جریان با شرایط اعمال شده در این تحقیق عبارتند از:
- پروفیل‌های سطح آب شبیه‌سازی 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 تأثیر به‌سزایی بر شیب سطح آب داشت به طوری که با افزایش آن، شیب سطح آب افزایش پیدا کرد.
 - خط ماکزیمم سرعت جریان در کمی از ابتدای تبدیل منطبق بر خط مرکزی کانال بود ولی بعد از آن به سمت دیواره سمت راست تبدیل جابجا شد. سرعت جریان در کناره‌های تبدیل مقادیر منفی و نزدیک به صفر دارند که بیانگر این مطلب است که در این نواحی چرخش جریان وجود دارد. مشابه نتایج آزمایشگاهی با نزدیک شدن به خروجی تبدیل، سرعت طولی کاهش پیدا کرد.
 - با نزدیک شدن به میانه تبدیل، تعداد نواحی چرخشی افزایش پیدا کرده و با نزدیک شدن به خروجی تبدیل کاهش یافت. با افزایش عدد فرود جریان ورودی، قدرت جریان ثانویه افزایش یافت. همچنین از ورودی تبدیل به سمت وسط تبدیل، قدرت جریان ثانویه کاهش یافته و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل این مقدار افزایش می‌یابد.
 - با افزایش عدد فرود بالادست، راندمان و بازدهی تبدیل کاهش یافت. علت این مطلب این است که افزایش عدد فرود باعث افزایش شیب سطح آب شده و راندمان تبدیل را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش دبی ورودی، ضریب تلفات انرژی دچار افزایش شد.
 - تنش برشی بستر از مقطع ورودی تبدیل به سمت میانه تبدیل کاهش یافت و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل افزایش پیدا کرد. ماکزیمم تنش برشی بستر در مقطع ورودی و میانه تبدیل رخ داد و همچنین با افزایش عدد فرود بالادست، تنش برشی بستر افزایش یافت.

۶- مراجع

- صادقی ح، دانشفراز ر، بهمنش ج، "بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در تبدیل‌های همگرا"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۹۲.
- سیدیان س م، شفاعی بجستان م، "تعیین ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی در محل آبگیرهای جانبی"، نشریه آب و فاضلاب، ۱۳۹۰، ۴، ۸۳-۹۴.
- Abbott DE, Kline SJ, "Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps", Journal of Basic Engineering, 1962, 84, 317.
- Alauddin M, Basak BC, "Development of an Expansion Transition in Open Channel Sub-Critical Flow",

EXTENDED ABSTRACT

Study of Flow Hydraulics in Expansive Gradual Transitions Open Channels

Adel Asnaashari ^{a,*}, Amir Ahmad Dehghani ^b, Ali Akbar Akhtari ^c

^a Faculty of Mirdamad Institution, Gorgan, Iran

^b Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

^c Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 16 February 2017; **Accepted:** 26 August 2017

Keywords:

Transition of Rectangular to Trapezoidal, Flow Hydraulic, Transition Efficiency, Flow Separation Zone, Secondary Currents.

1. Introduction

Channel expansions are common in both natural and artificial open channels. With increasing cross-sectional dimensions in an expansion, the flow decelerates. Under Subcritical flow and steady flow conditions, reducing the flow velocity due to increasing the water pressure and adverse pressure gradient. In this study, the flow hydraulic along the expansive transition of rectangular to trapezoidal under subcritical flow has been investigated experimentally. Also, a three-dimensional numerical simulation of the flow pattern was developed using the fluent software with RSM turbulent model. Water surface and flow velocity profiles at different sections of transition were compared with experimental results. The results showed a good agreement between numerical and experimental results. Then, the efficiency of the transition and coefficient of energy head loss were calculated. The results show that with increasing the upstream Froude number, the efficiency of the transition and coefficient of energy head loss are decreased and increased, respectively. After calibration, the effect of inflow Froude numbers on flow separation zones, secondary currents, and bed shear stress along the transition was investigated numerically.

2. Methodology

2.1. Experimental study

Experiments have been conducted in a re-circulating flume having a length of 11m; width of 1 m and height of 0.8 m. The transition with a length of 1m is connected to an upstream rectangular reach having length of 3 m and width of 0.25 m and a downstream trapezoidal reach having bed width of 0.4m and the side slope of 1:1 .

The bed and sides of the flume were made of glass supported by metal frame. Measurement of discharge was done using an ultrasonic flow meter located in supply pipe and checked with a sharp crested weir in downstream return channel. Water was supplied from a sump into the entrance tank (Basak and Alauddin, 2010).

2.2. Numerical Modeling

For numerical simulation of the turbulent flow field, fluent software with RSM turbulent model was used. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved in addition of continuity equation (Chun et al. 2009). Quick and second Order Upwind schemes were used for solving momentums and turbulence equations,

* Corresponding Author

E-mail addresses: adel.asnaashari@gmail.com (Adel Asnaashari), amirahmad.dehghani@gmail.com (Amir Ahmad Dehghani), akhtari@razi.ac.ir (Ali Akbar Akhtari).

respectively Also, standard method was used for discretization of pressure equation (Basak and Alauddin, 2006).

3. Results and discussion

The flow depth increases along the expansive transition. $Fr_1=0.70$ has the maximum water surface slope and $Fr_1=0.32$ has the minimum slope. It is possible that the increase in the water surface slope is related to the increasing value for the Froude number and with increasing the inlet Froude number, water surface slope is increased. Excepting $Q=10$ lit/s flow was never symmetrical with respect to the center line of the channel. The maximum velocity line coincided with the center line of the channel, for a short length after entry. Thereafter, it shifted to the side to which the main flow attached (Escudier et al. 2002).

For discharges above 10 lit/s, velocities at transition corners are negative and close to zero that indicate flow separation zones are formed there. (Abbot and Kline, 1962). Also, along the transition with approaching to the transition outlet, velocities values are decreased. The hydraulic efficiency of the transition has been shown in Fig. 1.

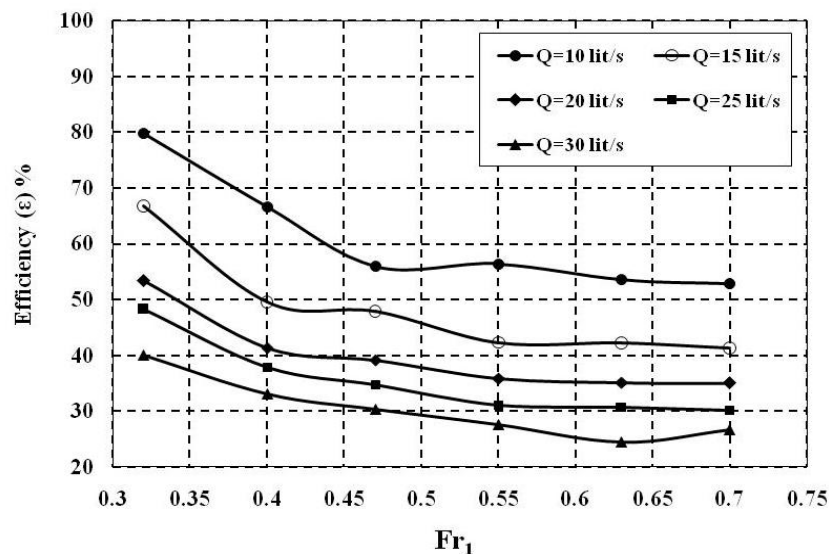


Fig. 1. Hydraulic efficiency of the transition for different inlet discharges

4. Conclusions

After calibration, the effect of inflow Froude numbers on flow separation zones, secondary currents, and bed shear stress along the transition was investigated numerically. From transition inlet toward middle transition, circulation zones numbers of secondary currents increase and with approaching to the transition outlet, circulation zones were decreased. Also, with increasing the inflow Froude number, bed shear stress along the transition was increased.

5. References

- Abbott DE, Kline SJ, "Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps", *Journal of Basic Engineering*, 1962, 84, 317.
- Alauddin M, Basak BC, "Development of an Expansion Transition in Open Channel Sub-Critical Flow", *Journal of Civil Engineering*, 2006, 34 (2), 91-101.
- Basak BC, Alauddin M, "Efficiency of an Expansive Transition in an Open Channel Subcritical Flow", *DUET Journal*, Dhaka University of Engineering & Technology, 2010, 1, 27-32.
- Chun-quan FU, Hai-mei Jiang, Hong-jun Yin, Yu-chi SU, Ye-ming Zeng, "Finite Volume Method for Simulation of Viscoelastic Flow through an Expansion Channel", *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21, 360-365.
- Escudier MP, Oliveira PJ, Poole RJ, "Turbulent Flow through a Plane Sudden Expansion of Modest Aspect Ratio", *Journal of Physics of Fluids*, 2002, AIP 14 (10), 3641-3654.
- Fluent 6.3.26 User Manual, Fluent Inc, 2006.