

Numerical Simulation of Energy Dissipation in Crescent-Shaped Contraction of the Flow Path

RASOUL DANESHFARAZ^{1*}, EHSAN AMINVASH¹, HAMIDREZA ABBASZADEH¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

(Received: Feb. 13, 2021- Revised: Apr. 3, 2021- Accepted: Apr. 17, 2021)

ABSTRACT

One of the methods of controlling and reducing flow energy is to use energy dissipating structures through formation of hydraulic jumps. One of these types of structures is the constriction elements in the flow path, which leads to a decrease in the energy of the passing flow. In the present study, the effect of crescent-shaped contraction as an energy dissipating structure in the supercritical flow path has been investigated using FLOW-3D software. Examining the simulation results, the RNG model among the four turbulence models, RNG, $k-\epsilon$, $k-\omega$ and LES was selected due to its higher accuracy and lower relative error and absolute error percentage. In this study, the amplitude of the Froude number after the gate as the most effective dimensionless parameter in energy dissipation varied from 2.8 to 7.5 and the values of stenosis on both sides are 5 and 7.5 cm. The results show that in all cases of using the crescent-shaped contractions, the energy dissipation in 5 and 7.5 cm contractions are respectively 24.62% and 29.84% more than the ones in the classic free jump, based on the energy drop relative to the upstream, and 46.14% and 48.42% more, based on the energy drop relative to the downstream. Also, by reviewing the previous researchs, it was found that the crescent-shaped contractions have a better performance in terms of energy loss compared to the sudden contraction. Based on the simulation results, with increasing the upstream Froude number, the energy dissipation is increased relative to the upstream and downstream of crescent-shaped contraction, so that the use of contraction elements reduces the downstream Froude number of the contracted section in the range of 1.6 to 3/2.

Keywords: Froude Number, Hydraulic Jump, Turbulence Model, RNG Models.

شبیه‌سازی عددی استهلاک انرژی در مواجهه با انقباض هلالی شکل مسیر جریان

رسول دانشفراز*^۱، احسان امین‌وش^۱، حمیدرضا عباس‌زاده^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸)

چکیده

از روش‌های کنترل و کاهش انرژی جریان، استفاده از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی و تشکیل پرش هیدرولیکی است. یکی از انواع این سازه‌ها، المان‌های تنگ‌شدگی در مسیر جریان است که منجر به افت انرژی جریان عبوری می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی عددی تأثیر تنگ‌شدگی هلالی شکل به‌عنوان سازه مستهلک‌کننده انرژی در مسیر جریان فوق‌بحرانی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است. با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مدل آشفتگی RNG به‌علت برخورداری از دقت بیشتر و پائین‌بودن درصد خطای نسبی و خطای مطلق نسبت به سایر مدل‌ها، از میان ۴ مدل آشفتگی $k-\omega$ ، $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و LES انتخاب شد. در این مطالعه، دامنه عدد فرود بعد از دریچه به‌عنوان موثرترین پارامتر بدون بعد در استهلاک انرژی از ۲/۸ تا ۷/۵ تغییر کرده و مقادیر تنگ‌شدگی از طرفین ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که در تمامی حالات استفاده از تنگ‌شدگی هلالی شکل، استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی به‌ترتیب در تنگ‌شدگی ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر براساس افت انرژی نسبت به بالادست ۲۴/۶۲٪ و ۲۹/۸۴٪ و نسبت به پائین‌دست ۴۶/۱۴٪ و ۴۸/۴۲٪ بیشتر از پرش کلاسیک آزاد است. همچنین با بررسی نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که تنگ‌شدگی هلالی شکل در مقایسه با انقباض ناگهانی، حاصل از مطالعات محققین پیشین، عملکرد بهتری از نظر میزان افت انرژی دارد. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با افزایش عدد فرود بالادست، افت انرژی نسبت به بالادست و پائین‌دست تنگ‌شدگی هلالی شکل افزایش یافته به‌طوری‌که استفاده از المان‌های تنگ‌شدگی باعث کاهش عدد فرود در پائین‌دست مقطع تنگ‌شدگی در بازه ۱/۶ الی ۲/۳ شده است.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، تنگ‌شدگی هلالی، عدد فرود، پرش هیدرولیکی، مدل آشفتگی

مقدمه

از مهم‌ترین مشکلاتی که در پائین‌دست اکثر سازه‌های هیدرولیکی وجود دارد انرژی جنبشی زیاد جریان می‌باشد که بایستی این انرژی مخرب توسط سازه‌های کنترل‌کننده مستهلک گردد. در صورت عدم کنترل، ممکن است سازه‌های پائین‌دست تخریب شده و خسارات قابل توجهی به بار آید. سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی به‌منظور کنترل، کاهش سرعت و استهلاک انرژی جریان در پائین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نصب می‌گردد. میزان استهلاک انرژی با آشفتگی و تلاطم جریان رابطه مستقیم دارد به‌همین دلیل مقدار قابل توجهی از استهلاک انرژی با کوچک کردن یک منطقه از کانال قابل دسترسی است. ایجاد انقباض در مسیر جریان با ایجاد پرش هیدرولیکی در هنگام برخورد جریان با المان‌های تنگ‌شدگی بخشی از انرژی جنبشی مخرب را مستهلک نموده و مقداری از این انرژی به کمک موانع گرفته می‌شود. استهلاک انرژی توسط انواع سازه‌ها و روش‌های مختلفی هم‌چون تغییر مشخصات هندسی بستر شامل ایجاد زبری، تغییر

شکل مقطع، استفاده از حوضچه‌های آرامش، به‌کارگیری صفحات مشبک در مسیر جریان، استفاده از تبدیل‌های واگرا و هم‌گرا و اثر آن بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی مورد توجه محققان قرار گرفته است (Hasannia et al. 2021; Daneshfaraz et al. 2019; Daneshfaraz et al. 2020a). کاهش عرض کانال یا انقباض ناگهانی سطح مقطع در مسیر جریان ممکن است در اثر احداث سازه‌هایی نظیر پایه پل ایجاد شود که انسداد جریان عبوری را نیز به‌همراه خواهد داشت (Daneshfaraz et al. 2018). Yarnell (1934) مطالعات آزمایشگاهی وسیعی در زمینه‌ی انقباض پایه‌های پل و تحلیل تئوری برای محدود کردن ضریب انقباض انجام داده است. بررسی‌های انجام یافته توسط ایشان نشان داد که میزان عمق پس‌زدگی جریان قبل از پایه‌های پل به‌شکل دماغه و طول پایه‌های پل بستگی دارد. همچنین Chow (1959) و Henderson (1966) مطالعاتی را در زمینه انسداد جریان انجام دادند. Chow (1959) انواع انسداد در مسیر جریان را شامل پایه‌های پل، اسکله‌ها و تکیه‌گاه سرریزها عنوان

می‌گردد. اما در کانال با شیب معکوس تغییر محسوس در افت نسبی پرش نسبت به حالت کف افقی مشاهده نمی‌گردد. بنابراین نقش واگرایی در افزایش افت نسبی انرژی پرش بیشتر از شیب معکوس است. (Katorani and Kashefipoor (2014) با مطالعه‌ای تحت عنوان اثر مشخصات هندسی مانع و شیب کف شیب‌شکن بر روی شرایط هیدرولیکی جریان در شیب‌شکن‌های مانع‌دار، به این نتیجه رسیدند که با افزایش هم‌زمان عرض و فاصله، میزان افت انرژی افزایش می‌یابد. (Sadeghfam *et al.* (2015) به بررسی رفتار صفحات مشبک در مواجهه با جریان فوق‌بحرانی شبیه‌سازی شده در دامنه عدد فرود $2/5$ تا $8/5$ پرداخته و افت انرژی بیشتر در صفحات مشبک، نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد حتی در شرایط پرش مستغرق را گزارش کردند. Lotfi and Jafarzadeh (2017) به مطالعه‌ی تأثیر هم‌گرایی و زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال‌های تنگ‌شونده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که هم‌گرا کردن کانال موجب افزایش عمق مزدوج نسبی و طول پرش می‌شود. درحالی‌که زبر کردن کانال منجر به کاهش عمق مزدوج نسبی و طول پرش می‌گردد. Shabani and Jafarzadeh (2020) پارامترهای مهم پرش هیدرولیکی از قبیل طول پرش و استهلاك انرژی ناشی از آن در کانال‌های هم‌گرای شیب‌دار را بررسی و گزارش کردند که اتلاف انرژی با افزایش شیب بستر و هم‌گرایی افزایش می‌یابد. هم‌چنین طول پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود اولیه افزایش یافته و با یک عدد فرود ثابت، پرش هیدرولیکی در شیب‌های بالاتر طول بیشتری دارد. (Daneshfaraz *et al.* (2020b) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر بستر زبر با المان‌های دوزنقه‌ای غیرممتد در مشخصات پرش گسسته در کانال مستطیلی غیرمنشوری پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کانال‌های منشوری باعث استهلاك انرژی بیشتر جریان، کاهش عمق ثانویه و افزایش طول پرش هیدرولیکی می‌شوند.

طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون مطالعه‌ای در زمینه رفتار جریان فوق‌بحرانی با استفاده از گسسته‌سازی معادلات به-روش حجم محدود (VOF) در مواجهه با تنگ‌شدگی‌های هلالی-شکل از نظر استهلاك انرژی جریان صورت نپذیرفته است. اما در مورد پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی بررسی‌های مختلف عددی صورت پذیرفته است که اهم آن‌ها به شرح زیر است:

(Babaali *et al.* (2015) به ارزیابی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره‌های هم‌گرا با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. بررسی‌های صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد که استهلاك انرژی در حوضچه با دیواره هم‌گرا بسیار بیشتر از حوضچه با فرم موازی آن است. هم‌چنین آن‌ها بهترین

کرد. نتایج Henderson (1966) نشان داد که قرار دادن پایه‌ها در یک زاویه با جریان، در صورتی که زاویه کمتر از 10° درجه باشد، تأثیر ناچیزی در میزان پس‌زدگی جریان دارد. Hager and Dupraz (1985) مشخصات جریان در انقباض ناپیوسته را به-صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همبستگی مناسب بین نتایج تحقیقاتشان با روابط نظری را گزارش کردند. (Wu and Molinas (2001) به بررسی جریان زیربحرانی در مواجهه با انقباض کوتاه در طول جریان پرداختند. رابطه ارائه شده توسط آن‌ها برای محاسبه دبی جریان با نتایج تحقیقات پیشین هم‌پوشانی مناسبی را نشان داده است. (Dey and Raikar (2005) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در انقباض طولانی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش عرض انقباض یافته عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. (Jan and Chang (2009) نیز پرش هیدرولیکی بر روی یک تندآب انقباض یافته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که مقدار نسبی طول پرش هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی به زاویه بستر بستگی داشته و مستقل از زاویه انقباض دیواره‌های کناری است. هم‌چنین آن‌ها با در نظر گرفتن مقطع انقباض یافته و شیب کف، روابط تئوری برای عمق ثانویه پرش ارائه کردند. (Das *et al.* (2014) مطالعاتی را در رابطه با افت انرژی در تندآب‌های انقباض-یافته انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افت انرژی با افزایش شیب تندآب افزایش می‌یابد.

در زمینه پرش هیدرولیکی مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً زیادی در ایران انجام شده که می‌توان به بررسی پرش هیدرولیکی با پله مثبت و منفی روی کف‌های با شیب معکوس اشاره کرد (Abrishami and Esmaili, 1997; Esmaili and Abrishami, 2001). (Izadjoo and Shafaei Bajestan (2005) به بررسی و ارزیابی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دوزنقه‌ای شکل پرداختند. بررسی‌های صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز جهت انجام پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج، کوچک‌تر از عمق پایاب مربوط به پرش هیدرولیکی مشابه بر روی بسترهای صاف می‌باشد. (Gohari and Farhoudi (2009) پرش هیدرولیکی را بر روی بستری با زبری-های نواری مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها کاهش عمق ثانویه پرش بر روی این نوع زبری‌ها نسبت به بستر صاف را گزارش کردند. (Shojaeian *et al.* (2011) خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقطع واگرایی کانال با شیب معکوس را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که واگرایی و شیب معکوس کانال، نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را کاهش می‌دهد. هم‌چنین واگرایی باعث افزایش افت نسبی انرژی پرش نیز

۲/۸ تا ۷/۵ بعد از دریچه، استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی هلالی-شکل بررسی و با کار سایر محققان مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

الف) انواع پرش هیدرولیکی در مواجهه جریان فوق بحرانی با تنگ‌شدگی

با قرار دادن تنگ‌شدگی در مسیر جریان، سه نوع رفتار پرش هیدرولیکی قابل مشاهده است: اگر مطابق شکل (۱-الف)، پرش هیدرولیکی قبل از تنگ‌شدگی حادث شود و تنگ‌شدگی در ناحیه زیربحرانی قرار گیرد، رفتار نوع اول اتفاق می‌افتد. اگر فاصله بین نقطه شروع پرش هیدرولیکی و تنگ‌شدگی به اندازه‌ای نباشد که پرش هیدرولیکی آزاد اتفاق بیافتد رفتار نوع دوم طبق شکل (۱-ب)، قابل مشاهده خواهد بود. این نوع رفتار، پرش هیدرولیکی تحمیلی است و تنگ‌شدگی در ناحیه فوق‌بحرانی قرار می‌گیرد. به دلیل آشفتگی‌های ایجاد شده استهلاک انرژی در رفتار نوع دوم بیشتر از رفتار نوع اول است (Daneshfaraz et al. 2018). همچنین مطابق شکل (۱-ج)، در اثر برخورد جریان فوق‌بحرانی با تنگ‌شدگی، رفتار نوع سوم که پرش هیدرولیکی مستغرق نامیده می‌شود اتفاق می‌افتد.

ب) محاسبه استهلاک انرژی

با استفاده از اصل انرژی برای رفتار نوع اول و دوم میزان استهلاک انرژی بین مقاطع A و B مطابق رابطه (۱)، محاسبه می‌گردد.

$$\Delta E_{AB} = E_A - E_B = \left(y_A + \frac{V_A^2}{2g}\right) - \left(y_B + \frac{V_B^2}{2g}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

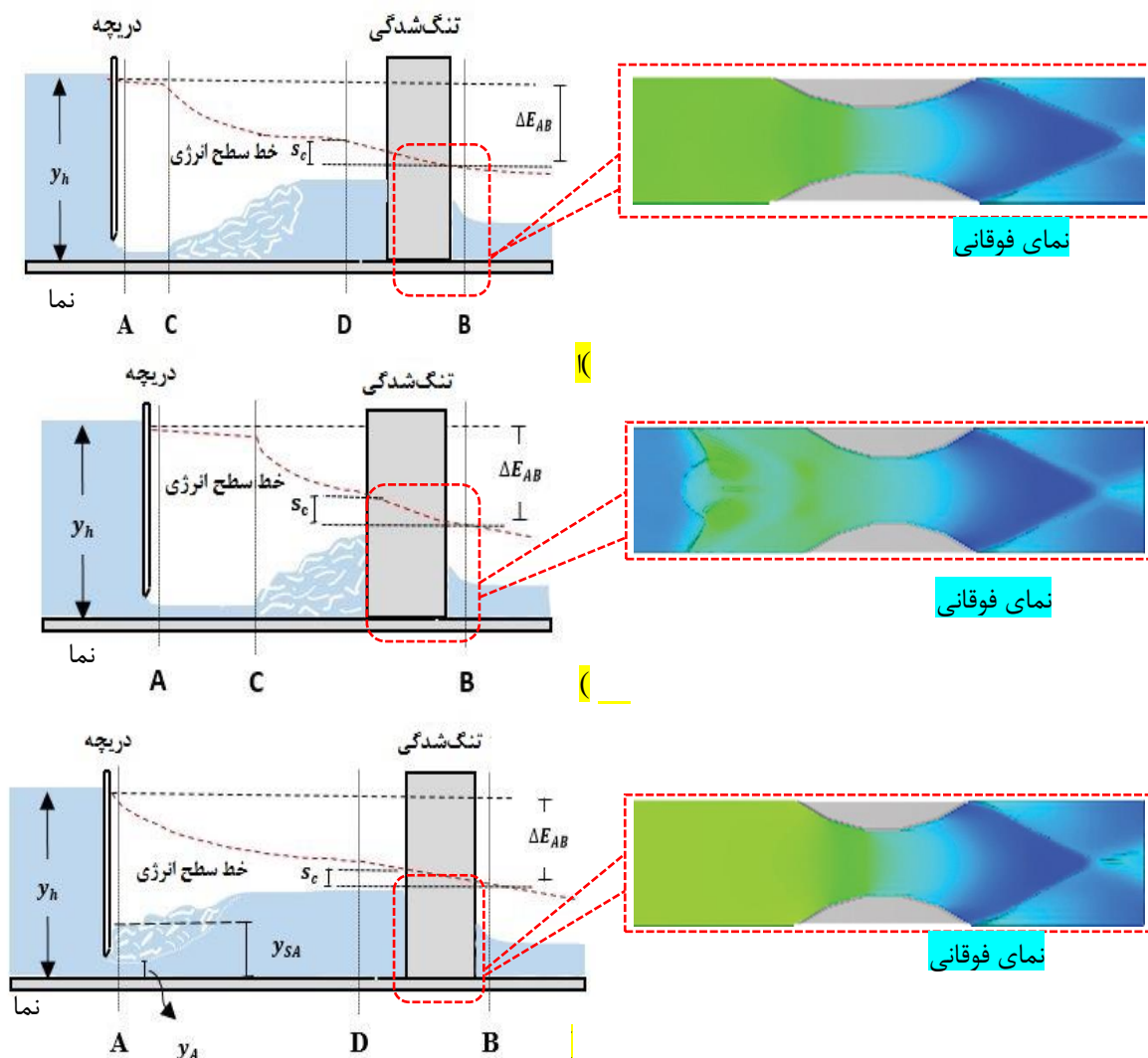
در رابطه بالا، y_A و y_B به ترتیب عمق جریان در مقطع A و B برحسب متر، V_A و V_B به ترتیب سرعت جریان در مقطع A و B برحسب متر بر ثانیه و g شتاب گرانش زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. محاسبه سرعت در دو مقطع A و B با محاسبه سرعت متوسط در آزمایش‌ها به دست می‌آید. عمق جریان در مقطع A با استفاده از رابطه (۲) و در مقطع B با اندازه‌گیری محاسبه می‌گردد (Daneshfaraz et al. 2017).

$$y_A = C_c \times d \quad (\text{رابطه ۲})$$

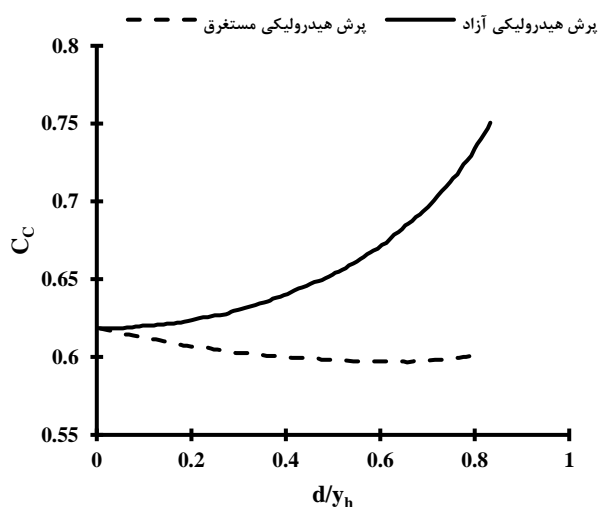
که در آن: d میزان بازشدگی دریچه برحسب متر و C_c ضریب انقباض جریان است که مطابق نمودار ارائه شده در شکل (۲)، از نتایج تحلیلی Belud et al. (2009) برحسب نسبت میزان بازشدگی به عمق آب پشت دریچه برای جریان‌های آزاد و مستغرق محاسبه می‌شود. در این نمودار خطوط ممتد و بریده به ترتیب جریان آزاد و مستغرق را نشان می‌دهد.

درجه هم‌گرایی برای اتلاف انرژی را ۵ درجه اعلام کردند. Nazari (2017) Aliabadi et al. به بررسی تأثیر زبری نواری مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. بررسی‌های صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد که ایجاد زبری نواری مستطیلی، باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زیر به اندازه ۲۴/۶۳ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۷/۶۴ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۱۴/۴۶ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است. (Nayebzadeh et al. 2019). Nayebzadeh et al. (2019) پرش کلاسیک شیب‌شکن‌های با واگرایی تدریجی در پائین‌دست و مجهز به صفحات مشبک را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از صفحات مشبک و واگرایی دیواره‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. هم‌چنین به کارگیری دیواره واگرایی، صفحات مشبک و تأثیر استفاده هم‌زمان از هر دو روش به ترتیب باعث افزایش ۲۵، ۴۴ و ۴۸ درصدی راندمان استهلاک انرژی می‌گردد. (Ghaderi et al. 2019) و (Ghaderi et al. 2020) به بررسی تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم و استهلاک انرژی در سرریز کنگره‌ای با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج نشان داد که وجود تنگ‌شدگی قائم ورودی، باعث افزایش سرعت در لبه شیب-شکن می‌شود و به همین دلیل با افزایش تلاطم جریان در اثر سقوط جت‌های تقسیم شده جریان و ایجاد ناحیه بیشتری از اختلاط آب و هوا، باعث کاهش انرژی جنبشی پائین‌دست می‌گردد.

از موارد موجود از تنگ‌شدگی‌های هلالی‌شکل در طبیعت می‌توان به وجود پایه‌های پل در داخل رودخانه و یا کانال اشاره کرد که باعث ایجاد مقاطع تنگ‌شدگی در مسیر جریان شده و در مواقع بروز سیلاب در رودخانه و یا در مواجهه با جریان فوق-بحرانی، استهلاک انرژی در مقطع تنگ‌شدگی می‌تواند مد نظر طراحان باشد. طبق بررسی‌های به عمل آمده تاکنون مطالعه‌ای در خصوص استفاده از تنگ‌شدگی هلالی‌شکل به منظور استهلاک انرژی جریان در دامنه وسیعی از عدد فرود صورت نپذیرفته است و گزارش نتایج استفاده از این نوع سازه‌ها در میان منابع علمی خالی است لذا با توجه به اهمیت موضوع، در پژوهش حاضر لزوم بررسی تأثیر مقاطع تنگ‌شدگی هلالی‌شکل در مسیر جریان فوق-بحرانی از نظر استهلاک انرژی احساس شده و مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، در بازه عدد فرود



شکل ۱- شکل شماتیک جریان در مواجهه با تنگ‌شدگی الف) رفتار نوع اول ب) رفتار نوع دوم ج) رفتار نوع سوم



شکل ۲- ضریب انقباض دریچه برای جریان‌های آزاد و مستغرق بر اساس نتایج تحلیلی (Belud et al., 2009)

مستغرق، استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی و جریان‌های متلاطم قبل از تنگ‌شدگی است، طبق رابطه (۴)، محاسبه می

برای رفتار نوع سوم میزان استهلاک انرژی جریان بین مقاطع A و B که شامل استهلاک انرژی جریان ناشی از پرش

با تقسیم کردن پارامترهای $\frac{W}{y_A}$ و $\frac{B}{y_A}$ برهم آنالیز ابعادی تحقیق حاضر به صورت رابطه (۷)، ارائه می‌گردد:

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = f_3(Fr_A, \frac{B}{W}, \frac{y_B}{y_A}) \quad (\text{رابطه ۷})$$

د) معادلات حاکم بر جریان

نرم‌افزار FLOW-3D یک برنامه جامع بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی است، که در آن معادلات ناویر استوکس و معادله پیوستگی برای انجام شبیه‌سازی گسسته‌سازی می‌شوند. این نرم افزار از روش‌های عددی پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی سه‌بعدی حرکت سیال استفاده می‌کند (Flow Science Inc, 2016).

رابطه (۸) معادله‌ی پیوستگی در حالت سه‌بعدی برای یک سیال را نشان می‌دهد که در آن مقدار جرم ورودی به حجم کنترل برابر مقدار جرم خروجی از حجم کنترل خواهد بود (Daneshfaraz et al. 2020c).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در روابط بالا، u و v مولفه‌های سرعت می‌باشند. معادلات ناویر استوکس معادلات مومنتم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزوج می‌باشد این معادله در حالت کلی به صورت رابطه (۹)، بیان می‌شود (Flow Science Inc, 2016).

(رابطه ۹)

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]$$

در رابطه فوق، u_i مولفه بردار سرعت در راستای فضایی i ، نیروی حجمی در راستای i و μ لزوجت دینامیکی سیال می‌باشد.

ه) مشخصات حل عددی، شبکه حل و شرایط مرزی

در تحقیق حاضر میزان استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی‌های هلالی شکل در مواجهه با جریان فوق‌بحرانی در شرایط پرش آزاد و مستغرق در بازه‌ی عدد فرود $2/8$ تا $7/5$ با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت، بدین منظور صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Daneshfaraz et al. 2018) انجام پذیرفت و سپس مدل‌ها برای شرایط هیدرولیکی متفاوت اجرا گردید. شکل (۳)، نمایانگر پلان و هندسه سه‌بعدی مدل و جدول (۱)، نشانگر مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل در تحقیق حاضر می‌باشد.

گردد. وجه تمایز این رفتار با رفتار نوع اول و دوم چگونگی محاسبه سرعت و عمق در مقطع A می‌باشد. به طوری که تلاطم ایجاد شده در سطح جریان، اندازه‌گیری عمق جریان و عمق جریان عبوری از زیر دریچه در مقطع A را مشکل می‌کند. میزان عمق استغراق دریچه با استفاده از عمق آب پشت دریچه همانند رابطه (۳) - به دست می‌آید (Daneshfaraz et al. 2018)

$$y_{SA} = y_h - \frac{V_A^2}{2g} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه فوق، مقدار V_A ، بر اساس y_A که از طریق رابطه (۲)، به دست آمده، قابل محاسبه بوده و استهلاک انرژی برای رفتار نوع سه از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\Delta E_{AB} = (y_{SA} + \frac{V_A^2}{2g}) - (y_B + \frac{V_B^2}{2g}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

ج) تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی جریان عبارتند از:

$$f_1(Q, W, B, l, d, X, E_A, E_B, y_A, y_B, g, \rho, \mu) = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن Q دبی ($L^3 T^{-1}$)، W عرض کانال (L)، B مقدار تنگ‌شدگی (L)، l طول تنگ‌شدگی (L)، d میزان بازشدگی دریچه (L)، X فاصله بین تنگ‌شدگی و دریچه (L)، E_A انرژی مخصوص آب در مقطع A (L)، E_B انرژی مخصوص آب در مقطع B (L)، y_A عمق جریان در مقطع A (L)، y_B عمق جریان در مقطع B (L)، g شتاب گرانش زمین ($L T^{-2}$)، ρ جرم مخصوص آب ($M L^{-3}$) و μ لزوجت دینامیکی ($M L^{-1} T^{-1}$) می‌باشند. کمیت اصلی پارامترهای موثر داخل پراکنش آورده شده است. سه پارامتر مستقل ρ ، g و y_A که دارای تمامی مشخصات کمیت‌های اصلی هستند به عنوان پارامترهای تکراری انتخاب گردیدند. با استفاده از روش پی-باکینگهام پارامترهای بدون بعد را می‌توان طبق رابطه (۶) بازنویسی کرد.

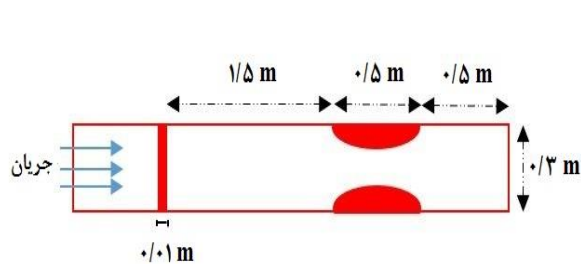
(رابطه ۶)

$$f_2 \left(\frac{Q}{g^{0.5} y_A^{2.5}}, \frac{W}{y_A}, \frac{B}{y_A}, \frac{l}{y_A}, \frac{d}{y_A}, \frac{X}{y_A}, \frac{E_A}{y_A}, \frac{E_B}{y_A}, \frac{y_B}{y_A}, \text{Re} \right) = 0$$

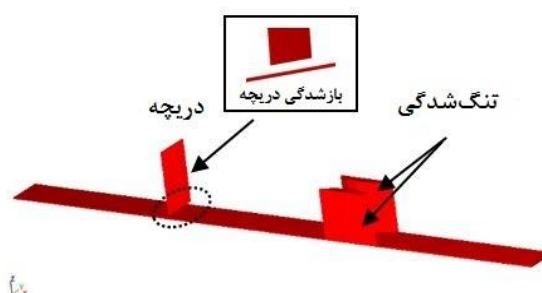
برخی از پارامترهای رابطه فوق مقادیر معینی دارند هم چون، طول تنگ‌شدگی، میزان بازشدگی دریچه و فاصله بین تنگ‌شدگی و دریچه بنابراین از بررسی تأثیر این پارامترها می‌توان صرف نظر کرد. از آنجائی که در مطالعه حاضر جریان متلاطم و $178.07 \leq \text{Re} \leq 46238$ است لذا می‌توان از تأثیر عدد رینولدز نیز چشم‌پوشی نمود. هم‌چنین به منظور معنی‌دار کردن پارامترها

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل در تحقیق حاضر

مجموع میزان تنگ‌شدگی از طرفین (سانتی‌متر)	میزان بازشدگی دریچه (سانتی‌متر)	ابعاد هندسه مدل (سانتی‌متر)	عدد رینولدز (-)	عدد فرود (-)	عمق آب پشت دریچه (سانتی‌متر)
۱۵ و ۱۰	۲/۶	۳۰×۳۰×۳۲	۴۶۲۳۸-۱۷۸۰۷	۲/۷-۸/۵	۹/۲۸-۷/۳



(ب)



(الف)

شکل ۳- شکل شماتیک الف) هندسه سه‌بعدی مدل در نرم‌افزار FLOW-3D ب) پلان کانال

$$AE = \left| \left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} \right)_{exp} - \left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} \right)_{num} \right| \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$RE = \frac{AE}{\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} \right)} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AE)_i^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در روابط بالا، ΔE_{AB} استهلاك انرژی مابین مقاطع A و B بر حسب متر، E_A انرژی جریان در مقطع A بر حسب متر؛ n تعداد داده‌ها و روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب نشان‌دهنده خطای مطلق، خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات می‌باشند. مقادیر روابط بالا هرچه به عدد صفر نزدیک باشند دقت بالای مدل در شبیه‌سازی را نشان خواهد داد.

برای انتخاب شبکه بهینه ابتدا شبیه‌سازی با ابعاد شبکه بزرگ انجام پذیرفت و سپس در مراحل بعدی شبیه‌سازی‌ها با ابعاد شبکه کوچکتر از مرحله قبل اجرا شد تا نتایج قابل قبولی حاصل شود. در این تحقیق، شبکه بهینه با انجام شبیه‌سازی در حالت ۴، با ابعاد شبکه متفاوت و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انتخاب گردید. برای این کار مطابق جدول (۲)، میزان نسبت استهلاك انرژی بین دو مقطع A و B به انرژی جریان در مقطع A برای عمق آب ۱۴/۲ سانتی‌متر پشت دریچه، به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و درصد خطای نسبی، خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات برای هر کدام محاسبه گردید. در این مطالعه برای بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی میزان نسبت استهلاك انرژی بین مقاطع A و B به انرژی جریان در مقطع A و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، از شاخص‌های آماری زیر استفاده گردید:

جدول ۲- نتایج آزمایشگاهی و عددی میزان استهلاك انرژی نسبی مقطع A با ابعاد شبکه متفاوت

حالت	ابعاد شبکه (سانتی‌متر)	تعداد کل شبکه	افت انرژی نسبت به بالادست (آزمایشگاهی)	افت انرژی نسبت به بالادست (عددی)	خطای نسبی (درصد)	خطای مطلق (-)	خطای جذر میانگین مربعات (-)
۱	۰/۶	۱۳۲۵۰۰۰	۰/۵۱۰	۰/۴۴۸	۱۲/۱۷۶	۰/۰۶۲	۰/۰۷۱۸
۲	۰/۵	۲۳۰۴۰۰۰	۰/۵۱۰	۰/۵۲۱	۲/۱۱۲	۰/۰۱۱	۰/۰۳۷۶
۳	۰/۴۱	۴۱۶۸۰۰۸	۰/۵۱۰	۰/۵۱۳	۰/۵۳۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۰۸
۴	۰/۳۸	۵۲۳۵۸۰۴	۰/۵۱۰	۰/۵۱۲	۰/۳۷۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰۶

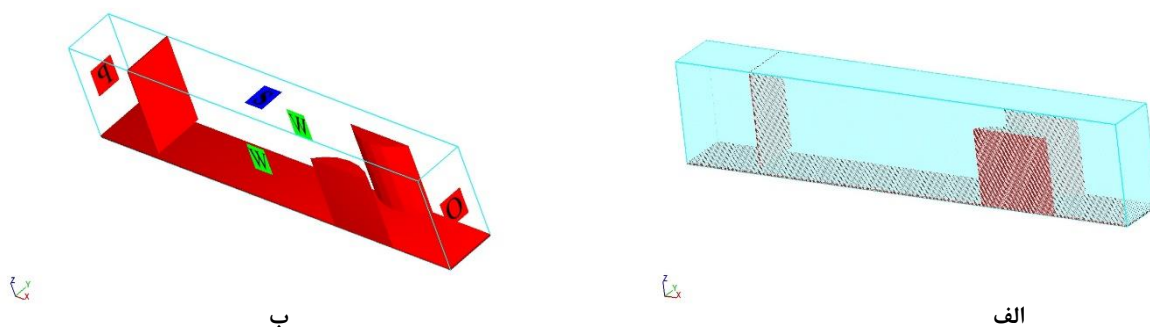
مابین حالت سوم و چهارم، تعداد ۱۰۶۷۷۹۶ شبکه می‌باشد در حالی که خطاهای به دست آمده به یکدیگر بسیار نزدیک هستند. در این تحقیق، برای اینکه مدت زمان شبیه‌سازی طولانی نشود و اجرای شبیه‌سازی در زمان کم به حالت ماندگار و پایدار برسد، محدوده سیال پشت دریچه، به عنوان شرط اولیه به شبیه‌سازی تعریف گردید. هم‌چنین توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی تعریف شده است. در تعریف شرایط مرزی، برای ورودی جریان از شرط مرزی فشار و برای مرز پائین دست به منظور عدم تأثیر شرایط بیرون شبکه حل به داخل شبکه از شرط مرزی

با مقایسه خطاهای به دست آمده در حالت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که درصد خطای نسبی، خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات در حالت ۴ نسبت به حالت‌های دیگر کمتر است. از آنجائی که مقدار خطای به دست آمده در حالت ۳ و ۴ به یکدیگر بسیار نزدیک است از این رو حالت سوم به عنوان شبکه بهینه با تعداد شبکه ۴۱۶۸۰۰۸ و به ترتیب با درصد خطای نسبی، خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات ۰/۵۳۴ درصد، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱۰۸ برای ادامه شبیه‌سازی جریان روی مدل‌های دیگر انتخاب گردید. لازم به ذکر است که اختلاف تعداد شبکه

خروجی استفاده شده است. هم‌چنین برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار و در مرز بالایی، شرط مرزی متقارن تعریف شده است. جدول (۳) و شکل (۴)، به ترتیب شرایط مرزی و شبکه‌بندی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۳- شرایط مرزی در تحقیق حاضر

نرم افزار	شرط مرزی ورودی	شرط مرزی خروجی	شرط مرزی بالایی	شرط مرزی کف و دیواره ها
FLOW-3D	فشار (P)	خروجی (O)	متقارن (S)	دیواره (W)



شکل ۴- شکل شماتیک الف) شبکه‌بندی حل ب) شرایط مرزی

(Ebrahimiyan et al. 2020). از طرف دیگر مطابق جدول (۴) مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که درصد خطای نسبی، خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات به‌دست آمده از مدل آشفتگی RNG نسبت به دیگر مدل‌ها مقدار کمتری دارد و به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است. این درحالی است که سایر مدل‌های آشفتگی نیز نتایج نزدیکی به مدل آزمایشگاهی داشته‌اند.

م) انتخاب مدل آشفتگی

در تحقیق حاضر برای انتخاب نوع مدل آشفتگی، بر روی چهار مدل LES شبیه‌سازی انجام و مدل RNG برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. از دلایل انتخاب این مدل می‌توان به مواردی هم‌چون اطمینان‌پذیری در پاسخ‌گویی به مسائل گوناگون، حل دقیق معادلات، دقت بالا در نشان دادن جزئیات جریان و بررسی مطالعات پیشین اشاره نمود (Daneshfaraz et al. 2020c).

جدول ۴- درصد خطای نسبی، خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات به‌دست آمده از نتایج عددی برای چهار مدل آشفتگی RNG، k-ε، k-ω و LES

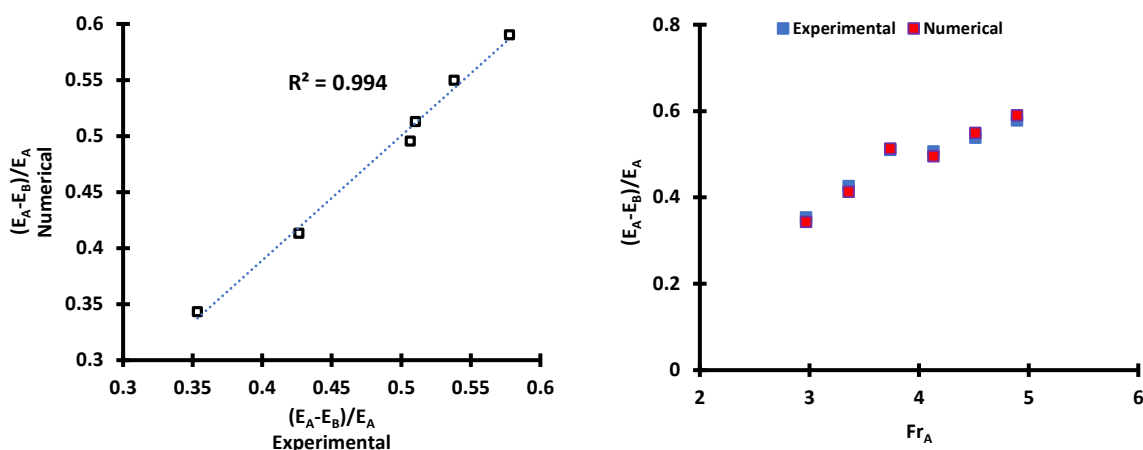
مدل آشفتگی	افت انرژی نسبت به بالادست (آزمایشگاهی)	افت انرژی نسبت به بالادست (عددی)	خطای نسبی (درصد)	خطای مطلق (-)	خطای جذر میانگین مربعات (-)
RNG	۰/۵۱۰	۰/۵۱۳	۰/۵۳۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۰۸
k-ε	۰/۵۱۰	۰/۵۱۶	۱/۲۲۹	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴۸
k-ω	۰/۵۱۰	۰/۵۱۸	۱/۵۷۴	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳۵
LES	۰/۵۱۰	۰/۵۲۱	۲/۲۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۲۵۵

A و B به انرژی جریان در مقطع A حاصل از نتایج حل عددی همانند نتایج آزمایشگاهی می‌باشد و ضریب همبستگی بین نتایج عددی با آزمایشگاهی ۰/۹۹۴ است. هم‌چنین مقادیر میانگین درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات حاصل از نتایج حل عددی برای ۶ داده به ترتیب ۲/۱۷ درصد، ۰/۱۰ و ۰/۰۱۰۸ می‌باشد. بنابراین با دقت در شکل‌ها و نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که میان نتایج عددی با آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد.

نتایج و بحث

در این مطالعه برای صحت‌سنجی از نتایج آزمایشگاهی (Daneshfaraz et al. 2018)، که در کانال مستطیلی به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر با میزان بازشدگی ۵۰ درصد در انقباض ناگهانی، انجام یافته استفاده شد.

برای صحت‌سنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی (Daneshfaraz et al. 2018) برای استهلاک انرژی نسبی، مطابق شکل (۵)، رسم گردید. با دقت در شکل مشاهده شد که روند تغییرات میزان نسبت استهلاک انرژی بین دو مقطع



شکل ۵- برازش و مقایسه میزان نسبت استهلاک انرژی بین مقاطع A و B به انرژی جریان در مقطع A، حاصل از نتایج حل عددی و آزمایشگاهی

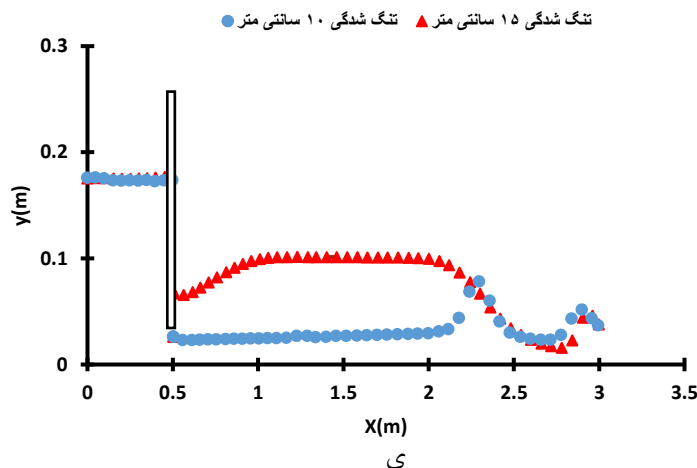
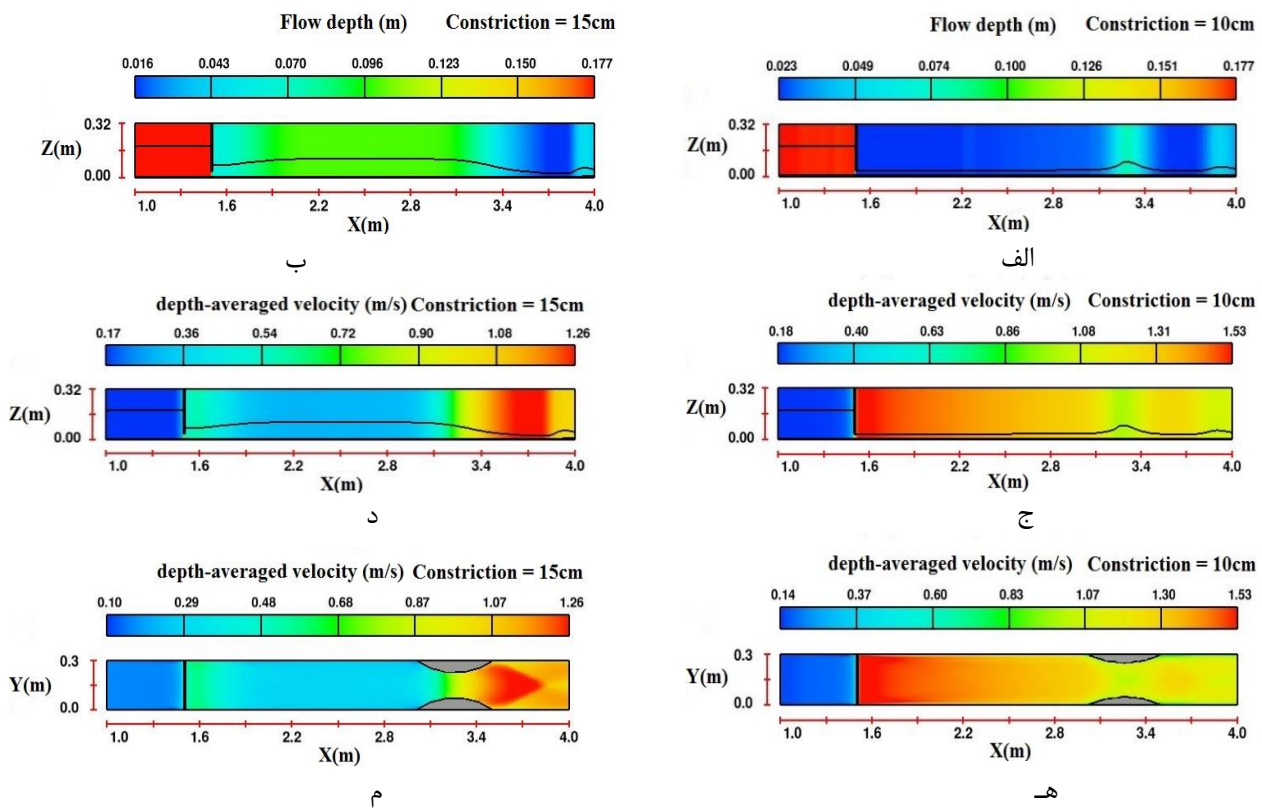
گرفته است. شکل (۷)، میزان تغییرات این پارامترها را نشان می‌دهد که در آن محور افقی، پارامتر بدون بعد عدد فرود در مقطع A و محور قائم، بیانگر نسبت میزان استهلاک انرژی بین مقاطع A و B به انرژی جریان در مقاطع A و B می‌باشد. در شکل (۷)، پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک با خطوط ممتد نشان داده شده است که در تمامی حالات افت انرژی این نوع پرش کمتر از پرش هیدرولیکی ناشی از تنگ‌شدگی هلالی شکل است. به عبارت دیگر میزان افت انرژی ناشی از تنگ‌شدگی هلالی شکل، بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک است که در توجیه این مسئله می‌توان به وجود جریان‌های متلاطم در ناحیه قبل از تنگ‌شدگی اشاره کرد هم‌چنین در پرش هیدرولیکی آزاد افت انرژی تنها ناشی از پرش هیدرولیکی است در حالی که با توجه به خط سطح انرژی در پرش تنگ‌شدگی هلالی شکل علاوه بر افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی، افت موضعی و افت ناشی از المان‌های تنگ‌شدگی نیز وجود دارد.

در شبیه‌سازی انجام شده، عمق جریان پشت دریچه برای تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در هر دو مدل یکسان وارد شده است. بنابراین میزان دبی ورودی به فلوم در تنگ‌شدگی‌های مذکور متفاوت از یکدیگر خواهند شد به طوری که میزان دبی ورودی برای تامین آب مورد انتظار پشت دریچه در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر بیشتر از تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر خواهد شد. جهت مثال برای عمق آب ۹/۷ سانتی‌متر پشت دریچه، میزان دبی قرائت شده از نرم‌افزار برای تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۵/۳۴ و ۶/۳۴ لیتر بر ثانیه است که علت این مسئله را می‌توان به میزان بازشدگی بیشتر مقطع انقباض یافته در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر اشاره کرد که جریان بیشتری را از خود عبور می‌دهد. با بررسی‌های به عمل آمده از نمودارهای شکل (۷)، مشاهده شد که با افزایش عدد فرود در هر یک از مدل‌ها میزان

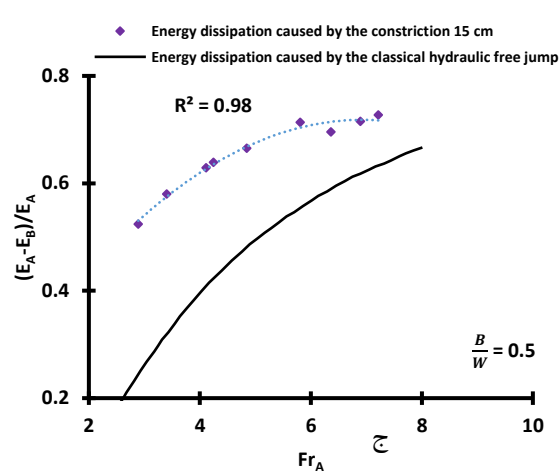
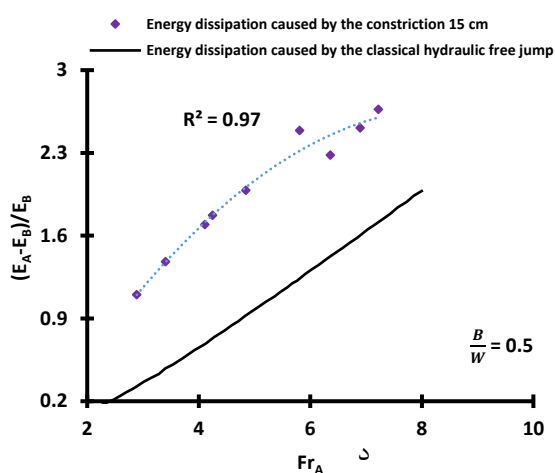
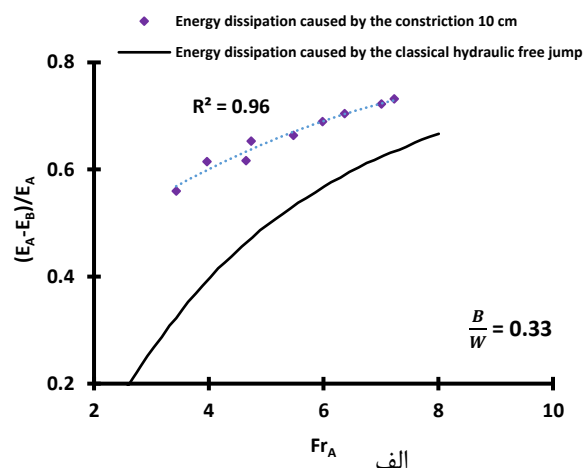
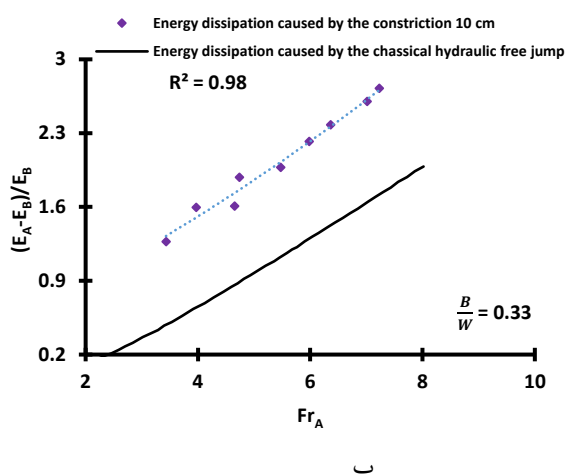
برای شبیه‌سازی عددی پدیده‌های هیدرولیکی، نحوه به-کارگیری شرایط اولیه و مرزی بسیار پراهمیت است لذا پس از تعریف شرایط مرزی ذکر شده، روند ایجاد پرش هیدرولیکی و به تبع آن استهلاک انرژی شبیه‌سازی گردید. شکل (۶-الف) و (۶-ب)، پروفیل سطح جریان عبوری از زیر دریچه یا به عبارتی تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق برای تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در عمق ۱۷/۷ سانتی‌متری پشت دریچه را نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۶-ج) و (۶-د)، پروفیل طولی سرعت متوسط جریان در مقطع X-Z و شکل (۶-ه) و (۶-م)، نمایانگر پروفیل طولی سرعت متوسط جریان در مقطع X-Y برای تنگ‌شدگی مذکور در همان عمق می‌باشد، در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر به علت تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق و به سبب آن افزایش عمق جریان بعد از دریچه، سرعت جریان کاهش یافته است. هم‌چنین با کاهش عمق جریان بعد از تنگ‌شدگی سرعت عبوری افزایش یافته است. طبق شکل (۷-ی)، نمودار پروفیل طولی سطح جریان با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در نرم‌افزار اکسل رسم گردید در این نمودار نقاط آبی و قرمز به ترتیب سطح تراز آب در تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۶)، با مقایسه پروفیل طولی پرش هیدرولیکی در تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر با عمق آب یکسان در پشت دریچه برای هر دو حالت مدل، مشاهده می‌شود که عمق، طول پرش، سرعت متوسط جریان و میزان افت انرژی در پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق یکسان نیست و رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند به طوری که در پرش هیدرولیکی مستغرق و آزاد قسمت تنگ‌شدگی به ترتیب در ناحیه زیر بحرانی و فوق بحرانی قرار می‌گیرد. بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط دو پارامتر بدون بعد استهلاک انرژی نسبت به بالادست و پائین دست صورت

حاضر با نتایج مطالعات محققین پیشین صورت پذیرفت. لازم به ذکر است با بررسی‌های به عمل آمده تاکنون مطالعه‌ای در خصوص استفاده از المان‌های هلالی شکل به منظور استهلاک انرژی جریان صورت نپذیرفته است ولی در این خصوص می‌توان به مطالعاتی هم‌چون تحقیق Daneshfaraz *et al.* (2020c) در به کارگیری انقباض ناگهانی در مسیر جریان اشاره نمود. در تحقیق آن‌ها از سه اندازه تنگ‌شدگی ناگهانی به ابعاد ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده و استهلاک انرژی نسبتی آن به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

افت انرژی بیشتر می‌گردد. علت این مسئله را می‌توان به پائین بودن عمق جریان بعد از دریچه و در نتیجه‌ی آن بالا بودن سرعت جریان عبوری اشاره کرد که در آن پرش هیدرولیکی همراه با تلاطم و تداخل بیشتر با هوا شده که این خود باعث افزایش عمق پایاب می‌شود. هم‌چنین پدیده پس‌زدگی جریان نیز تأثیر به‌سزایی در استهلاک انرژی دارد به طوری که پس‌زدگی جریان باعث افزایش عمق در ناحیه تنگ‌شدگی می‌شود بنابراین افت انرژی بیشتر خواهد شد. در تحقیق حاضر از تنگ‌شدگی‌های هلالی شکل به عنوان سازه مستهلک‌کننده انرژی در مسیر جریان فوق بحرانی استفاده شده است. مطابق شکل (۸)، مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق



شکل ۶. پروفیل‌های طولی سطح جریان و سرعت متوسط جریان حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D الف و ب) پروفیل طولی ج و د) پروفیل سرعت مقطع عرضی ه و م) پروفیل سرعت مقطع پلان ی) نمودار پروفیل طولی



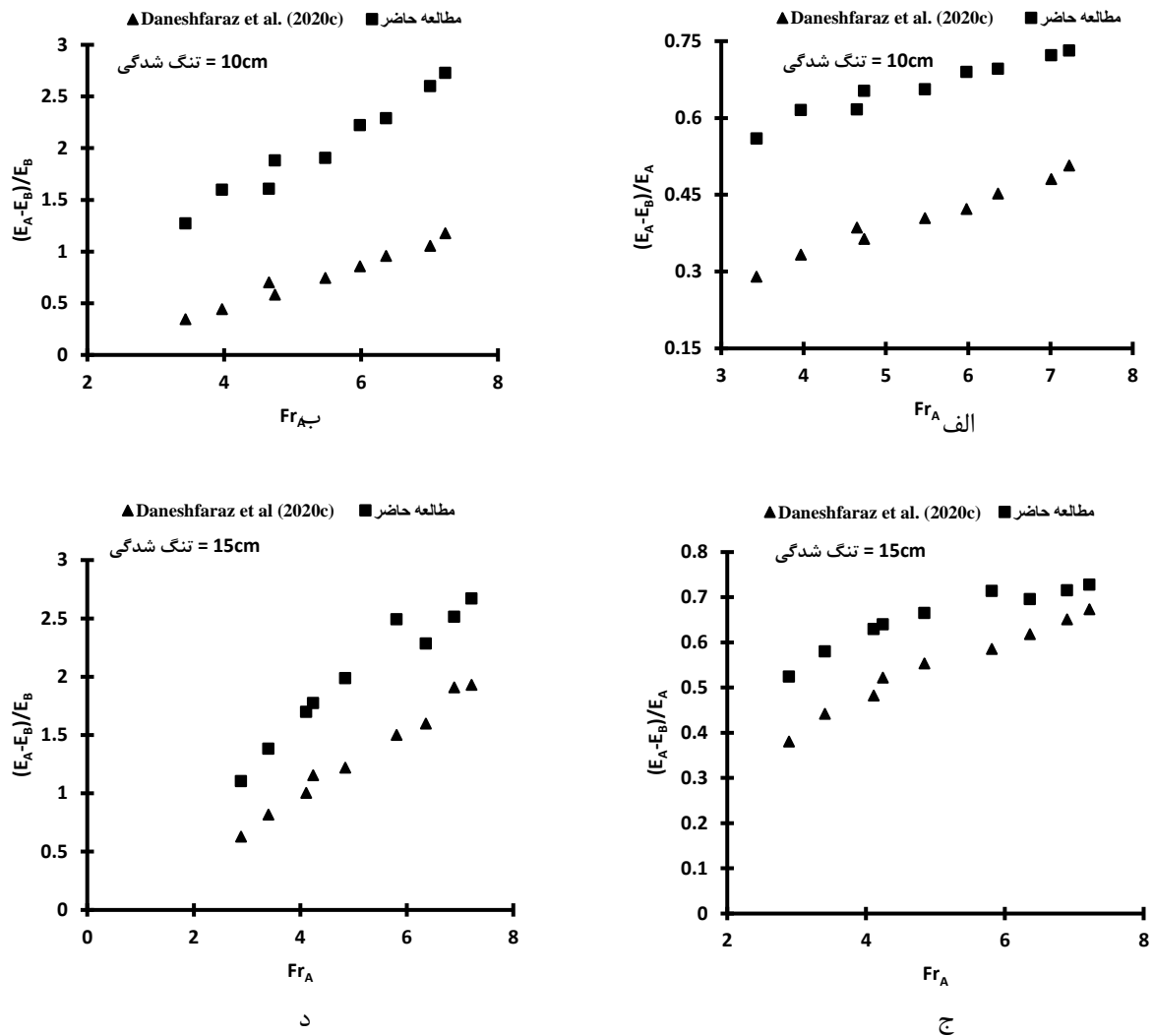
شکل ۷- تغییرات استهلاک انرژی الف) نسبت به بالادست در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر ب) نسبت به پائین‌دست در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر ج) نسبت به بالادست در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر د) نسبت به پائین‌دست در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر، در دامنه اعداد فرود مختلف

الی ۷/۵ به بازه ۱/۶ الی ۲/۳ تغییر می‌کند. عملکرد سازه‌های هیدرولیکی از نظر افت انرژی می‌تواند بر پایداری و مقاومت سازه در بستر رودخانه‌ها و کانال‌ها تأثیرگذار باشد. در مقایسه و طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده به‌منظور کاستن از انرژی جریان، علاوه بر میزان کارایی سازه، بایستی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به-صرفه باشد به‌طوری‌که در ساخت حوضچه‌های آرامش USBR، هر حوضچه آرامش بر حسب عدد فرود خاص خود ساخته می‌شود و از این لحاظ محدودیتی از نظر عدد فرود برای طراحی حوضچه-های آرامش USBR وجود دارد به‌طوری‌که حداقل عدد فرود برای استفاده از حوضچه‌های آرامش USBR II و USBR III، ۴/۵ می-باشد و برای $Fr < 4$ باید ضوابط خاصی در نظر گرفته شود هم-چنین حوضچه آرامش USBR IV برای کنترل پرش هیدرولیکی، زمانی که $Fr < 4/5$ باشد به‌کار می‌رود. علاوه بر این در حوضچه‌های آرامش به‌زمان و هزینه کافی، اجزا و مصالح خاص، نیروی کار ماهر و دقت بالا در طراحی و ساخت نیاز است این

مشابهت تحقیق حاضر با تحقیق Daneshfaraz *et al.* (2020c) در میزان اندازه تنگ‌شدگی بوده و تفاوت آن‌ها در نوع تنگ‌شدگی می‌باشد. لذا برای مقایسه، نتایج تحقیق حاضر حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تحقیقات Daneshfaraz *et al.* (2020c) برای استهلاک انرژی طبق شکل (۸) رسم گردید. در شکل (۸-الف) و (۸-ب)، مشاهده شد که میزان استهلاک انرژی نسبت به بالادست و پائین‌دست در اعداد فرود مختلف در استفاده از تنگ-شدگی ۱۰ سانتی‌متر هلالی‌شکل بیشتر از انقباض ناگهانی ۱۰ سانتی‌متر است. هم‌چنین مطابق شکل (۸-ج) و (۸-د)، استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی هلالی‌شکل ۱۵ سانتی‌متر نیز بیشتر از انقباض ناگهانی ۱۵ سانتی‌متر است بنابراین در تمامی حالات مدل، تنگ‌شدگی هلالی‌شکل منجر به افت انرژی بیشتر در مقایسه با انقباض ناگهانی می‌شود. نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از تنگ‌شدگی هلالی‌شکل تأثیر بسیار زیادی در استهلاک انرژی جریان دارد به‌طوری‌که عدد فرود پائین‌دست کانال به‌مقدار بسیار زیادی کاهش یافته و از بازه ۲/۸

جایگزینی برای این نوع حوضچه آرامش باشد، زیرا علاوه بر این که عرض حوضچه آرامش کاهش می‌یابد، مقدار مصالح مصرفی نیز کاهش یافته و از نظر اقتصادی به صرفه می‌باشد.

در حالی است که طراحی و ساخت المان‌های تنگ‌شدگی هلالی - شکل از هر لحاظ مقرون به صرفه می‌باشد. برای بازه عدد فرود ۲/۸ الی ۷/۵ بایستی از حوضچه آرامش تیپ سه استفاده شود اما نتایج حاصل نشان می‌دهد که تنگ‌شدگی هلالی شکل می‌تواند



شکل ۸- نمودار مقایسه نتایج افت انرژی نسبت به بالادست و پائین دست تحقیق حاضر با مطالعات محققین پیشین

نسبت به بالادست و پائین دست، به صورت تابعی از سه پارامتر بدون بعد موثر Fr_A ، y_B/y_A و B/W تعیین شد. فرم کلی معادله پیشنهادی به صورت رابطه (۱۳) در نظر گرفته شد:

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} \cdot \frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = a(Fr_A)^b \times \left(\frac{B}{W}\right)^c \times \left(\frac{y_B}{y_A}\right)^d \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در رابطه فوق، ضرایب a، b، c و d در نرم افزار اکسل به صورت پیش فرض یک در نظر گرفته شد، سپس در Solver نرم افزار اکسل معادله پیشنهادی تا حدی که خطای آن نسبت به افت انرژی عددی در حد قابل قبول باشد به دفعات حل گردید و بعضاً تغییراتی در فرم معادله پیشنهادی به منظور دست یابی به شکل مناسب آن با کم ترین میزان خطا و ضریب همبستگی بالا

طبق شکل (۷)، با برازش داده‌های حاصل از بررسی عددی، ضریب همبستگی نزدیک به عدد ۱ به دست آمد که نشان دهنده وجود رابطه مستقیم بین عدد فرود و افت انرژی می‌باشد. نحوه تعیین معادله افت انرژی پیش بینی شده به این صورت بود که با تعیین مقادیر متناظر Fr_A ، y_B/y_A و B/W برای تمامی داده‌های مربوط به تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی متر و هم چنین افت انرژی نسبت به بالادست و پائین دست مورد مطالعه و تلفیق داده‌های مذکور، مقادیر افت انرژی پیش بینی شده مطابق روند زیر محاسبه گردید:

ابتدا شکل غیرخطی برای معادله پیشنهادی افت انرژی

درصد می‌باشد. همچنین طبق نمودار شکل (۹-ج)، ضریب همبستگی میان داده‌های حاصل از حل عددی با مقادیر حاصل از رابطه (۱۵)، ۰/۹۶ می‌باشد. حدکثر خطای نسبی مقادیر محاسباتی از مقادیر عددی ۱۱/۰۳ درصد می‌باشد. لازم به‌ذکر است که خطای جذر میانگین مربعات به‌ترتیب نسبت به بالادست و پائین‌دست مابین نتایج حل عددی و رابطه پیشنهادی، ۰/۱۳۵ و ۰/۰۷۸۹ می‌باشد.

نمودار ستونی شکل (۱۰)، افت انرژی، بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روابط (۱۴) و (۱۵) و روابط ارائه شده حاصل از مطالعات محققین پیشین رسم گردید. بدین‌منظور مقایسه‌ای از نظر افزایش یا کاهش دقت معادلات ارائه شده بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج روابط استخراج شده با نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط (Daneshfaraz et al. 2018)، به‌منظور برآورد میزان استهلاک انرژی انجام پذیرفت. لازم به‌ذکر است روابط ارائه شده توسط (Daneshfaraz et al. 2018)، برای انقباض ناگهانی ۷/۵ سانتی‌متر از طرفین صادق بوده و جهت درونیابی و برونیابی پارامترهای افت انرژی با وارد کردن مقادیر Fr_A می‌توانند به‌کار گرفته شوند. این درحالی است که رابطه ارائه شده در این مطالعه، برای تنگ‌شدگی‌های هلالی مختلف با عرض‌های متفاوت کانال در دامنه وسیعی از عدد فرود می‌تواند به‌کار گرفته شود. روابط (۱۷) و (۱۸)، نمایانگر معادلات ارائه شده توسط (Daneshfaraz et al. 2018)، می‌باشد:

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} = -0.007 Fr_A^2 + 0.159 Fr_A - 0.027 \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = 0.065 Fr_A^2 - 0.156 Fr_A + 0.539$$

مطابق شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب)، با جایگذاری اعداد فرود یکسان در روابط مذکور مشاهده می‌گردد که میزان افت انرژی حاصل از روابط ارائه شده توسط (Daneshfaraz et al. 2018)، دارای خطای بیشتر نسبت به روابط تلفیقی (۱۴) و (۱۵) می‌باشد. علت این موضوع را می‌توان به‌نحوه استخراج فرمول به‌صورت برآزش غیرخطی رگرسیونی داده‌ها و همچنین استفاده از Fr_A به‌عنوان تنهاترین پارامتر بی‌بعد موثر در رابطه اشاره نمود.

میان افت انرژی عددی با افت انرژی تخمین‌زده شده صورت پذیرفت و در نهایت معادله‌ی استخراج شده برای تخمین افت انرژی نسبت به بالادست و پائین‌دست مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) ارائه گردید.

(رابطه ۱۴)

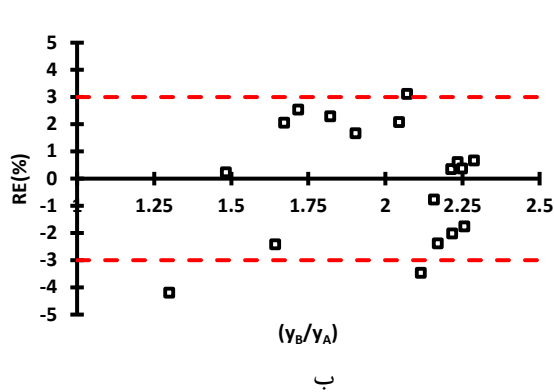
$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} = 0.4102 Fr_A^{0.2815} \times \left(\frac{B}{W}\right)^{0.049} \times \left(\frac{y_B}{y_A}\right)^{0.0835} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = 0.4517 Fr_A^{1.0193} \times \left(\frac{B}{W}\right)^{0.0439} \times \left(\frac{y_B}{y_A}\right)^{-0.2448}$$

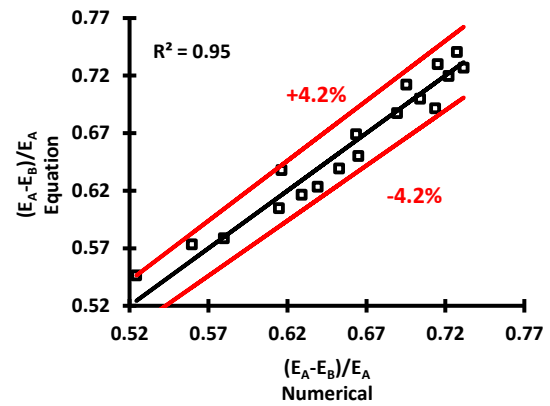
یکی از راه‌های مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی با روابط بالا به‌منظور تعیین دقت آن‌ها بررسی مقدار اختلاف بین افت انرژی نسبت به بالادست و پائین‌دست به‌دست آمده از شبیه‌سازی با افت محاسبه شده از روابط پیش‌بینی شده، می‌باشد. در این مقایسه برای محاسبه خطای نسبی از رابطه (۱۶) استفاده شده است. نمودارهای درصد خطای نسبی در برابر پارامتر بی‌بعد y_B/y_A مطابق شکل (۹-ب) و (۹-د)، نشان داده شده است. طبق شکل (۹-ب)، مشاهده می‌گردد که محدوده وسیعی از داده‌ها در باند خطای نسبی $\pm 3\%$ قرار دارند این موضوع بیانگر این مطلب می‌باشد که رابطه پیشنهادی (۱۴)، دقت بسیار مطلوبی داشته به‌طوری‌که بیش از ۸۳ درصد داده‌ها دارای خطای کمتر از $\pm 3\%$ هستند. همچنین مطالب فوق در رابطه با شکل (۱۰-د) نیز صادق می‌باشد در این نمودار بیش از ۶۶ درصد داده‌ها دارای خطای کمتر از $\pm 5\%$ می‌باشند که حاکی از دقت بالای رابطه پیشنهادی (۱۵) می‌باشد.

$$RE = \left[\frac{\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_{A,B}} \right)_{num} - \left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_{A,B}} \right)_{equ}}{\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_{A,B}} \right)_{num}} \right] \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

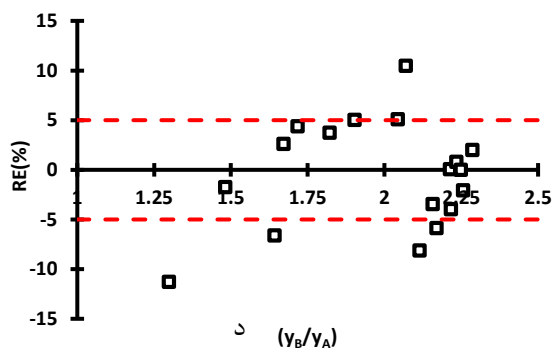
مطابق شکل (۹)، مشاهده شد که تطابق خوبی مابین نتایج حل عددی با نتایج به‌دست آمده از روابط وجود دارد. در شکل (۹-الف) و (۹-ج)، نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی افت انرژی به‌ترتیب نسبت به بالادست و پائین‌دست مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که روند میزان تغییرات استهلاک انرژی نسبت به بالادست و پائین‌دست حاصل از شبیه‌سازی همانند مقادیر به‌دست آمده از روابط می‌باشد و ضریب همبستگی ۰/۹۵ و ۰/۹۶ میان داده‌ها وجود دارد. به‌طوری‌که در نمودار شکل (۹-الف)، ضریب همبستگی ۰/۹۵ و حدکثر درصد خطای نسبی ۴/۲



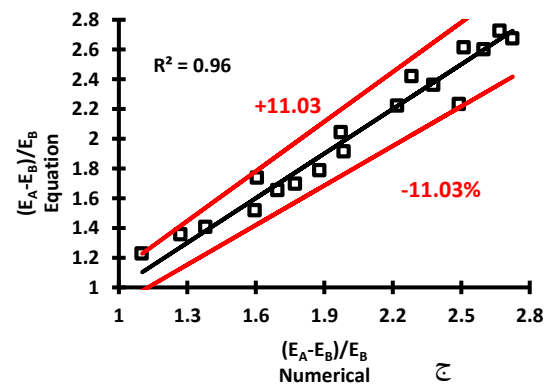
ب



الف

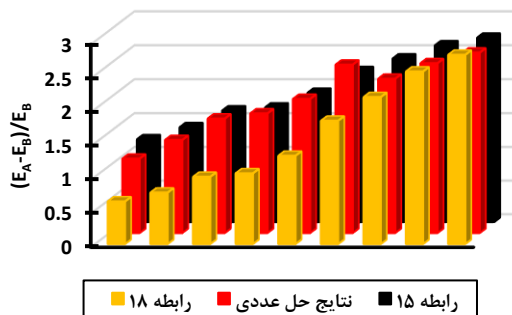


د

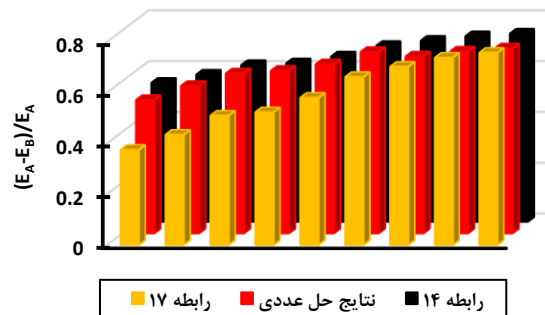


ج

شکل ۹- الف و ج) نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی افت انرژی نسبت به بالادست و پائین دست
ب و د) نمودار پراکندگی خطای نسبی داده‌ها



ب



الف

شکل ۱۰- نمودار مقایسه روابط ارائه شده در تحقیق حاضر با روابط محققین پیشین
الف) افت انرژی نسبت به بالادست ب) افت انرژی نسبت به پائین دست

شبیه‌سازی‌ها در دامنه وسیعی از عدد فرود در بازه ۲/۸ الی ۷/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در تمامی حالات استفاده از تنگ‌شدگی هلالی شکل افت انرژی بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک می‌باشد. با افزایش عدد فرود بعد از دریچه که یکی از متغیرهای موثر در

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عددی استهلاك نسبی انرژی جریان فوق بحرانی در مواجهه با تنگ‌شدگی هلالی شکل در دو اندازه با مقادیر ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر پرداخته شد و نتایج آن با تنگ‌شدگی ناگهانی با همان اندازه انقباض‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. تمامی

اکسل روابط چند جمله‌ای با ضریب همبستگی نزدیک به ۱ که تابعی از پارامترهای بدون بعد y_B/y_A و F_{rA} و B/W هستند، به دست آمد که برای تخمین افت انرژی نسبت به بالادست و پائین دست با اطمینان بالا می‌توانند به کار گرفته شوند. به طوری که تأثیر این پارامترها، سبب شد تا دقت رابطه ارائه شده در این تحقیق، نسبت به روابط ارائه شده سایر محققان بهبود چشمگیری یابد. هم‌چنین با توجه به بازه عدد فرود، باید از حوضچه آرامش نوع سه استفاده گردد اما استفاده از تنگ‌شدگی هلالی شکل به دلیل کاستن عدد فرود می‌تواند جایگزین حوضچه آرامش شود. لذا با توجه به مصرف کم مصالح، از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abrishami, J. and Esmaili, K. (1997). Hydraulic Jump in Adverse Channel Slopes with Positive steps: *Amirkabir Journal of Science and Research*, 20(1), 276-292. (In Farsi)
- Babaali, H. Shamsai, A. and Vosoughifar, H. (2015). Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes: *Arab J Sci Eng* 40(2), 381-395.
- Chow, V. R. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Daneshfaraz, R. Sadeghfam, S. and Rezazadeh-Joudi, A. (2017). Laboratory Investigation on the Effect of Screen's Location on the Flow Energy Dissipation: *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 47-62. (In Farsi)
- Daneshfaraz, R. Rezazadeh-Joudi, A. and Sadeghfam, S. (2018). Experimental Investigation of Energy Dissipation in the Sudden Choked Flow with free Surfaces: *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(2), 101-108. (In Farsi)
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasanniya, V. (2019). Experimental Investigation of Energy Dissipation in Vertical Drops Equipped with a Horizontal Screen under Supercritical Flow, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), pp. 1421-1436. doi: 10.22059/ijswr.2019.269301.668053
- Daneshfaraz, R. MajediAsl, M. Mirzaee, R. and Tayfur, G. (2020a). Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. *AUT Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ajce.2020.18227.5667
- Daneshfaraz, R. MajediAsl, M. Mirzaee, R. Parsamehr, P. (2020b). Experimental Study of the Roughness Bed with non-Continuous Trapezoidal Elements on S-Jump Characteristics in the non-Prismatic Rectangular Channel: *Sharif Journal Civil Engineering*, 36(2), 119-128. (In Farsi)
- Daneshfaraz, R. Aminvash, E. Esmaili, R. Sadeghfam, S. and Abraham, J. (2020c). Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions: *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 8(4), 396-406.
- Das, R. Pal, D. Das, S. and Mazumdar A. (2014). Study of Energy Dissipation on Inclined Rectangular Contracted Chute: *Arab J Sci Eng* 39(10), 6995-7002.
- Dey, S. and Raikar, R.V. (2005). Scour in Long Contractions: *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1036-1049.
- Ebrahimiyani, S. Hajikandi, H. Shafai Bejestan, M. Jamali, S. and Asadi, E. (2020). Studying the effect of trapezoidal channel side slope on the bed shear stress and hydraulic jump characteristics using Flow3D model: *Iranian Water Research Journal*, 13(4), 103-112. (In Farsi)
- Esmaili, K. and Abrishami, J. (2001). Hydraulic Jump over Negative Slopes with Negative Steps: *Journal of Advanced Materials in Engineering*, 19(2), 97-110. (In Farsi)
- Flow Science Inc. (2016) *FLOW-3D V 11.2 User's Manual*, Santa Fe, NM, USA.
- Ghaderi A, Dasineh M, Abbasi S. (2019). Impact of Vertically Constricted Entrance on Hydraulic Characteristics of Vertical Drop (Numerical Investigation): *Journal of Hydraulic*, 13(4), 121-131. (In Farsi)
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Abbasi, S. et al. Numerical analysis of the hydraulic characteristics of modified labyrinth weirs. *Int J Energ Water Res* 4, 425-436 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00082-5>
- Gohari, A. and Farhoudi, J. (2009). The Characteristics of Hydraulic Jump on Rough Bed Stilling Basin. in: *Proceedings of 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment*, 9-14 Aug., Vancouver, British Columbia, Canada
- Hager, W. H. and Dupraz, P.A. (1985). Discharge characteristics of local, discontinuous contractions: *Journal of Hydraulic Research*, 23(5), 421-433.
- Hasannia, V. Daneshfaraz, R. Sadeghfam, S. (2021). Experimental investigation of hydraulic

- parameters of vertical drop equipped with combined screens: *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52 (10), 1-14. (In Farsi)
- Henderson, F. M. (1966) *Open channel flow*. New York: Macmillan.
- Izadjoo, F. and Shafaei Bajestan, M. (2005). Hydraulic Jump Characteristics on a Trapezoidal Corrugated Bed: *The Scientific Journal of Agriculture*, 27(Special Issue of Water Science Engineering), 107-122. (In Farsi)
- Jan, C. D. and Chang, C. J. (2009). Hydraulic Jumps in an Inclined Rectangular Chute Contraction: *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), 949-958.
- Katorani, S. and Kashefipoor, S. M. (2014). Effect of the Geometric Characteristics of Baffled and Bed Slopes of Drop on Hydraulic Flow Conditions in Baffled Apron Drop. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), 51-59. (In Farsi)
- Lotfi, N and Jafarzadeh, M. R. (2017). Investigation of the effects of convergence and roughness on the characteristics of hydraulic jump in narrowing channels. In: *Proceedings of 16th Iranian Hydraulics Conference*, 6-7 Sep., Ardabil, Iran. (In Farsi)
- Nayebzadeh, B. Lotfollahi-yaghin, M. and Daneshfaraz, R. (2019). Experimental study of Energy Dissipation at a Vertical Drop Equipped with Vertical Screen with Gradually Expanding at the Downstream: *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12), 7-7. doi: 10.22060/ceej.2019.16493.6265 (In Farsi)
- Nazari Ali Abadi, kh. Akhtari, A. A. and Gord Noshahri, A. (2017). Effect of Rectangular Strip Roughness on Hydraulic Jump Characteristic in Diverging Rectangular Sections With FLOW-3D Software: *Modares Civil Engineering journal*, 17(4), 251-262. (In Farsi)
- Sadeghfam, S. Akhtari, A.A. Daneshfaraz, R. and Tayfur, G. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump: *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38(2), 126-138.
- Shabani Chafjiri, A. and Jafarzadeh, M. R. (2020). Experimental study of hydraulic jump characteristics in an inclined convergent channel: *Modares Civil Engineering journal*, 20(2), 27-40. (In Farsi)
- Shojaeian, Z. Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D. and Salmasi, F. (2011). Investigation of Hydraulic Jump Characteristics In Divergent Rectangular Sections On Inverse Slope: *Water and Soil Science (Agriculture Science)*, 21(3), 49-60. (In Farsi)
- Wu, B. and Molinas, A. (2001). Choked Flows through Contractions: *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(8), 657-662.
- Yarnell, D. L. (1934). *Bridge piers as channel obstructions*. Washington: U.S. Dept. of Agriculture