

بررسی عددی تأثیر عدد فرود ورودی بر الگوی جریان در تبدیل‌های عریض‌شونده تدریجی در کانال‌های روباز

علی اکبر اختری*^۱، عادل اثنی عشری^۲، امیر احمد دهقانی^۳، حسین بنگداری^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۵

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- دانشجوی دکتری عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۳- دانشیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: akhtari@razi.ac.ir

چکیده

تبدیل‌ها به‌طور معمول در کانال‌های باز مصنوعی کاربرد دارند. با افزایش ابعاد تبدیل در راستای جریان، از سرعت جریان کاسته می‌شود. تحت شرایط جریان زیر بحرانی دائمی، کاهش سرعت جریان منجر به افزایش فشار آب شده و همچنین گرادیان فشار معکوس می‌شود. این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به‌وجود آورده و باعث تلفات انرژی جریان می‌شود. مدل‌های فیزیکی به‌خاطر پیچیدگی جریان و همچنین تأثیرات ناشی از مقیاس، به تنهایی قادر به ارائه درک روشنی از فیزیک حاکم بر این مسأله نمی‌باشند و لذا لازم است الگوی جریان به‌صورت عددی در کنار مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بررسی شود. در این مطالعه، الگوی جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض‌شونده کانال‌های مستطیلی به مستطیلی تحت جریان زیربحرانی با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) ارائه شده در نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار گرفته است. پروفیل‌های سطح آب و سرعت جریان حاصل از دو روش در مقاطع مختلف تبدیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که مقایسه این نتایج مطابقت خوبی را بین آنها نشان می‌دهد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تأثیر عدد فرود ورودی بر قدرت جریان ثانویه ایجاد شده، بازده هیدرولیکی تبدیل، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش برشی بستر در مقاطع مختلف تبدیل شبیه‌سازی شده و نتایج نشان دادند که با افزایش عدد فرود بالادست، قدرت جریان ثانویه در امتداد تبدیل افزایش یافته و بازده تبدیل کاهش می‌یابد. بالاترین بازده مربوط به عدد فرود ۰/۴۰ بوده و مقدار آن برابر ۶۰/۸۳ درصد می‌باشد. همچنین، با افزایش عدد فرود، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش برشی بستر افزایش یافتند، به‌طوری‌که از ورودی تبدیل به سمت انتهای تبدیل، انرژی جنبشی آشفتگی برای تمامی اعداد فرود کاهش یافته و قدرت آشفتگی حدود ۳۰/۷۱٪ دچار کاهش گردید.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، تبدیل تدریجی، تنش برشی بستر، عدد فرود ورودی، مدل فلوئنت

Numerical Investigation of the Effect of Inflow Froude Number on Flow Pattern in Expansive Gradual Transitions in Open Channels

AA Akhtari^{*1}, A Asnaashari², AA Dehghani³, H Bonakdari⁴

Received: 03 August 2015

Accepted: 05 September 2016

¹ Assist. Prof., Dept. of Civil Engin., Razi Univ., Kermanshah, Iran

² Ph.D. Student of Civil Engin., Hydraulic Structures, Razi Univ., Kermanshah, Iran

³ Assoc.Prof., Dept. of Water Engin., Gorgan Univ., of Agric., Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴ Assoc. Prof., Dept. of Civil Engin., Razi Univ., Kermanshah, Iran

* Correspond Author, Email: akhtari@razi.ac.ir

Abstract

Transitions are commonly used structures in both natural and artificial open channels. With increasing the transition dimensions along the flow, the flow decelerates. Under subcritical steady state flow conditions, reducing the flow velocity increases the water pressure and reverses pressure gradient. This phenomenon creates separation zone and turbulent eddy flow, and causes the flow energy losses. Due to the complexity of flow pattern and scale effects, physical models can solely provide a clear understanding of the physical principles governing the flow field, so it is necessary to study flow pattern numerically along with the field and experimental studies. In this study, the flow pattern in a rectangular to rectangular expansive transition, has been simulated under subcritical flow with RSM turbulence model using Fluent software. Water surface and flow velocity profiles obtained by the two methods at different sections of transition were compared with experimental results. The results showed a good agreement between the simulated and experimental data. After validation of the numerical model, the effects of inflow Froude numbers on strength of secondary current, hydraulic efficiency of the transition, turbulent kinetic energy and bed shear stress at different cross sections were simulated. The results showed that with increasing the inflow Froude number, the strength of secondary current along the transition increased, while the hydraulic efficiency decreased. Maximum efficiency (60.83%) occurred in $Fr_1=0.40$. Also, with increasing the Froude number, turbulent kinetic energy and bed shear stress increased, so that, from transition inlet to the outlet, turbulent kinetic energy for total Froude numbers decreased with a 30.71% reduction in turbulent power.

Keywords: Bed shear stress, Flow pattern, Fluent model, Gradual transition, Inflow Froude number

مقدمه

جریان می‌باشند. آنها عموماً هم در کانال‌های باز طبیعی و هم در مستهلک‌کننده‌های انرژی ساخته شده مورد استفاده قرار می‌گیرند (نجفی‌نژاد ناصری ۲۰۱۱). با افزایش ابعاد در راستای مقطع در تبدیل، از سرعت جریان کاسته می‌شود. تحت جریان زیر بحرانی و در شرایط جریان دائمی، کاهش سرعت جریان منجر به افزایش فشار آب شده و همچنین گرادیان فشار معکوس می‌شود. این موضوع، ناحیه جدایی جریان و حرکت گردابی آشفته را به وجود آورده و باعث تلفات انرژی در

تبدیل‌ها به‌طور معمول هم در کانال‌های باز مصنوعی 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. به عبارت دیگر هر گونه تغییر در جهت، شیب و یا مقطع کانال که باعث تغییر در شکل و حالت جریان گردد، به وسیله تبدیل صورت می‌پذیرد (هندرسون ۱۹۶۶). تبدیل کانال‌های عریض شونده، تبدیل‌هایی با افزایش سطح مقطع در جهت

پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش عدد فرود ورودی و دبی ورودی به تبدیل، درصد بازده و بازدهی تبدیل کاهش می‌یابد. نجفی نژاد ناصر (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی میزان تلفات انرژی در تبدیل عریض‌شونده 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. نجم الدین (۲۰۱۲) به بررسی عددی الگوی جریان در تبدیل عریض‌شونده با استفاده از مدل عددی CFX پرداخت. در این مطالعه، پروفیل‌های سرعت جریان و نواحی جدایی جریان در سه زاویه مختلف دیواره تبدیل و به‌ازای 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 (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 تبدیل با دیواره مستقیم با شدت کمتری صورت می‌گیرد. در مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی میدان جریان در تبدیل تدریجی عریض‌شونده به‌کمک نرم‌افزار فلونت با مدل آشفتگی RSM صورت گرفته است. در ادامه، پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تأثیر عدد فرود ورودی بر قدرت جریان ثانویه شکل گرفته، بازده تبدیل، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش برشی بستر در مقاطع مختلف تبدیل مورد بررسی قرار گرفته است.

جریان می‌شود. بدین‌منظور بایستی از تبدیل مناسب برای کنترل یا کمینه کردن تلفات انرژی جهت جلوگیری از افزایش هزینه‌های نگهداری ناشی از افزایش فرسایش بستر و دیواره‌های کانال استفاده شود (نجفی‌نژاد ناصر ۲۰۱۱). به‌طور کلی ساختمان تبدیل مانع ایجاد موج و سایر آشفتگی‌های جریان شده و در این‌صورت، افت انرژی ناشی از تغییر مقدار حرکت به کمترین مقدار 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. ابوت و کلین (۱۹۶۲) الگوهای جریان متقارن را تحت مطالعه آزمایشگاهی بررسی و به این نتیجه رسیدند که عدد رینولدز و شدت آشفتگی هیچ تأثیری بر روی الگوی جریان ندارند. رامامورسی و همکاران (۱۹۷۰) به بررسی آزمایشگاهی ناحیه جدایی جریان در تبدیل عریض‌شونده پرداختند و تأثیر 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 تأثیر 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. علاء الدین و باساک (۲۰۰۶) ناحیه چرخشی جریان در یک تبدیل عریض‌شونده را به‌طور آزمایشگاهی مشاهده کردند. هدف از این مطالعه، طراحی تبدیل عریض‌شونده بر اساس کمینه ناحیه جدایی جریان و همچنین تلفات بار انرژی کمتر بود. هاگو (۲۰۰۸) به بررسی آزمایشگاهی و عددی در تبدیل عریض‌شونده 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. باساک و علاء‌الدین (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر اعداد فرود و دبی‌های مختلف ورودی به تبدیل عریض‌شونده بر بازده تبدیل

مواد و روشها

معادلات حاکم بر جریان

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 معادلات آشفتگی و مومنتوم، به-ترتیب روش‌های آپویند مرتبه دوم^۱ و کوئیک^۲ استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی معادلات فشار، روش استاندارد انتخاب شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که برای جریان آشفتگی در سیال تراکم‌ناپذیر در یک هندسه سه‌بعدی به‌ترتیب روابط ۱ و ۲ می‌باشند. همچنین در مدل‌های آشفتگی مختلف، انرژی جنبشی آشفتگی به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود (اولسن ۲۰۰۸):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad [1]$$

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

$$K = \frac{1}{2} \overline{U_i U_i} \quad [3]$$

که در این روابط، $R_{ij} = -\rho u_i' u_j'$ تنش رینولدز، U_i و U_j به‌ترتیب 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 می‌باشند. در مطالعه حاضر، مدل آشفتگی RSM با تابع دیواره استاندارد جهت شبیه‌سازی عددی جریان آشفتگی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل

آشفتگی، شکل تانسوری معادله انتقال به‌صورت زیر می‌باشد (ورستینگ و مالاسکرا ۲۰۰۷):

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad [4]$$

که در این رابطه، P_{ij} تانسور تولید، Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش، D_{ij} تانسور پخش‌شدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف می‌باشند. معادلات انتقال تنش‌های رینولدز در مدل آشفتگی RSM می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود (ورستینگ و مالاسکرا ۲۰۰۷):

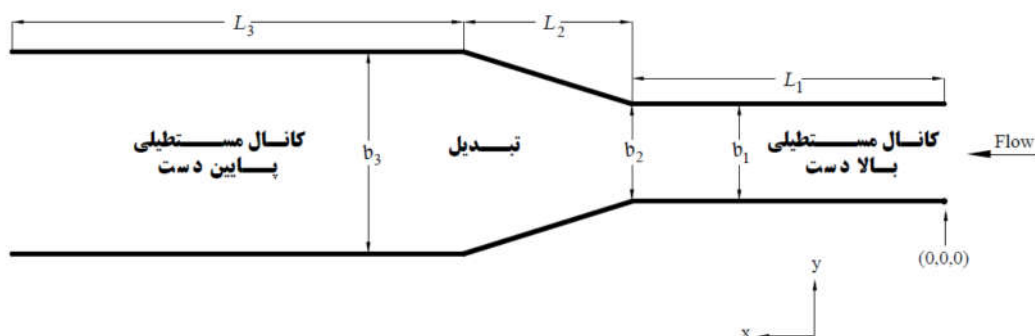
$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i' u_j'} \right) - \rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + \Phi_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \varepsilon \quad [5]$$

که در این رابطه، σ_k عدد یک، δ_{ij} دلتای کرونکر، μ_t ویسکوزیته آشفتگی، Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش و ε نرخ لزجت آشفتگی می‌باشند. جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است.

مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه، جهت صحت‌سنجی مدل عددی از مطالعه آزمایشگاهی باساک و علاءالدین (۲۰۱۰) استفاده شده است. شکل ۱، پلان تبدیل عریض‌شونده مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به ثابت بودن دبی جریان و با فرض دائمی بودن جریان و استفاده از معادله پیوستگی با افزایش عمق جریان بالادست، سطح مقطع جریان افزایش یافته و سرعت متوسط کاهش می‌یابد.

²Quick¹Second order upwind



شکل ۱- پلان تبدیل تدریجی عریض‌شونده مدل آزمایشگاهی.

$$k = \frac{3}{2} (T_u U_0)^2 \quad [۶]$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad [۷]$$

که در این روابط، U_0 متوسط سرعت ورودی، T_u شدت آشفتگی که بین ۱٪ الی ۵٪ می‌باشد، C_μ ثابت و برابر 0.09 و $0.07L$ برابر قطر هیدرولیکی می‌باشند (ورستینگ و مالاسکرا ۲۰۰۷). برای محاسبه درصد خطای حاصله از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، از روش خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به صورت زیر استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{X_{obs} - X_{model}}{X_{obs}} \right)^2} \quad [۸]$$

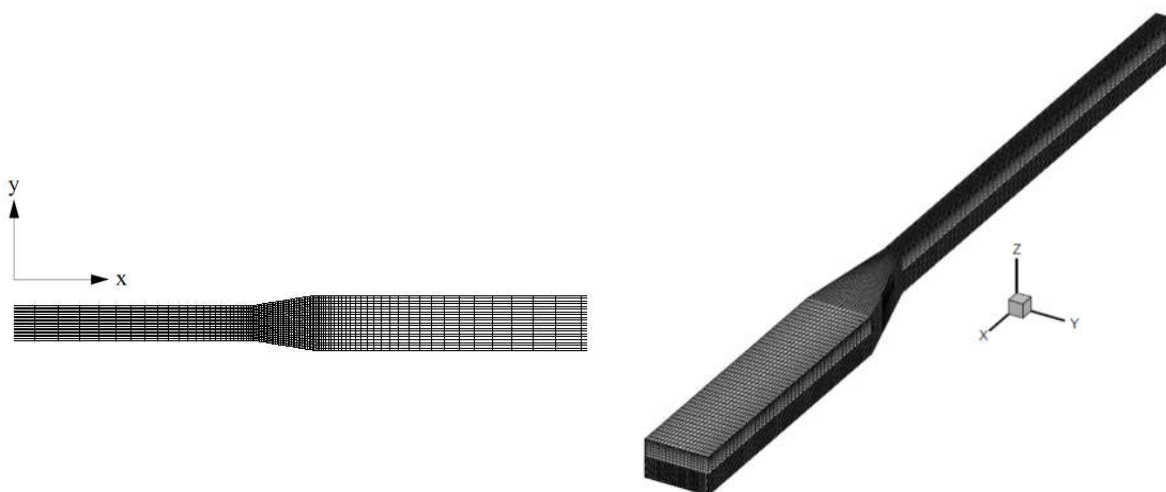
در این رابطه، X_{obs} داده‌های مشاهده شده، X_{model} داده‌های مدل‌سازی شده و N تعداد داده‌ها می‌باشند. همچنین یکی از پارامترهای مهم در سرعت اجرای مدل، شبکه‌بندی مناسب منطقه‌ای می‌باشد که جریان در آن برقرار است. شکل ۲، نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی میدان محاسباتی را نشان می‌دهد. تعداد سلول‌های شبکه میدان محاسباتی به ترتیب در جهت‌های مختلف x ، y و z در کانال بالادست ۶۰، ۲۰ و ۲۸، در تبدیل ۳۵، ۲۰ و ۲۸ و در کانال پایین‌دست ۴۵، ۲۰ و ۲۸ عدد می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی.

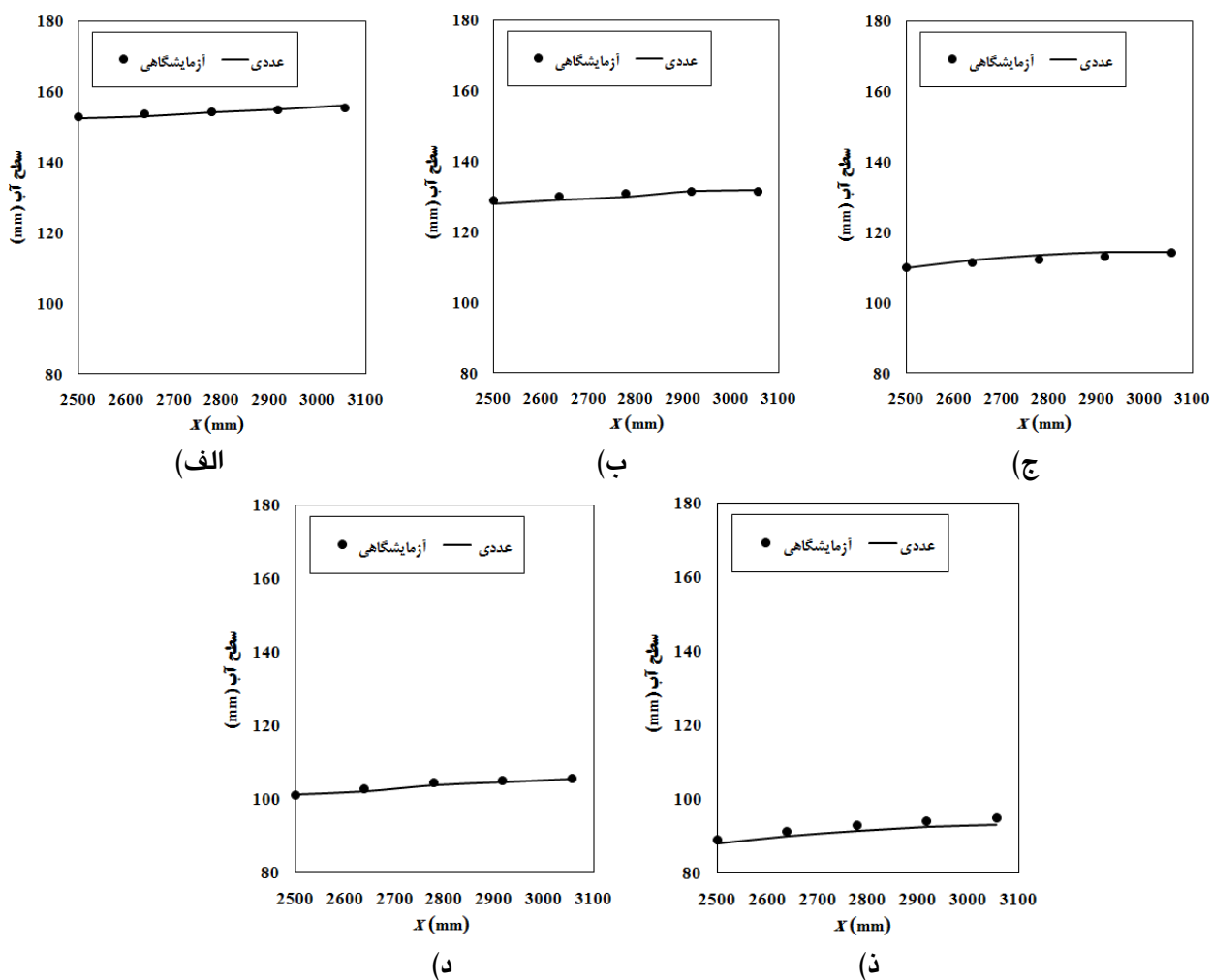
پارامترهای هندسی	ابعاد (mm)
عرض کانال بالادست (b_1)	۹۵/۲۵
عرض کانال پایین‌دست (b_3)	۲۵۴
طول کانال بالادست (L_1)	۲۵۰۰
طول تبدیل (L_2)	۵۵۵/۶۰
طول کانال بالادست (L_3)	۱۵۰۰
نسبت عرض ($r=b_3/b_1$)	۲/۶۷

شبکه‌بندی و شرایط مرزی میدان محاسباتی

در این مطالعه، در ورودی کانال بالادست تبدیل از شرط مرزی سرعت معین و مرزهای خروجی میدان (کانال پایین‌دست تبدیل)، از شرط مرزی جریان خروجی مطابق مطالعه آزمایشگاهی استفاده شده است. 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. انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ لزجت آشفتگی (ε) در مرز ورودی توسط معادلات زیر تخمین زده شده‌اند:



شکل ۲- نمای سه بعدی شبکه بندی میدان محاسباتی.



شکل ۳- مقایسه پروفیل‌های سطح آب شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی به ازای الف) عدد فرود ۰/۲۵ (ب) عدد فرود ۰/۳۲ (ج) عدد فرود ۰/۴۰ (د) عدد فرود ۰/۴۷ (ذ) عدد فرود ۰/۵۵.

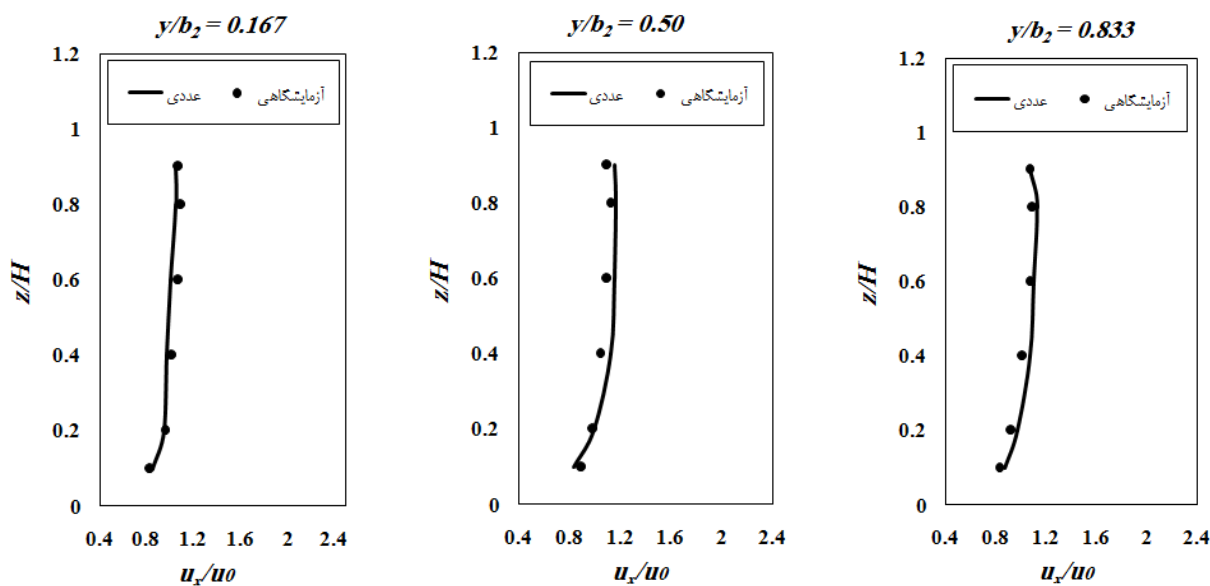
صحت‌سنجی مدل عددی و نتایج

در شکل ۳، پروفیل‌های سطح آب شبیه‌سازی شده در امتداد تبدیل به‌ازای اعداد فرود مختلف ورودی و دبی ورودی ۰/۰۰۴۵ مترمکعب بر ثانیه با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

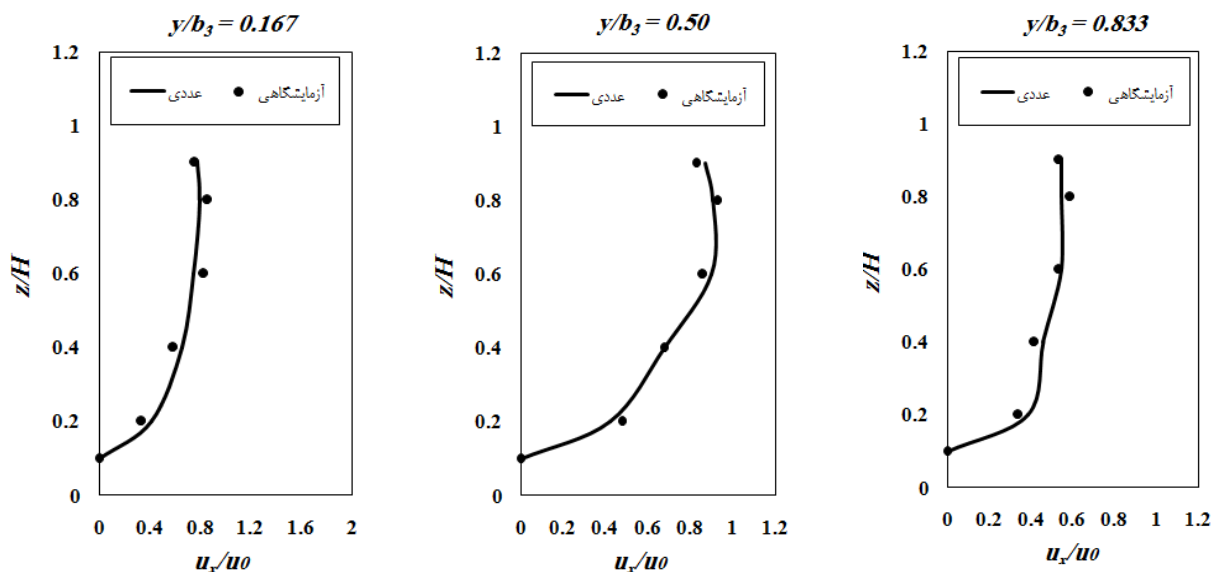
همان‌طورکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، عمق جریان در امتداد طول تبدیل افزایش می‌یابد و بیشینه شیب سطح آب در عدد فرود ورودی ۰/۵۵ اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده این مطلب است که افزایش شیب سطح آب مرتبط با عدد فرود بالادست بوده و با افزایش آن، شیب سطح آب افزایش می‌یابد. همچنین مطابقت خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که با استفاده از رابطه ۸ درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج به‌ازای اعداد فرود ۰/۲۵، ۰/۳۲، ۰/۴۰، ۰/۴۷ و ۰/۵۵ به‌ترتیب برابر ۰/۳۶٪، ۰/۵۹٪، ۰/۶۷٪، ۰/۴۷٪ و ۱/۵۵٪

به‌دست آمدند. در شکل‌های ۴ و ۵، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده (u_x/u_0) در اعماق مختلف بی‌بعد شده جریان (z/H)، برای مقاطع مختلف تبدیل به‌ازای عدد فرود ورودی ۰/۴۰ نشان داده شده است. u_0 سرعت متوسط جریان ورودی کانال بالادست است که مقدار آن برابر ۰/۴۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد. u_x سرعت طولی جریان و z/H نسبت عمق جریان اندازه‌گیری شده به کل عمق جریان می‌باشند.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، مشابه نتایج آزمایشگاهی با نزدیک شدن به خروجی تبدیل، سرعت طولی کاهش پیدا می‌کند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی بین سرعت‌های طولی جریان شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده است. جدول ۲، میانگین درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی را در مقاطع مختلف تبدیل نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های سرعت جریان شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی به‌ازای عدد فرود ورودی ۰/۴۰ در مقطع ورودی تبدیل.

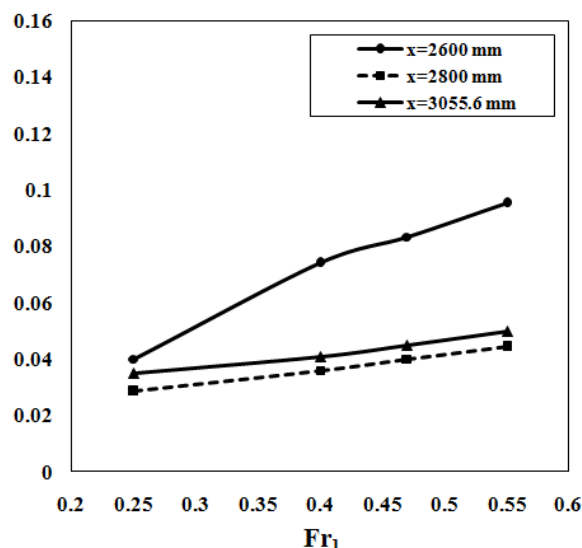


شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های سرعت جریان شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی به‌ازای عدد فرود ورودی ۰/۴۰ در مقطع خروجی تبدیل.

جدول ۲- میانگین درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی.

مقطع	ورودی تبدیل			خروجی تبدیل		
	$y/b_2=0.167$	$y/b_2=0.500$	$y/b_2=0.833$	$y/b_2=0.167$	$y/b_2=0.500$	$y/b_2=0.833$
درصد خطا	۴/۱۲	۵/۳۲	۴/۳۳	۹/۹۶	۶/۰۸	۸/۲۴

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 به‌وجود می‌آید (سیدیان و شفاعی بجستان ۱۳۹۰). به‌دلیل اینکه عدد فرود بر روی توزیع سرعت عرضی در طول تبدیل تأثیر می‌گذارد، باعث تغییر قدرت جریان حلزونی می‌گردد. برای تعیین قدرت جریان ثانویه، از رابطه ۹ که تفاوت مؤلفه عرضی سرعت در سطح (U_s) و کف (U_b) در امتداد تبدیل را نشان می‌دهد، استفاده شده است (سیدیان و شفاعی بجستان ۱۳۹۰). که در این رابطه، δ (Delta) قدرت جریان ثانویه، U_s مؤلفه سرعت عرضی در سطح و U_b مؤلفه سرعت عرضی در کف می‌باشند. شکل ۶ تأثیر عدد فرود جریان ورودی را بر روی قدرت جریان ثانویه نشان می‌دهد. به دلیل اینکه در صورت کسر عدد فرود،



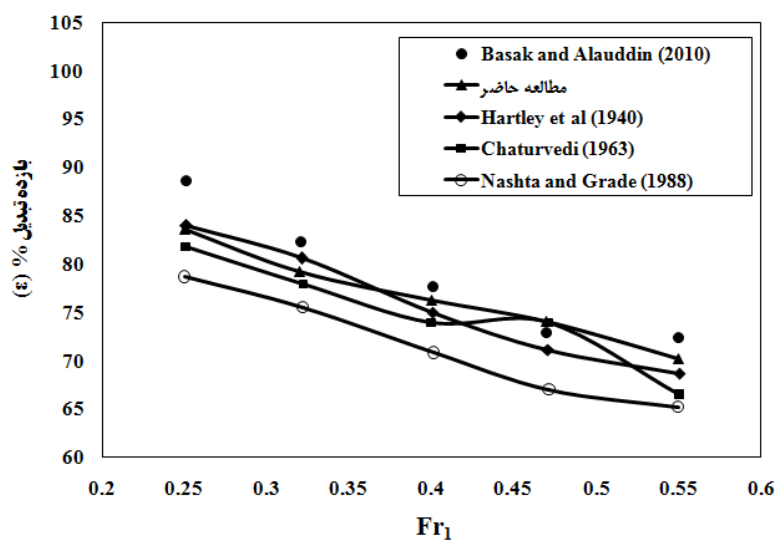
شکل ۶- تأثیر عدد فرود جریان ورودی بر قدرت جریان ثانویه شکل‌گرفته در امتداد تبدیل.

هیدرولیکی تبدیل (ε) از رابطه ۱۰ استفاده شده است (باساک و علاءالدین ۲۰۱۰). که در این رابطه، V_1 و V_2 به ترتیب متوسط سرعت در ورودی و خروجی تبدیل، y_1 و y_2 به ترتیب اعماق جریان در ورودی و خروجی تبدیل و α_1 و α_2 ضرائب ثابت انرژی می‌باشند.

$$\varepsilon = \frac{Q\rho g(y_2 - y_1)}{\left(\frac{1}{2}\rho QV_1^2\right)\alpha_1 - \left(\frac{1}{2}\rho QV_2^2\right)\alpha_2} \quad [10]$$

$$= \frac{(y_2 - y_1)}{\left(\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g}\right)}$$

پارامتر U_0 قرار دارد، برای مقایسه با قدرت جریان ثانویه از پارامتر بی‌بعد Δ/U_0 استفاده شده است. با توجه به شکل ۶، با افزایش عدد فرود جریان ورودی، قدرت جریان ثانویه (Δ) افزایش می‌یابد. همچنین از ورودی تبدیل به سمت وسط تبدیل، قدرت جریان ثانویه کاهش یافته و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل این مقدار افزایش می‌یابد. جهت بررسی بازدهی تبدیل، شکل ۷ بازده هیدرولیکی کلی تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف ورودی و دبی ورودی $0/0045$ مترمکعب بر ثانیه را نشان داده و نتایج مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی باساک و علاءالدین (۲۰۱۰) و نتایج سایر محققان (هارتلی و همکاران ۱۹۴۰، چاتورودی ۱۹۶۳ و ناشتا و گراد ۱۹۸۸) مورد مقایسه قرار گرفته است. برای تعیین بازده

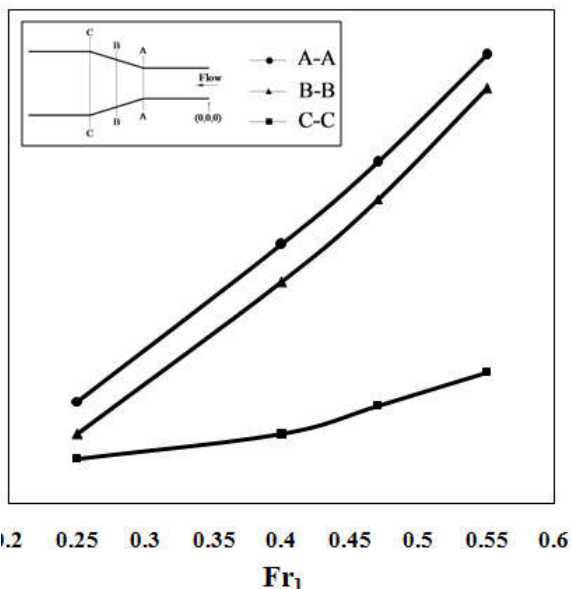


شکل ۷- بازده کانال تبدیل به ازای اعداد فرود مختلف ورودی.

۸۰ تا ۸۵ درصد می‌باشد. درصد خطای حاصل از مقایسه نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی باساک و علاءالدین (۲۰۱۰) برابر $3/68\%$ به دست آمد. در شکل ۸، تغییرات قدرت آشفتگی ($\frac{K_{max} - K_{min}}{\bar{K}}$) به ازای اعداد فرود مختلف نمایش داده شده است. \bar{K} و K_{min} به ترتیب متوسط و کمینه انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در مطالعات محققان دیگر نیز عدد فرود ورودی جریان تأثیر قابل توجهی بر بازده هیدرولیکی تبدیل داشته به طوری که در تمامی آنها با افزایش عدد فرود بالادست، بازده و بازدهی تبدیل کاهش می‌یابد. علت این مطلب این است که افزایش عدد فرود ورودی باعث افزایش شیب سطح آب شده و بازده تبدیل را کاهش می‌دهد. در شکل ۷ بالاترین بازده مربوط به عدد فرود $0/25$ با بازده بین

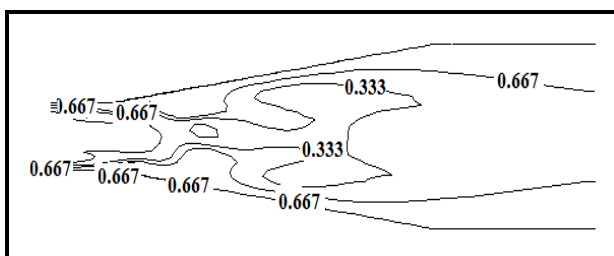
افزایش عدد فرود بالادست، تنش برشی بستر افزایش می‌یابد.



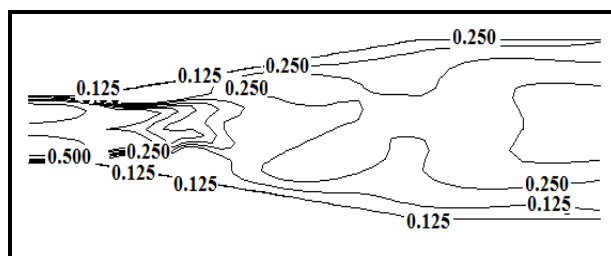
شکل ۸- تأثیر عدد فرود جریان ورودی بر قدرت آشفتگی ایجاد شده در مقاطع مختلف تبدیل.

با افزایش عدد فرود ورودی، قدرت آشفتگی افزایش می‌یابد. همچنین از مقطع (A-A) به سمت مقطع (C-C) انرژی جنبشی آشفتگی برای تمامی اعداد فرود کاهش یافته و قدرت آشفتگی حدود ۳۰/۷۱٪ دچار کاهش می‌شود (شکل ۸). کانتورهای تنش برشی بستر بی‌بعد شده (τ/τ_{max}) در مقاطع مختلف تبدیل به‌ازای اعداد فرود مختلف ورودی در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. τ_{max} بیشینه تنش برشی بستر در هر مقطع می‌باشد.

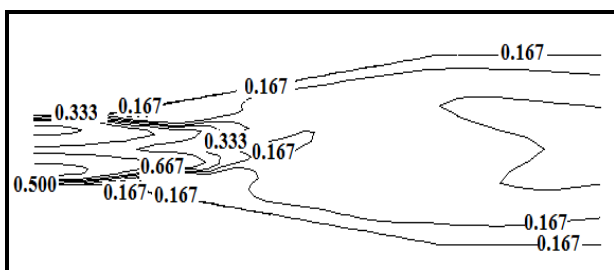
همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تنش برشی بستر از مقطع ورودی تبدیل به سمت میانه تبدیل کاهش یافته و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل افزایش می‌یابد. به‌علت ایجاد نواحی چرخشی جریان در گوشه‌های دو طرف تبدیل، تنش برشی بستر در جهت طولی جریان کاهش می‌یابد. بیشینه تنش برشی بستر در مقطع ورودی و میانه تبدیل رخ داده و همچنین با



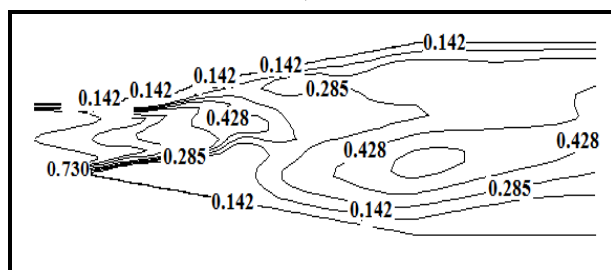
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- کانتورهای تنش برشی بستر بی‌بعد شده در مقاطع مختلف تبدیل به‌ازای الف) عدد فرود ۰/۲۵، ب) عدد فرود ۰/۴۰، ج) عدد فرود ۰/۴۷ و د) عدد فرود ۰/۵۵.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، الگوی جریان در امتداد تبدیل تدریجی عریض‌شونده کانال‌های مستطیلی به مستطیلی تحت جریان زیربحرانی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع نتایج حاصل 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.

- مشابه نتایج آزمایشگاهی با نزدیک شدن به خروجی تبدیل، سرعت طولی کاهش پیدا کرد. همچنین مطابقت خوبی بین سرعت‌های طولی جریان شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمد.

- با افزایش عدد فرود جریان ورودی، قدرت جریان ثانویه (Δ) 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.

منابع مورد استفاده

- صادقی ح، دانشفراز ر و بهمنش ج، ۱۳۹۲. بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در تبدیل‌های همگرا. صفحه‌های ۱ تا ۸، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۸ آبان ماه، دانشگاه تهران.
- سیدیان س م و شفاعی بجستانم، ۱۳۹۰. تعیین ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی در محل آبگیرهای جانبی. نشریه آب و فاضلاب، شماره ۴، صفحه‌های ۸۳ تا ۹۴.

Abbott DE and Kline SJ, 1962. Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward facing steps. *Journal of Basic Engineering* 84(3): 317-325.

Alauddin M and Basak BC, 2006. Development of an expansion transition in open channel sub-critical flow. *Journal of Civil Engineering* 34(2): 91-101.

Basak, BC and Alauddin M, 2010. Efficiency of an expansive transition in an open channel subcritical flow. *DUET Journal., Dhaka University of Engineering & Technology*: 27-32.

Chaturvedi RS, 1963. Expansive subcritical flow in open channel transitions. *Journal Institute of Engineers India*, 43(9): 447-487.

Haque A, 2008. Some characteristics of open channel transition flow. M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Concordia University.

- عدد فرود ورودی جریان تأثیر قابل توجهی بر بازده هیدرولیکی تبدیل داشت به طوری که در تمامی آنها با افزایش عدد فرود بالادست، بازده و بازدهی تبدیل کاهش یافت. علت این مطلب این است که افزایش عدد فرود ورودی باعث افزایش شیب سطح آب شده و بازده تبدیل را کاهش می‌دهد.

- با افزایش عدد فرود ورودی، قدرت آشفتگی افزایش یافته است. همچنین از مقطع ورودی تبدیل به سمت مقطع خروجی تبدیل، انرژی جنبشی آشفتگی برای تمامی اعداد فرود کاهش یافت و قدرت آشفتگی حدود $30/71\%$ دچار کاهش شد.

- تنش برشی بستر از مقطع ورودی تبدیل به سمت میانه تبدیل کاهش یافت و با نزدیک شدن به انتهای تبدیل افزایش پیدا کرد. به علت ایجاد نواحی چرخشی جریان در گوشه‌های دو طرف تبدیل، تنش برشی بستر در جهت طولی جریان کاهش یافته است. بیشینه تنش برشی بستر در مقطع ورودی و میانه تبدیل رخ داد و همچنین با افزایش عدد فرود بالادست، تنش برشی بستر افزایش یافت.

- Hartley GE, Jain JP and Bhattacharya AP, 1940. Report on the model experiments of fluming of bridges on Purwa branch. Technical Memorandum. 9, United Provinces Irrigation Res Inst, Lucknow (now at Roorkee), India: 94-110.
- Henderson FM, 1966. Open Channel Flow. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.
- Najafi Nejad Nasser A, 2011. An experimental investigation of flow energy losses in open-channel expansions. M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Concordia University.
- Najmeddin S, 2012. CFD modeling of turbulent flow in open-channel expansions, M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Concordia University.
- Nashta CF and Grade RJ, 1988. Subcritical flow in rigid-bed open channel expansions. Journal of Hydraulic Research 26(1): 49-65.
- Olsen NRB, 2008. Numerical modelling and hydraulics. Department of Hydraulic and Environmental Engineering the Norwegian University of Science and Technology, ISBN: 82-7598-074-7.
- Ramamurthy AS, Basak S, and Rao PR, 1970. Open channel expansions fitted with local hump. Journal of Hydraulics Division ASCE 96(5): 1105-1113.
- Versteeg HK, and Malalasekera W, 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. ISBN: 978-0-13-127498-3, London.