نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۲۲۱ تا ۳۲۳۸
DOI: 10.22060/ceej.2020.17779.6671

بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن های قائم با وجود صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره

بهنام نایب زاده[1*] ، محمد علی لطف الهی یقین[1]، رسول دانشفراز[2]

[1]دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[2]دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

خلاصه: در تحقیق حاضر، به بررسی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن های قائم با صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره در پایین دست آن با استفاده از نرم افزار FLOW- 3D پرداخته شد. برای این منظور از صفحات مشبک با نسبت تخلخل های ۴۰ و ۵۰ درصد، پنج نسبت واگرایی تدریجی به همراه سه ارتفاع شیب شکن قائم در محدوده دبی مشخص استفاده گردید. مشخص شد که نتایج عددی با مدل آشفتگی RNG در مقایسه با k-ε به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است. همچنین با افزایش ارتفاع شیب شکن از ۱۵ به ۲۵ سانتی متر، E/E0Δ به دلیل شدت برخورد جت با کف، افزایش و y_p/P کاهش می یابد. بیشینه E/E0 Δ مربوط به ارتفاع ۲۵ سانتی متر به میزان ۵۱/۶۰ درصد و کمترین آن برای ارتفاع ۱۵ سانتی متر به مقدار ۴۴/۲۵ درصد می باشد. برای یک ارتفاع شیب شکن ثابت با افزایش دبی، E/E0 Δ کاهش و y_p/P افزایش می یابد. واگرایی دیواره موجب تلاطم در کناره ها و توزیع غیریکنواخت عمق در پایین دست آن می شود و ضمن افزایش y_p/P و y_d/P باعث افزایش ۲۵ درصدی E/E0 Δ می گردد. وجود صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن باعث افزایش y_p/P، y_d/P و همچنین افزایش ۴۴ درصدی E/E0 Δ می گردد. استفاده همزمان از واگرایی دیواره و صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن ها باعث افزایش ۴۶ درصدی E/E0 Δ و کاهش y_p/P و y_d/P می شود. ثابت شد که سهم مشارکتی استفاده از صفحات مشبک در مقایسه با واگرایی تدریجی دیواره بیشتر است که با بکارگیری همزمان آن ها، E/E0 Δ تا ۳۳/۵ درصد افزایش می یابد.

تاریخچه داوری:
دریافت:۱۳۹۸/۱۱/۰۳
بازنگری:۱۳۹۸/۱۱/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
شیب شکن قائم
نسبت تخلخل
مدل های آشفتگی
واگرایی تدریجی دیواره
FLOW-3D

۱- مقدمه

شیب شکن های قائم موجب کاهش شیب طبیعی زمین به شیب طراحی می شود. از این رو انتقال ناگهانی و فرو افتادن آب بالادست بر روی کف پایین دست در شیب شکن ها باعث کاهش انرژی جریان می گردد [۲و۱] با وجود این شرایط، شیب شکن های قائم نیازمند سازه ای برای کاهش انرژی جریان در پایین دست می باشند. صفحات مشبک قائم با درصد تخلخل های مختلف به همراه واگرایی تدریجی در پایین دست این سازه ها از جمله مستهلک کننده های انرژی جریان می باشند که از آن‌ها می توان در پایین دست شیب شکن قائم استفاده کرد. مطالعات تجربی و عددی زیادی بر روی شیب شکن های قائم انجام شده است؛ ولی استفاده از سازه های الحاقی در پایین دست این سازه ها از پدیدهای نو در مهندسی هیدرولیک می باشد. اهم مطالعات انجام یافته در مورد شیب‌شکن های قائم و صفحات مشبک به شرح زیر است:

مور[1] (۱۹۴۳) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب شکن قائم پرداخت. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی تابعی از عمق نسبی بحرانی می باشد. همچنین وی دلیل اصلی استهلاک انرژی در این سازه ها را برخورد جت ریزشی با کف کانال بیان نمود

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bnayebzadeh@yahoo.com

1 Moore

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

[۱]. اسن و همکاران[1] (۲۰۰۴) به مطالعهٔ تأثیر وجود پله با ابعاد مختلف در پایین‌دست شیب شکن های قائم و پارامترهای مؤثر بر آن پرداختند. در انتها نیز روابطی را برای عمق های نسبی استخر و پایین دست برای هر دو حالت با و بدون پایه ارائه نمودند [۳]. چمنی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تئوری لایه برشی و جت سطحی توسعه یافته با استفاده از نتایج محققین قبلی، روابطی را برای تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی جریان عبوری از شیب شکن قائم در رژیم جریان زیر بحرانی ارائه کردند [۴]. منصوری و ضیایی (۲۰۱۴) به بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان اطراف انواع مختلف شیب شکن قائم با نرم افزار FLUENT پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار استهلاک انرژی مربوط به شیب شکن قائم با آستانه انتهایی و کمترین نیز به شیب شکن قائم ساده باز می گردد [۵]. صادق فام و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی آزمایشگاهی رفتار صفحات مشبک در شرایط جریان فوق بحرانی در بازه عدد فرود مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که صفحات مشبک، نسبت به هر دو پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق، استهلاک انرژی بیشتری داشته و آرایش دوتایی صفحات مشبک عملکرد بهتری نسبت به آرایش منفرد دارد [۶]. دانشفراز و همکاران (۱۳۹۶) به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که میزان استهلاک انرژی برای حالت های استفاده از صفحات مشبک بیشتر از پرش آزاد می باشد. همچنین ثابت کردند که افزایش عدد فرود، کارایی صفحات مشبک را افزایش داده و بازده این صفحات را در استهلاک انرژی کاهش می دهد [۷]. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی استهلاک انرژی ناشی از عوامل سیستم های مستهلک کننده پرش هیدرولیکی، بلوک و صفحه مشبک پرداختند. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی بیشتری در استفاده از بلوک های مانع قبل از صفحات مشبک نسبت به مدل های متناظر بدون بلوک ایجاد می گردد [۸]. کبیری سامانی و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه پارامترهای هیدرولیکی جریان در مستهلک کننده شبکه‌ای و شیاری افقی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شیب‌شکن، نسبت استهلاک انرژی به انرژی اولیه کاهش و عمق آب پشت دریچه افزایش می یابد [۹]. دانشفراز و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در انقباض ناگهانی جریان با سطوح آزاد پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار اُفت انرژی مربوط به قبل از انقباض ناگهانی بوده و در این مقطع با افزایش دبی جریان و متعاقباً با افزایش عدد فرود، میزان اُفت انرژی به شدت افزایش یافته می یابد [۱۰]. قادری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی عددی تأثیر تنگ شدگی های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم با استفاده از نرم فزار FLOW-3D پرداختند. نتایج آنان نشان داد که وجود تنگ شدگی قائم ورودی، باعث افزایش سرعت در لبهٔ شیب شکن می شود. از این رو، با افزایش تلاطم در اثر سقوط جت های تقسیم شدهٔ جریان، کاهش انرژی جنبشی بیشتری در پایین دست اتفاق می افتد [۱۱]. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی استهلاک انرژی ناشی از صفحات اسکرین و بستر رسوبی متحرک علاوه بر پرش هیدرولیکی ایجاد شده بعد از دریچه پرداختند. نتایج نشان داد که اسکرین ها علاوه بر استهلاک انرژی می توانند به عنوان فیلتر و کنترل کننده رسوب نیز مورد مطالعه قرار گیرند [۱۲]. دانشفراز و همکاران (۱۳۹۸ و ۲۰۲۰) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی تک و دوبل پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از این صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن‌های قائم باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌گردد [۱۳ و۱۴]. نوروزی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی استهلاک انرژی ناشی از بکارگیری صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب شکن های مایل با روش ترکیبی عصبی- فازی تطبیق پذیر پرداختند. نتایج حاکی از قابلیت بالای مدل عصبی- فازی تطبیق پذیر نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین استهلاک انرژی نسبی است [۱۵]. صادق فام و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی جت های جریان فوق بحرانی در بالادست صفحات مشبک و ابعاد مدل سازی با کمک مدل هوشمند AIIM پرداختند. ابتدا با استفاده از داده های آزمایشگاهی، مدل های SFL و NF را اجرا نمودند و سپس این مدل ها را به عنوان ورودی مدل SVM انتخاب کردند. آنها نشان دادند که مدل SVM باعث بهبود نتایج می شود [۱۶].

با توجه به تحقیق های پیشین و عدم وجود مطالعات عددی در مورد استفاده توأم از صفحات مشبک و واگرایی تدریجی در بحث مربوط به استهلاک انرژی در شیب شکن قائم، لزوم بررسی چنین

1 Esen et al.

تحقیق هایی احساس می گردد. از این رو، در تحقیق حاضر، به بررسی استهلاک انرژی با واگرایی تدریجی و نسبت تخلخل های مختلف صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن های قائم تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداخته شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱-آنالیز ابعادی

شکل ۱، پارامترهای مهم تأثیرگذار بر میزان استهلاک انرژی در شیب شکن قائم با صفحات مشبک و واگرایی تدریجی را در تحقیق حاضر نشان می دهد. پارامترهای تأثیرگذار بر استهلاک انرژی به صورت رابطه (۱) بیان می گردد:

$$\Delta E = f_1(\rho,\mu,g,Q,W,P,N,t,d,y_c,y_0,B,y_d,y_p) \qquad (۱)$$

که در روابط بالا $E\Delta$ استهلاک انرژی، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، gشتاب گرانش، Q دبی جریان، W عرض کانال، P ارتفاع شیب شکن، N نسبت تخلخل، t ضخامت صفحات مشبک، d فاصله صفحات مشبک با لبه شیب شکن، y_c عمق بحرانی، y_0 عمق بالادست شیب شکن، $B = b_2/b_1$ نسبت واگرایی تدریجی دیواره، y_d عمق پایین دست صفحات مشبک و y_p عمق استخر است.

با در نظر گرفتن y_0 ، ρ و g به عنوان متغیرهای تکراری رابطه بی بعد استهلاک انرژی به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_2(\mathrm{Re}_0, Fr_0, \frac{P}{y_0}, \frac{t}{y_0}, \frac{d}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_d}{y_0}, \frac{y_p}{y_0}, N, B) \qquad (۲)$$

با ساده سازی رابطه (۲)، رابطه (۳) به صورت زیر حاصل می شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_3(\mathrm{Re}_0, Fr_0, \frac{t}{P}, \frac{d}{P}, \frac{y_c}{P}, \frac{y_d}{P}, \frac{y_p}{P}, N, B) \qquad (۳)$$

که در آن، Fr_0 و Re_0 به ترتیب نمایانگر عددهای بدون بعد فرود و رینولدز می باشد. در تمامی آزمایش های انجام شده، $7000 \le \mathrm{Re}_0 \le 35000$ است و جریان متلاطم می‌باشد، بنابراین از اثر لزوجت می‌توان صرف‌نظر نمود [۱۷]. همچنین با توجه به محدوده کوچک عدد فرود بالادست که با اندازه گیری عمق بالادست در y_b (۱۰y_b عمق جریان در لبه شیب شکن) [۱۸] بدست آمد، مشخص شد که محدوده $0.68 < Fr_0 < 0.92$ می باشد، لذا از تأثیر این پارامتر بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن صرف نظر گردید [۱۱]. از ضخامت صفحات مشبک که پارامتری غیرمؤثر بر استهلاک انرژی معرفی شده است، نیز صرف نظر شد [۲۰و ۱۹]. همچنین به دلیل عدم تأثیر فاصله صفحات مشبک بر روی استهلاک انرژی نسبی، از این پارامتر صرف نظر گردید [۶]. از اثر عمق نسبی پایین دست به دلیل عدم کنترل عمق پایاب نیز صرف نظر شد. بنابراین می توان استهلاک انرژی نسبی را به صورت رابطه (۴) بیان نمود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_4(N, B, \frac{y_c}{P}) \qquad (۴)$$

عمق های نسبی استخر و پایین دست صفحات مشبک نیز بصورت رابطه (۵) و (۶) تعریف می شوند:

$$\frac{y_p}{P} = f_5(N, B, \frac{y_c}{P}) \qquad (۵)$$

y_p/P

$$\frac{y_d}{P} = f_6(N, B, \frac{y_c}{P}) \qquad (۶)$$

۲-۲- معادلات حاکم

نرم افزار FLOW-3D یک برنامه جامع دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی انواع مختلف جریان سیال و پدیده انتقال حرارت است [۲۱]. معادلات حاکم در این نرم افزار معادلات ناویر استوکس و بقای جرم می باشد. این نرم افزار برای تحلیل سه بعدی جریان معادلات ناویر- استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه بندی شده حل می کند. این معادلات در دستگاه مختصات کارتزین (x,y,z) به صورت زیر می باشند [۲۱]:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} + R_{DIF} \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \qquad (۹)$$

جدول ۱. مقادیر ضرایب ثابت مدلهای آشفتگی

Table 1. Constant coefficient values of turbulence models

مدل آشفتگی	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
$k-\varepsilon$	۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰
RNG	۰/۰۸	۱/۴۲	۱/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۲

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی و هندسی شیبشکن با صفحات مشبک و دیواره واگرایی تدریجی [۲۸]

Table 2. Dimensional and hydraulic numerical parameters

$B=b_1/b_2$	$N\,(\%)$	$P\,(m)$	$y_0\,(m)$ عمق بالادست شیبشکن	$y_c\,(m)$ عمق بحرانی	Fr_0	$Q\,(L/min)$
۱ ،۰/۸ ،۰/۶۸ ،۰/۵	۴۰،۵۰	۰/۱۵-۰/۲	۰/۰۲۱-۰/۰۶۸	۰/۰۹۲-۰/۰۵۸	۰/۶۸-۰/۹۲	۱۵۰-۸۰۰

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+G_z+f_z \qquad (۱۰)$$

در این روابط (u،v ،w) مؤلفه های سرعت، (A_x،A_y ،A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x،G_y ،G_z) شتاب جرمی، (f_x،f_y ،f_z) شتاب لزجت در جهت های (x،y ،z)، R_{SOR} منبع جرم، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی، V_F کسری از حجم مرتبط با جریان و P فشار می‌باشند. در این تحقیق برای شبیه سازی مشخصات جریان در شرایط جریان آشفته از مدل های آشفتگی RNGو k-ε استفاده شده است. انتخاب این مدل های آشفتگی به دلایل متعددی بوده که می توان به مواردی نظیر اعتمادپذیری در حل مسائل متنوع و نیازهای محاسباتی قابل قبول در مدل ها و همچنین بررسی مطالعات مشابه انجام شده توسط محققین [۱۲، ۲۵-۲۳] اشاره نمود. مدل k-ε یک مدل دو معادله ای است، معادله اول (رابطه (۱۱)) انرژی در آشفتگی را بیان می کند که انرژی جنبشی آشفته (k) نامیده می شود. معادله دوم (رابطه (۱۲)) استهلاک در آشفتگی (ε) است که میزان استهلاک انرژی جنبشی آشفته را مشخص می کند. این معادلات بصورت زیر بیان می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k\mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j})+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_s\mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x})+\cdot$$
$$C_{1s}-\frac{\varepsilon}{k}(G_k+G_{3s}G_b)+C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon+S_\varepsilon \qquad (۱۲)$$

در اینجا، G_k انرژی جنبشی آشفته ناشی از گردایان سرعت، G_b انرژی جنبشی آشفته ناشی از شناوری، Y_M توزیع نوسانات آشفتگی می باشد. در بکارگیری این معادلات مقادیر ضرایب برای دو مدل آشفتگی ذکر شده به صورت جدول ۱ منظور شده است [۲۶].

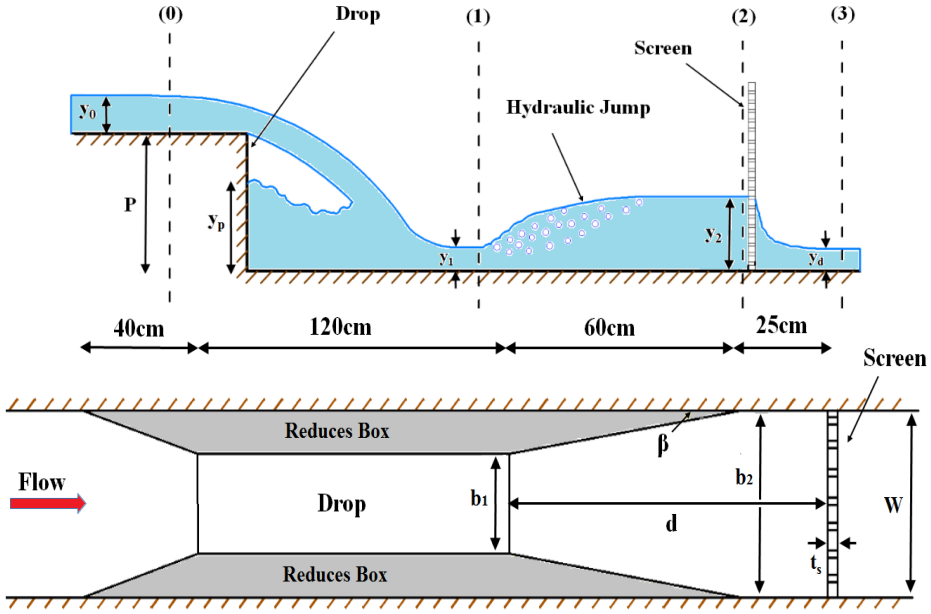
در نرم افزار FLOW-3Dبرای شبیه سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده می شود که در این روش با حل معادله ی زیر، F به عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود [۲۲].

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left(\frac{\partial}{\partial x}(FuA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(FvA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(FwA_z)\right)=0 \qquad (۱۳)$$

در صورتی که F=0 باشد سلول پر از هوا و در صورتی که F=1 باشد، سلول پر از آب می باشد. سطح آزاد جایی تعیین می شود که در آن F=0.5 است [۲۶].

۲-۳- مشخصات مدل عددی و شبکه محاسباتی

شبیه سازی مدل عددی با توجه به مشخصات مدل آزمایشگاهی [۲۸]، برای جریان عبوری از شیب شکن های قائم در حالت های



شکل ۱. شیبشکن قائم با صفحات مشبک و واگرایی تدریجی

Fig. 1. Vertical drop with vertical screen and gradually expanding

جدول ۳. متغیرهای مدل عددی

Table 3. Numerical Model Variables

ارتفاع شیبشکن	زاویه واگرایی	دبی	با و بدون حضور صفحه مشبک	جمع کل
۳	۵	۵	۳	۲۲۵

جدول ۴. شرایط مرزی مورد استفاده در تحقیق حاضر

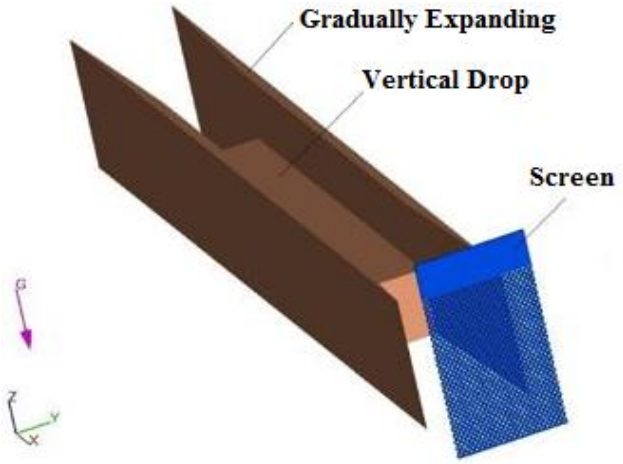
Table 4. Boundary conditions used in the present study

شرط مرزی دیوارهها و کف	شرط مرزی خروجی	شرط مرزی ورودی	شرط مرزی بالایی	نرمافزار
Wall	Outflow	Volume flow rate	Symmetry	FLOW-3D

مختلف انجام گردید. برای مدل آزمایشگاهی، از فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه با مقطع مستطیلی شکل به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ متر استفاده شد. جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی و هندسی شیب شکن قائم با صفحات مشبک و واگرایی دیواره را نشان می دهد. شکل ۲ و جدول ۳ به ترتیب نمایانگر هندسه سه بعدی شیب شکن قائم با صفحه مشبک و واگرایی تدریجی دیواره و همچنین متغیرهای مدل عددی تحقیق حاضر می باشد.

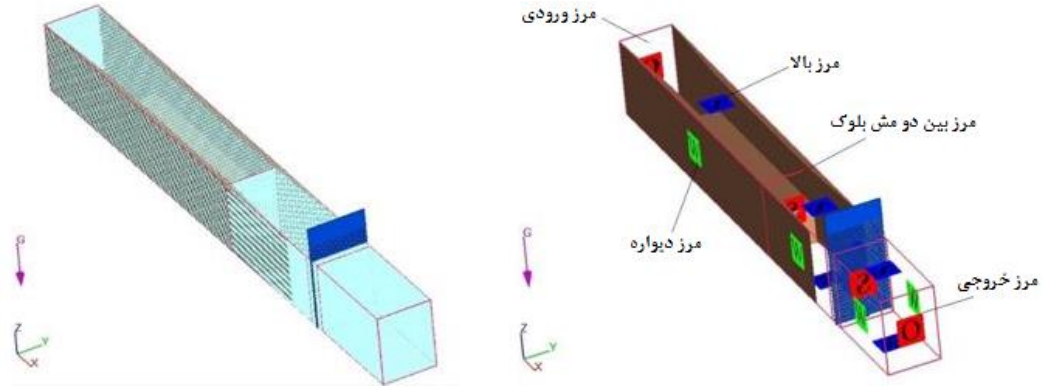
در این تحقیق، توزیع فشار هیدرواستاتیک در جهت Z به عنوان تنها شرط اولیه به مدل معرفی گردید. همچنین برای اعمال شرایط مرزی، در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن، برای ورودی جریان از شرط مرزی دبی مشخص و برای مرز پایین دست نیز به منظور عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه حل از شرایط بیرون، از شرط مرزی خروجی استفاده شده است، برای دیواره ها و کف کانال شرط مرزی Wall تعریف شده که همانند یک دیوار مجازی بدون اصطکاک عمل می کند. جدول ۴ و شکل ۳ به ترتیب نشان دهنده شرایط مرزی و مش بندی تحقیق حاضر می باشد.

در تحقیق حاضر برای شیب شکن قائم مورد بررسی، با



شکل ۲. هندسه سه بعدی شیبشکن قائم با صفحه مشبک و دیواره واگرایی تدریجی در نرمافزار FLOW-3D

Fig. 2. 3D geometry of vertical drop with vertical screen and gradually expanding in FLOW-3D



شکل ۳. اعمال شرایط مرزی و مشبندی

Fig. 3. Applied boundary conditions and computational mesh

شبیه سازی مدل در ۳ حالت مختلف با اندازه مش های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن ها از روی داده های آزمایشگاهی، در نهایت مش بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول ۵، نتایج عمق جریان برای دبی ۶۰۰ لیتر بر دقیقه در بالادست شیب شکن قائم و نقاط مشخص، بدست آمده از نتایج شبیه سازی عددی، با آزمایشگاهی مقایسه و درصد میانگین خطای نسبی (*MAPE* (%)) و خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) برای هر یک محاسبه گردید. شکل ۴ محل برداشت اعماق بالادست جریان جهت آنالیز حساسیت مش را نشان می دهد.

با توجه به خطاهای بدست آمده و مقایسه حالت ۲ و ۳، مشاهده می شود که تقریباً درصد خطاهای بدست آمده برای حالت ۲ و ۳ نزدیک به هم بوده و از این رو حالت ۳ به عنوان مش بهینه با تعداد کل ۱۶۲۰۷۸۵ تعداد سلول محاسباتی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که می توان با ریز تر کردن مش درصد خطای بدست آمده را کاهش داد؛ ولی نیازمند به سیستم با پردازش بالا و صرف زمان بیشتر برای شبیه سازی می باشد. به همین دلیل خطای ۴ درصد برای ادامه شبیه سازی جریان روی سایر مدل ها با این تعداد مش محاسباتی انتخاب گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انتخاب مدل آشفتگی مناسب و صحت سنجی

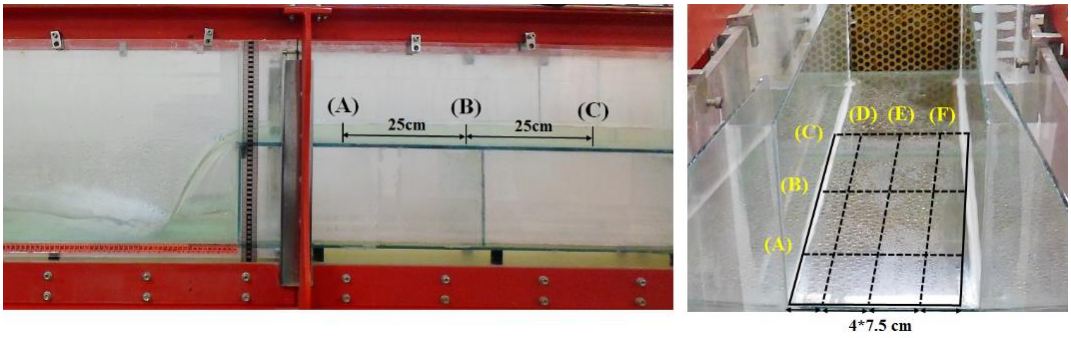
برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب، از مقایسه نیمرخ سطح جریان عبوری از روی شیب شکن قائم در دبی ۶۰۰ لیتر بر دقیقه در حل عددی و نتایج آزمایشگاهی با مدل های آشفتگی RNG و k-ε

جدول ۵. نتایج عمق جریان برای دبی ۶۰۰ لیتر بر دقیقه در بالادست شیبشکن قائم و نقاط مشخص

Table 5. Flow depth results for discharge ۶۰۰ L/min in upstream of the vertical drop

حالت	تعداد مش	محل برداشت	میانگین مقادیر عمق جریان در نتایج آزمایشگاهی (cm)	میانگین مقادیر عمق جریان در نتایج عددی (cm)	$MAPE$ (%) $100\times\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left\|\frac{X_{exp}-X_{num}}{X_{exp}}\right\|$	$RMSE$ (cm) $\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left(X_{exp}-X_{num}\right)^2}$
۱	۸۲۱۲۶۰	A	۵/۲۳	۵/۹۴	۱۳/۵۷	۰/۷۴
		B	۵/۲۷	۵/۹۰	۱۱/۹۵	۰/۶۳
		C	۵/۲۹	۵/۹۳	۱۲/۰۹	۰/۶۴
۲	۱۲۱۴۵۶۲	A	۵/۲۳	۵/۵۱	۵/۳۵	۰/۲۸
		B	۵/۲۷	۵/۵۲	۴/۷۴	۰/۲۵
		C	۵/۲۹	۵/۵۳	۴/۵۳	۰/۲۴
۳	۱۶۲۰۷۸۵	A	۵/۲۳	۵/۴۴	۴/۰۱	۰/۲۱
		B	۵/۲۷	۵/۴۵	۳/۴۱	۰/۱۸
		C	۵/۲۹	۵/۴۷	۳/۴۰	۰/۱۸
۴	بیشتر از ۱۶۲۰۷۸۵		نیازمند به سیستم با پردازش بالا و صرف زمان بیشتر برای شبیه‌سازی			

X_{exp}: مقدار داده‌های آزمایشگاهی، X_{num}: مقدار داده‌های عددی و n تعداد داده‌ها



شکل ۴. محل برداشت عمقهای بالادست جریان جهت آنالیز حساسیت مش [۲۷]

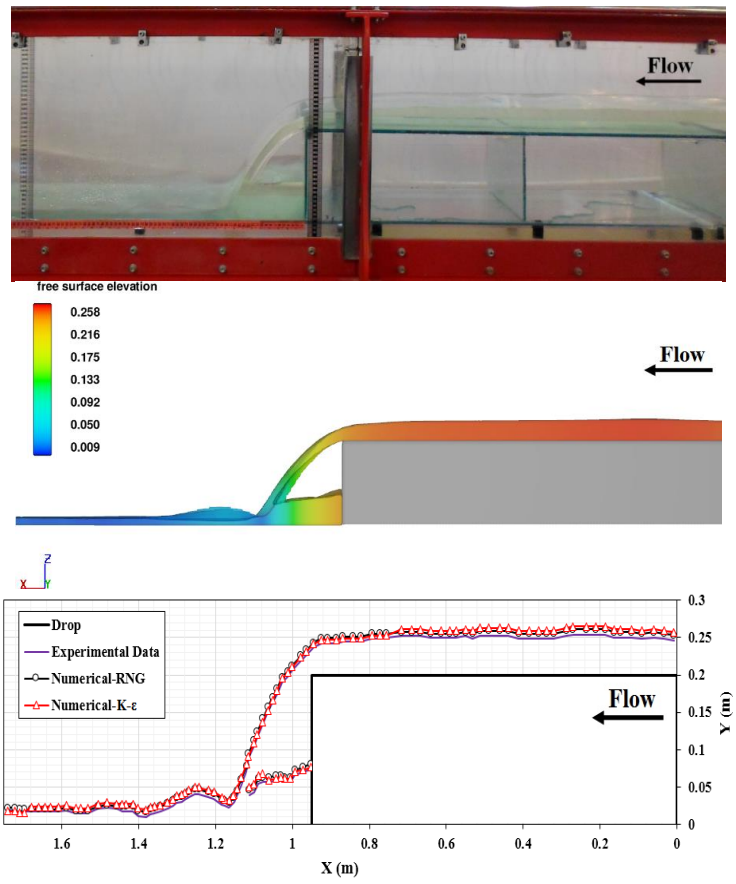
Fig. 4. Location of measurement upstream depths for mesh sensitivity analysis [۲۷]

استفاده شده است. شکل ۵ و جدول ۶ نتایج نیمرخ سطح آب حاصل از FLOW-3D و نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که نتایج بدست آمده از حل عددی با مدل آشفتگی RNG داده های نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی بدست می دهد. بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار $RMSE$ به ترتیب ۳/۹۹ درصد و ۰/۰۱ متر می باشد. بنابراین برای سایر مدل ها استفاده از مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق تر و نزدیک تری را به نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل آشفتگی k-ε می دهد.

صحت سنجی مدل، از طریق مقایسه عمق استخر، حاصل از نتایج نرم افزار FLOW-3D با نتایج آزمایشگاهی برای تمامی دبی ها انجام شد. شکل ۶ مقادیر حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی و خطاهای حاصل از مقایسه آن ها را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که روند تغییرات مقادیر عمق استخر حاصل از نتایج عددی همانند نتایج آزمایشگاهی می باشد. با دقت در شکل مربوط به برازش مقادیر عددی و آزمایشگاهی مشخص می گردد که حداکثر مقدار میانگین خطای نسبی عمق استخر حاصل از حل عددی و مقدار خطای $RMSE$ به ترتیب ۳/۷۸ درصد و ۰/۰۱۸ می باشد. لذا تطابق خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۵. مقایسه نتایج عددی تحقیق حاضر و آزمایشگاهی [۲۸] نیمرخ سطح جریان عبوری از شیبشکن قائم با دو مدل آَشفتگی

Fig. 5. Comparison of free surface profiles from numerical results and laboratory [28]

۳-۲- تأثیر ارتفاع شیب‌شکن قائم بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری

شکل ۷ جریان عبوری از شیب شکن قائم در سه ارتفاع مختلف شیب شکن (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی متر) را نشان می دهد.

مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع شیب شکن از ۱۵ به ۲۵ سانتی متر، عمق استخر تشکیل شده در پشت تیغه جریان ریزشی کاهش می یابد. شکل ۸ تأثیر ارتفاع شیب شکن قائم بر روی میزان استهلاک انرژی و عمق استخر در سه ارتفاع مختلف مذکور را نشان می دهد.

مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع شیب شکن، میزان استهلاک انرژی جریان در اثر شدت برخورد بیشتر جت جریان عبوری از روی شیب شکن با کف پایین دست آن افزایش و عمق استخر کاهش می یابد. از این رو، بیشترین میزان استهلاک انرژی مربوط به شیب‌شکن قائم با ارتفاع ۲۵ سانتی متر به میزان ۵۱/۶۰ درصد و کمترین آن مربوط به ارتفاع ۱۵ سانتی متر به میزان ۴۴/۲۵ درصد می باشد. برای یک ارتفاع شیب شکن ثابت، با افزایش دبی میزان استهلاک انرژی کاهش و عمق استخر افزایش می یابد.

۳-۳- تأثیر واگرایی تدریجی دیواره و صفحات مشبک بر روی مشخصات جریان عبوری از شیب شکن قائم

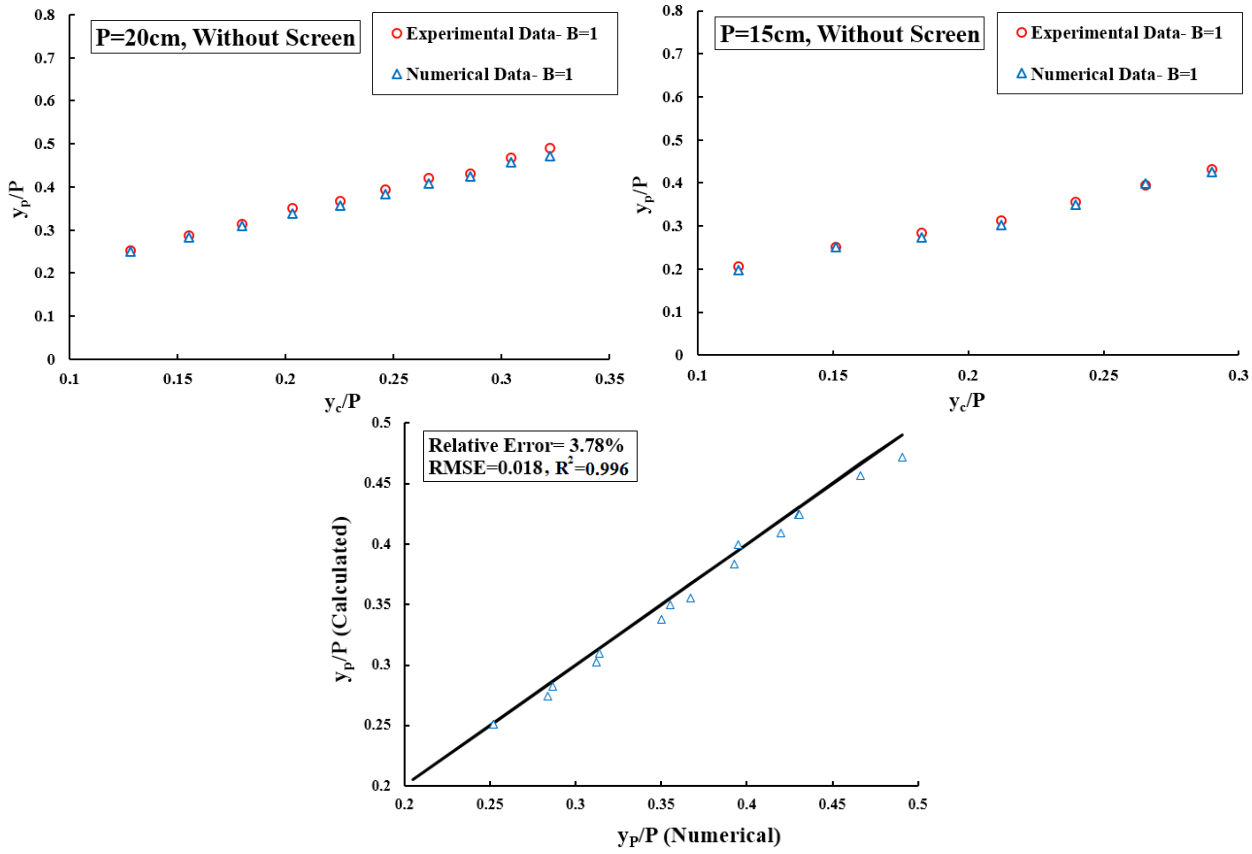
هدف از ایجاد حوضچه‌های واگرا در پایین‌دست شیب‌شکن قائم برای افزایش استهلاک انرژی در پرش می‌باشد. شکل ۹ تأثیر واگرایی دیواره بر مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم حاصل از نتایج عددی را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که ایجاد واگرایی تدریجی دیواره باعث افزایش عمق استخر به علت ایجاد تنگ شدگی در پای شیب شکن می شود. همچنین با افزایش واگرایی، عمق استخر افزایش می یابد. نکته قابل ذکر این است که ایجاد واگرایی تدریجی دیواره باعث تلاطم در کناره های جت و همچنین توزیع غیریکنواخت عمق در

جدول ۶. درصد خطای نسبی بدست آمده از نتایج عددی برای دو مدل آشفتگی RNG و $K-\varepsilon$

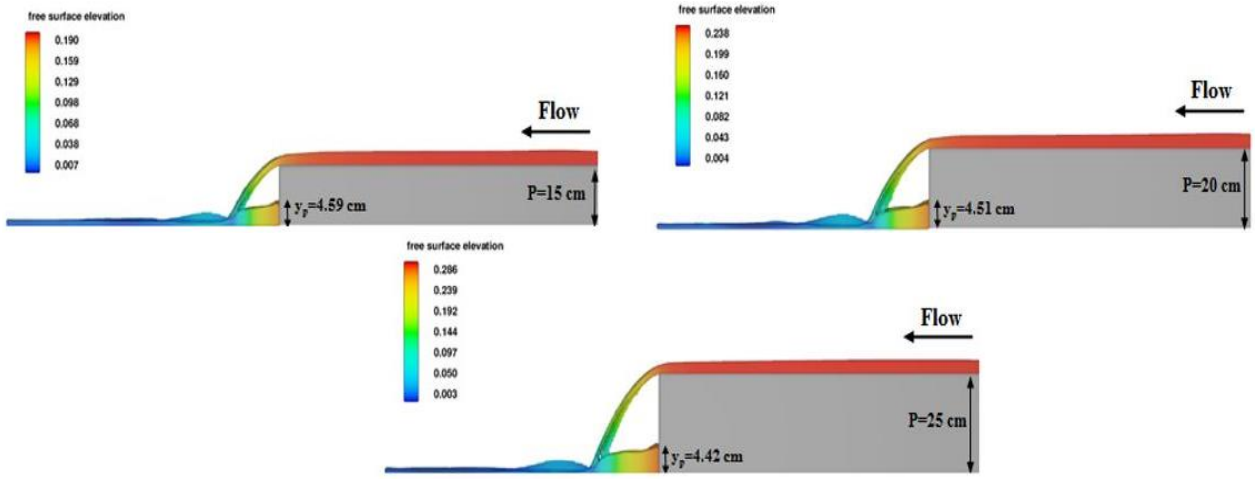
Table 6. Percentage of relative error obtained from the numerical results for the two turbulence models

X (m)	مقادیر ارتفاع آب (m)			*MAPE* (%)	*RMSE* (m)	*MAPE* (%)	*RMSE* (m)
	$K-\varepsilon$	RNG	نتایج آزمایشگاهی	$K-\varepsilon$	$K-\varepsilon$	RNG	RNG
۰/۱۵	۰/۲۶۴	۰/۲۵۶	۰/۲۵۰	۵/۷۰	۰/۰۱۴	۲/۴۹	۰/۰۰۶
۰/۳۰	۰/۲۶۵	۰/۲۵۹	۰/۲۵۰	۵/۸۴	۰/۰۱۴	۳/۵۷	۰/۰۰۸
۰/۴۰	۰/۲۶۳	۰/۲۵۹	۰/۲۴۹	۵/۷۰	۰/۰۱۴	۳/۹۹	۰/۰۱۰
۰/۵۵	۰/۲۵۹	۰/۲۵۶	۰/۲۴۹	۴/۲۷	۰/۰۱۰	۲/۸۰	۰/۰۰۶
۰/۷۰	۰/۲۶۴	۰/۲۵۸	۰/۲۵۲	۴/۸۰	۰/۰۱۲	۲/۳۲	۰/۰۰۵
۰/۸۵	۰/۲۵۸	۰/۲۵۳	۰/۲۴۵	۵/۲۴	۰/۰۱۳	۳/۲۷	۰/۰۰۸
۱/۰۵	۰/۱۸۵	۰/۱۸۰	۰/۱۷۵	۵/۳۵	۰/۰۰۹	۳/۰۵	۰/۰۰۵
۱/۱۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۶/۵۱	۰/۰۱۰	۲/۸۱	۰/۰۰۶
۱/۳۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۵/۱۲	۰/۰۰۸	۳/۷۰	۰/۰۰۶
۱/۶۰	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	۵/۶۹	۰/۰۱۰	۲/۴۴	۰/۰۰۴
۱/۷۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۴/۶۵	۰/۰۰۹	۱/۵۷	۰/۰۰۳



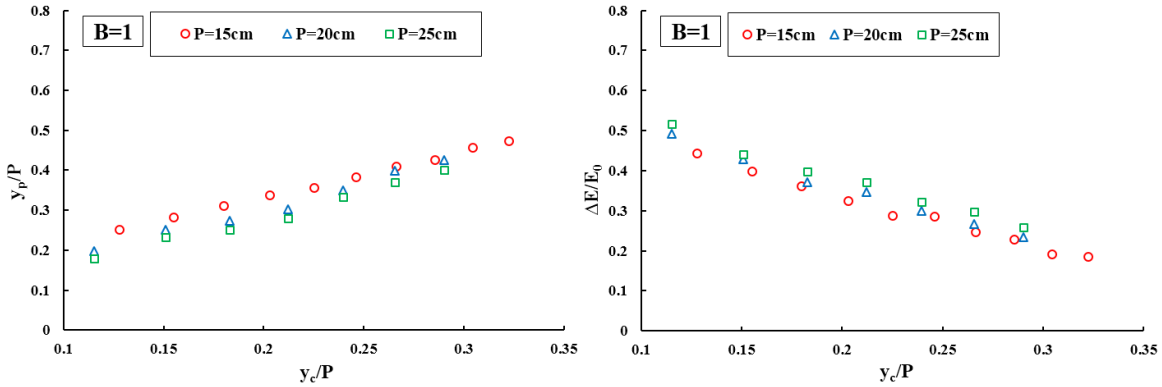
شکل ۶. مقایسه عمق استخر و برازش مقادیر عددی و آزمایشگاهی

Fig. 6. Comparison of pool depth and fitting of numerical and laboratory data



شکل ۷. جریان عبوری از شیبشکن قائم در سه ارتفاع مختلف شیبشکن

Fig. 7. The flow over on the vertical drop at three different drop heights



شکل ۸. مقایسه میزان استهلاک انرژی و عمق استخر در سه ارتفاع مختلف شیبشکن

Fig. 8. Comparison of energy dissipation rate and pool depth at three different drop heights

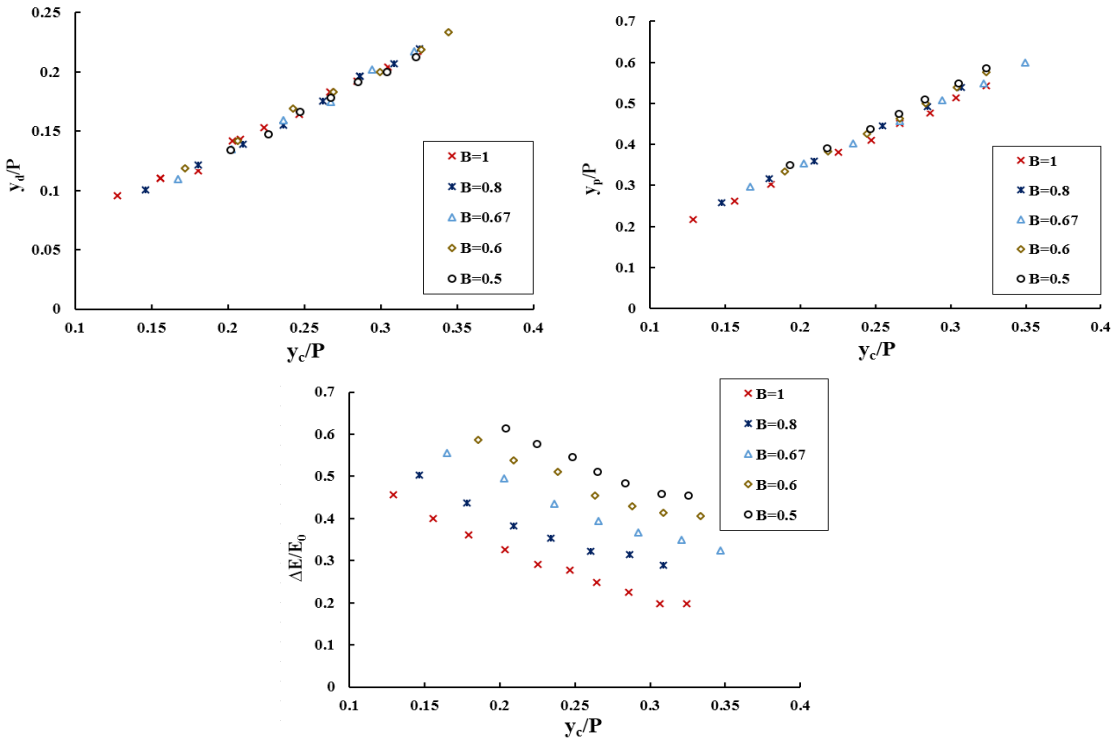
پایین دست شیب شکن شده است (عمق در کناره ها بیشتر از عمق در محور مرکزی کانال است). این امر باعث افزایش استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن قائم می شود؛ به طوری که با افزایش ۵۰ درصدی واگرایی دیواره، میزان استهلاک انرژی جریان ۲۴ درصد افزایش می یابد. با افزایش زاویه واگرایی و دبی، غیریکنواختی عمق پایین دست افزایش می یابد. شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب جریان عبوری از روی شیب شکن قائم و میزان استهلاک انرژی جریان در حضور صفحات مشبک در پایین دست آن را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که با حضور صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن قائم، عمق استخر، عمق پایین دست و استهلاک انرژی جریان افزایش می یابد، که این تغییرات همراه با پرش هیدرولیکی و ایجاد آشفتگی است. بکارگیری صفحات مشبک سبب افزایش ۴۲ درصدی میزان استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن قائم می گردد. نکته قابل ذکر اینکه تفاوت بین صفحات مشبک ۵۰ و ۴۰ درصد در استهلاک انرژی ۳ الی ۴ درصد می باشد.

۳-۴- تأثیر ارتفاع شیب شکن قائم با حضور واگرایی تدریجی دیواره و صفحات مشبک بر مشخصات هیدرولیکی

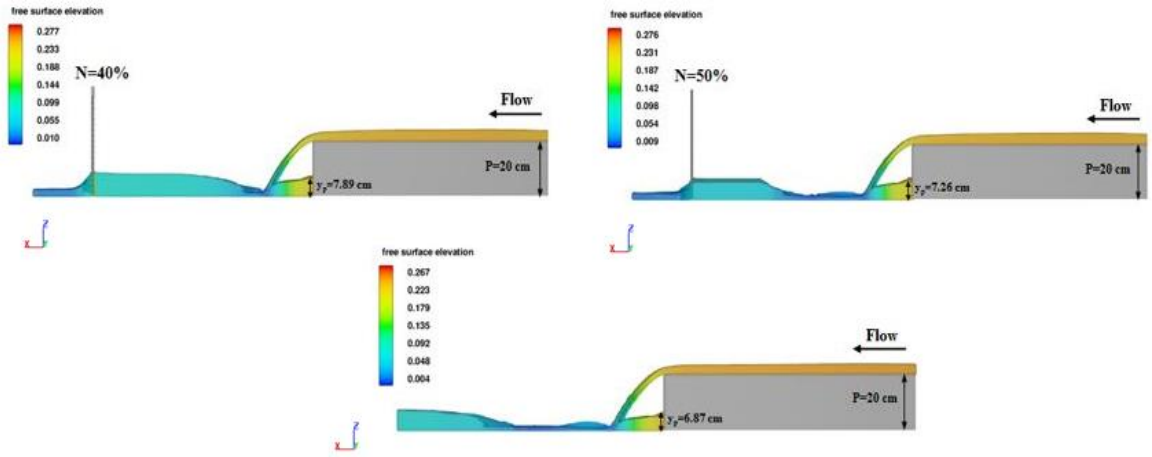
شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب جریان عبوری از روی شیب شکن و تأثیر ارتفاع شیب شکن در حضور واگرایی تدریجی دیواره بر مشخصات هیدرولیکی شیب شکن را نشان می دهد.

مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع شیب شکن و در شرایط وجود



شکل ۹. تأثیر واگرایی دیواره بر مشخصات هیدرولیکی شیبشکن قائم

Fig. 9. Influence of the gradually expanding on hydraulic properties in vertical drop

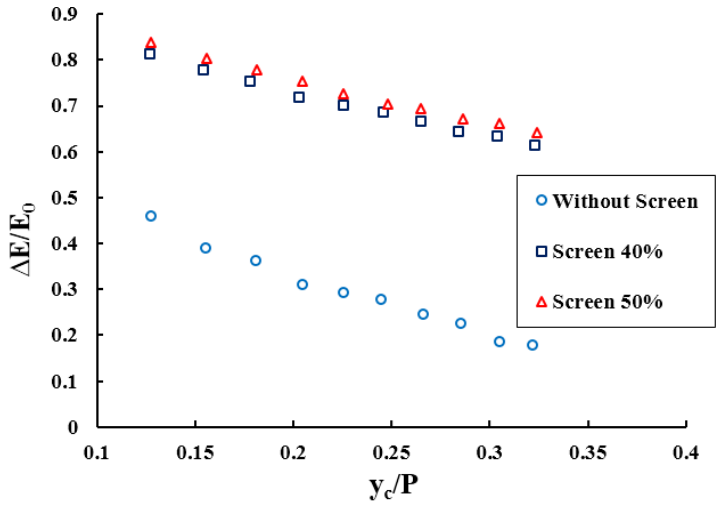


شکل ۱۰. جریان عبوری از شیبشکن قائم با حضور صفحات مشبک در پایین‌دست

Fig. 10. Flow over on the vertical drop with the presence vertical screen

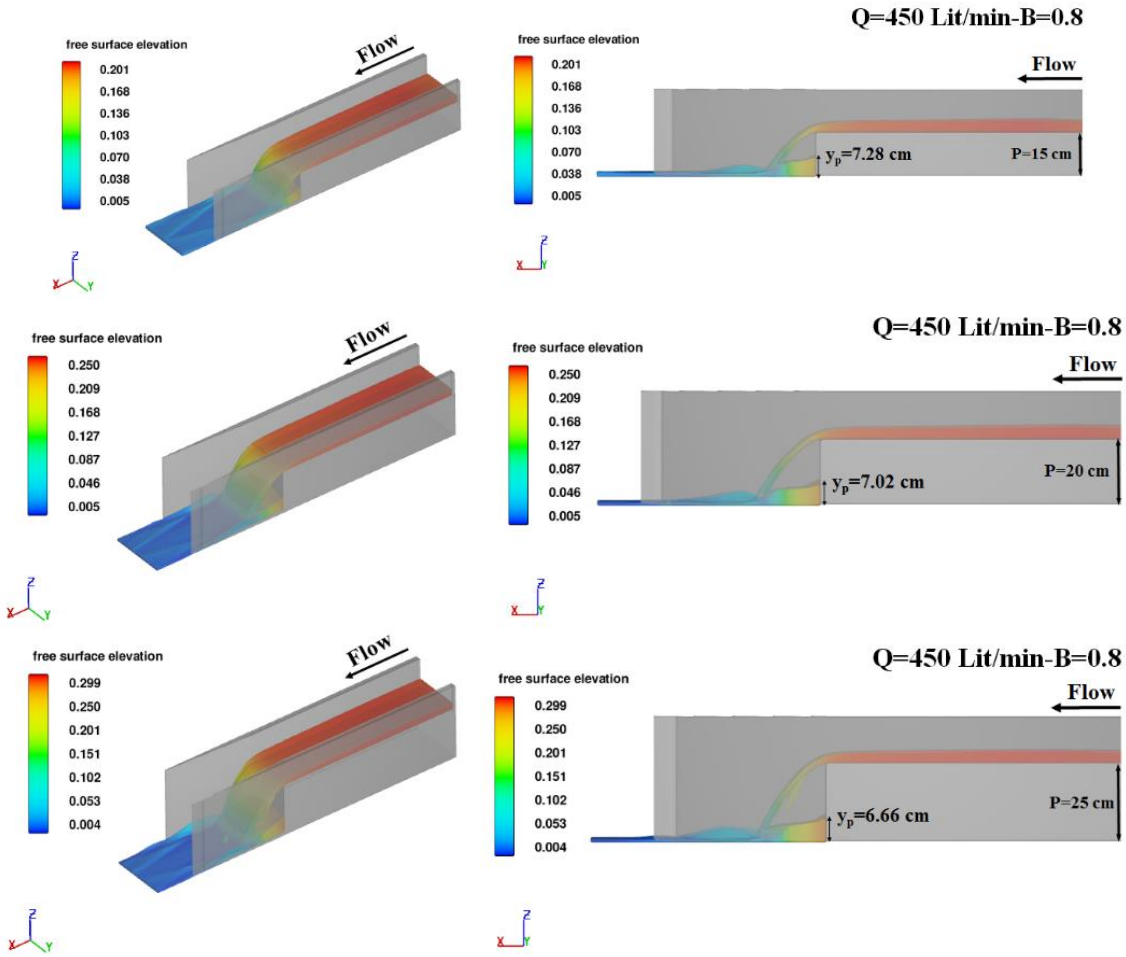
واگرایی تدریجی دیواره، استهلاک انرژی به علت تشدید برخورد تیغه ریزشی جریان افزایش یافته و سبب کاهش عمق استخر می گردد؛ به طوری که افزایش ارتفاع از ۱۵ سانتی متر به ۲۵ سانتی متر، باعث افزایش ۲۱ درصدی میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از روی شیب شکن می شود. شکل های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب جریان عبوری از شیب شکن قائم با حضور صفحات مشبک در سه ارتفاع مختلف و تأثیر ارتفاع شیب شکن در حالت وجود صفحات مشبک بر روی استهلاک انرژی و عمق استخر را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که برای نسبت تخلخل یکسان صفحات مشبک، با افزایش ارتفاع شیب شکن قائم، عمق استخر کاهش و میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد؛ به طوری که با افزایش ارتفاع از ۱۵ سانتی متر به ۲۵ سانتی متر، میزان عمق استخر ۱۰ درصد



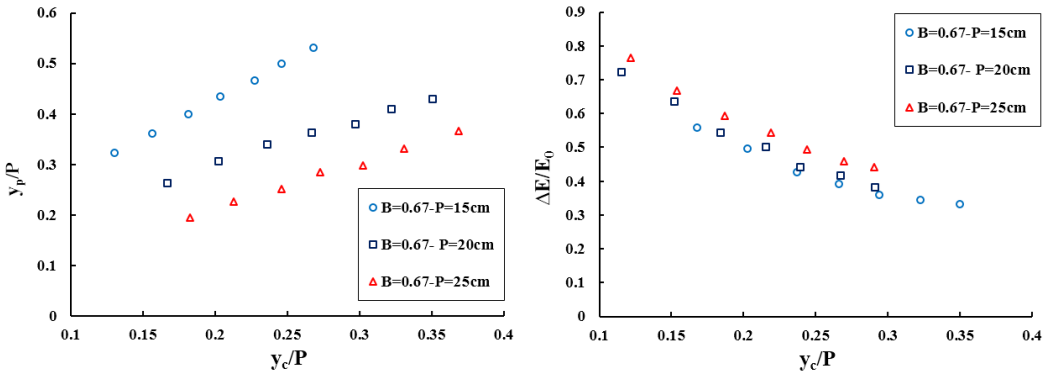
شکل ۱۱. میزان استهلاک انرژی جریان در حضور صفحات مشبک در پایین‌دست شیبشکن قائم

Fig. 11. Energy dissipation in downstream of the vertical drop with the presence vertical screen



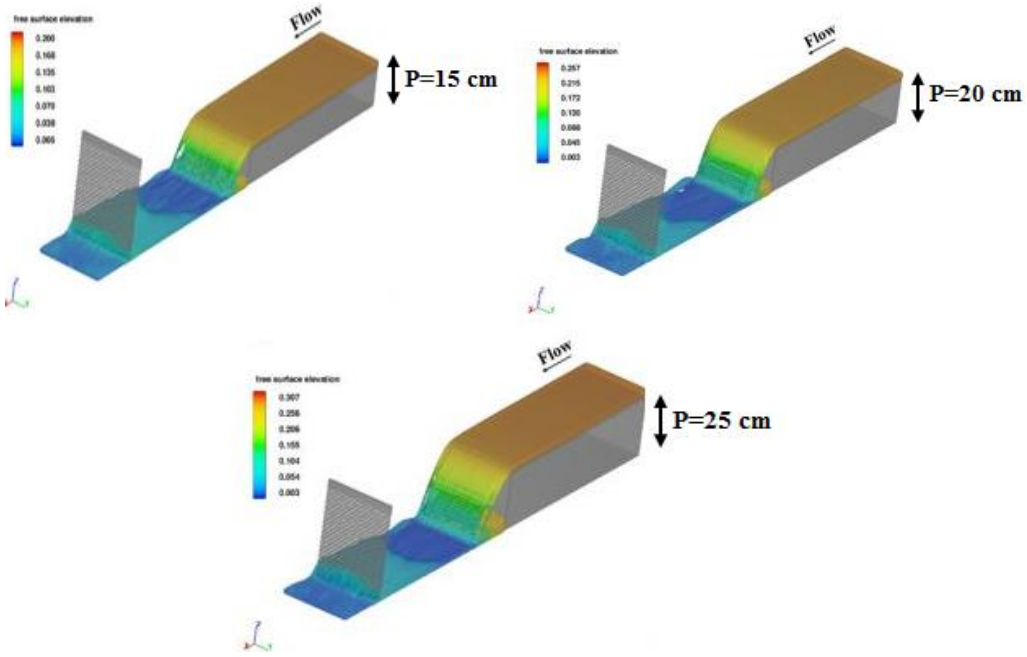
شکل ۱۲. جریان عبوری از شیبشکن قائم با حضور واگرایی تدریجی دیواره با ارتفاع متفاوت شیب‌شکن قائم

Fig. 12. Flow over on the vertical drop the gradually expanding and different vertical drop heights



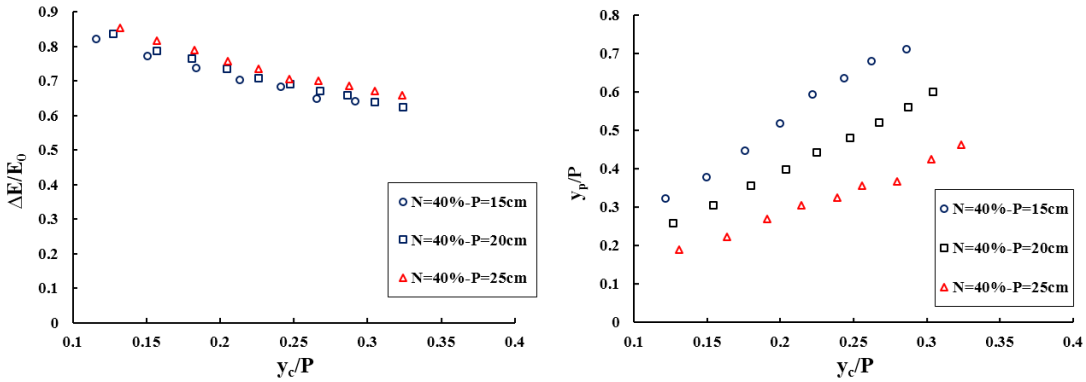
شکل ۱۳. تأثیر ارتفاع شیبشکن قائم و واگرایی تدریجی دیواره بر مشخصات هیدرولیکی

Fig. 13. Influence of vertical drop height and the gradually expanding wall on hydraulic properties



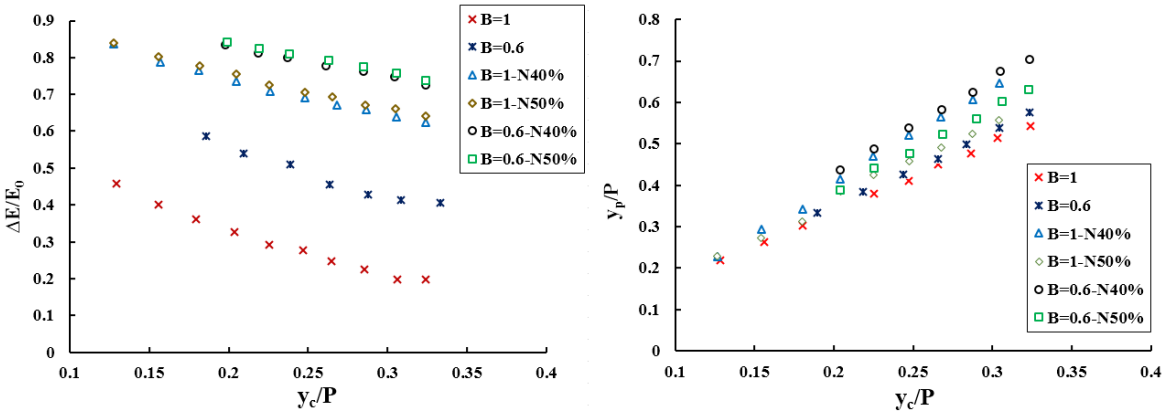
شکل ۱۴. جریان عبوری از شیبشکن قائم با حضور صفحات مشبک در سه ارتفاع مختلف

Fig. 14. Flow over on the vertical drop with the presence vertical screen at three different drop heights



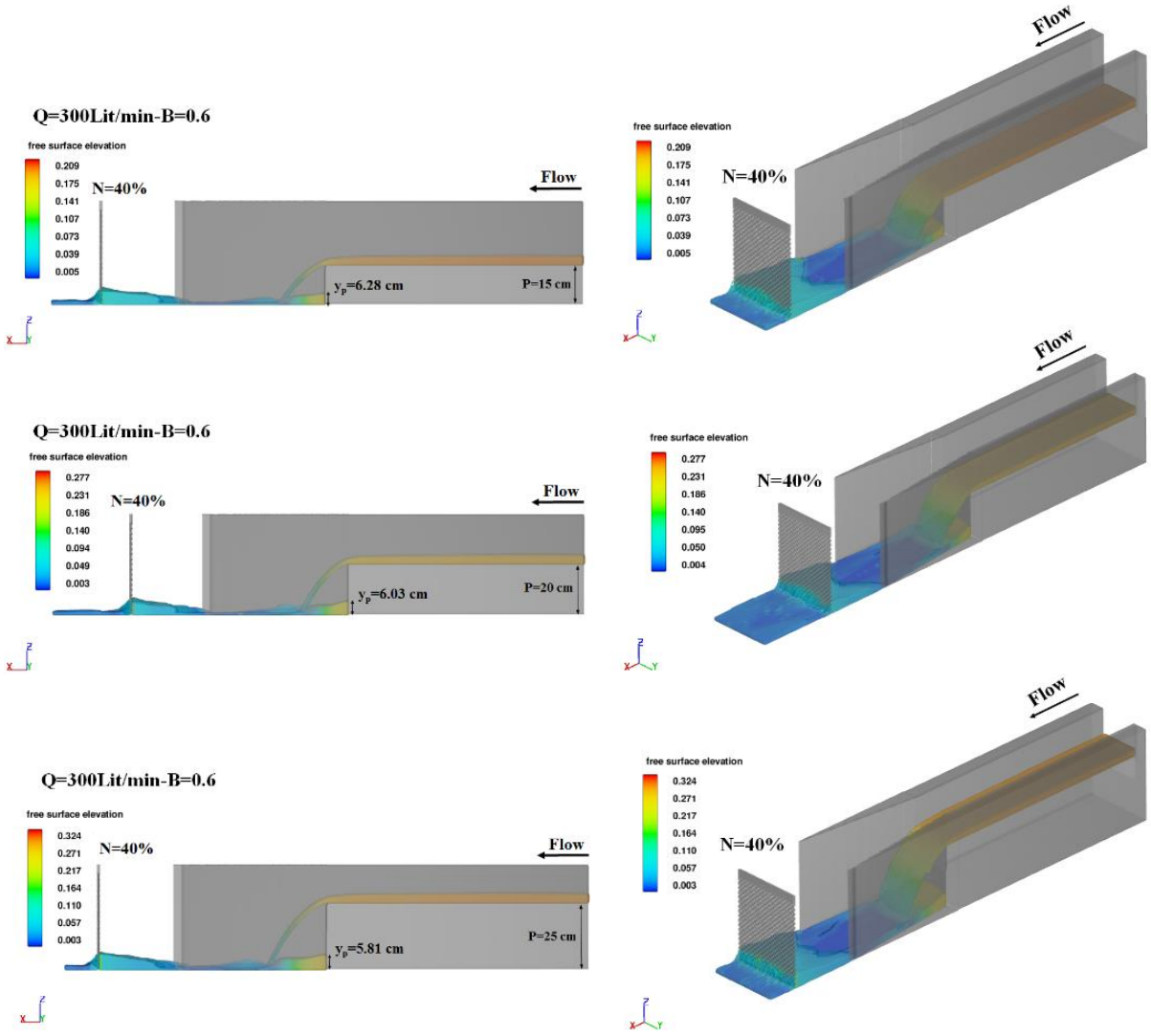
شکل ۱۵. تأثیر ارتفاع شیبشکن بر مشخصات هیدرولیکی شیبشکن در حضور صفحات مشبک

Fig. 15. Influence of drops height on the hydraulic properties drop with the presence vertical screen



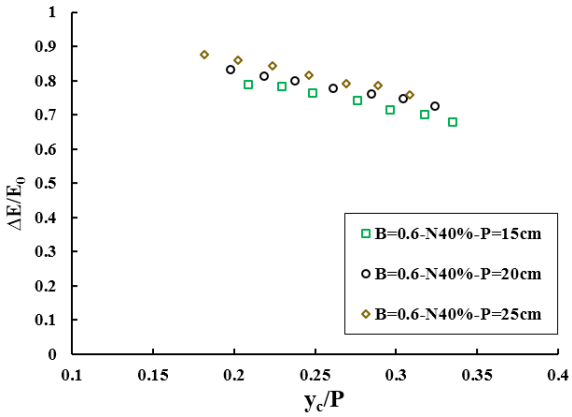
شکل ۱۶. تأثیر وجود توام صفحات مشبک به همراه واگرایی دیواره بر روی عمق استخر و میزان استهلاک انرژی

Fig. 16. The effect of the presence of gradually wall expanding and vertical screens on pool depth and energy dissipation



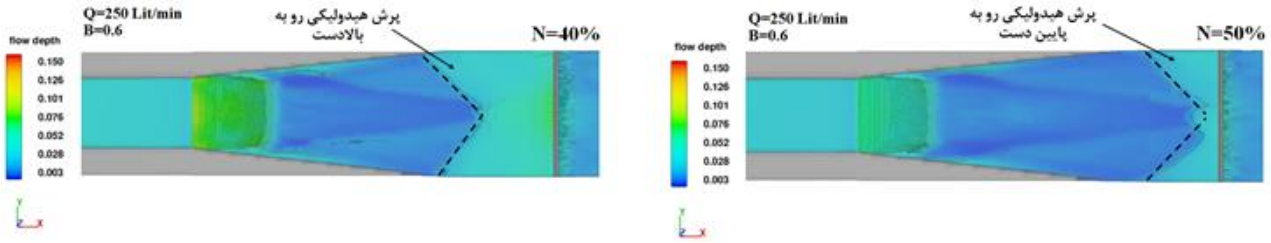
شکل ۱۷. جریان عبوری از شیبشکن قائم با سه ارتفاع متفاوت با حضور واگرایی دیواره و صفحات مشبک

Fig. 17. Flow over on vertical drop with screen plates and gradually expanding wall



شکل ۱۸. میزان استهلاک انرژی جریان در شرایط سه ارتفاع متفاوت با واگرایی و صفحات مشبک

Fig. 18. Energy dissipation at three different drop heights



شکل ۱۹. پرش V شکل بعد از شیبشکن با وجود صفحات اسکرین و واگرایی دیواره در دبیهای پایین

Fig. 19. V-shaped hydraulic jump in low discharge with screen plates and gradually expanding wall

کاهش و استهلاک انرژی ۳/۵ درصد افزایش می یابد.

۳-۵- تأثیر بکارگیری همزمان واگرایی تدریجی دیواره و صفحات مشبک بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم

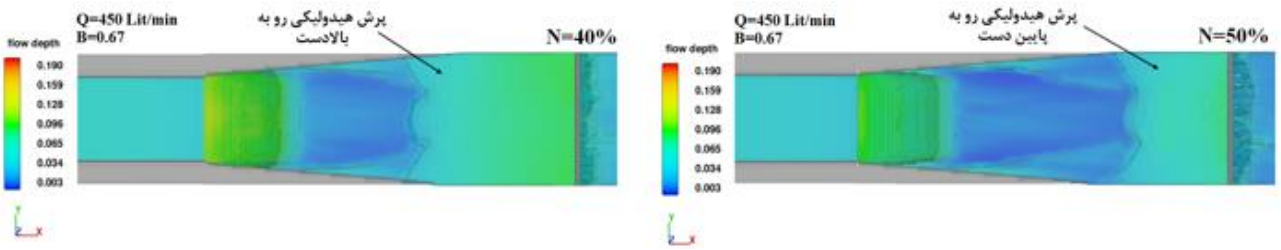
شکل ۱۶ تأثیر وجود همزمان صفحات مشبک به همراه واگرایی دیواره بر روی عمق استخر و میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از شیب شکن قائم را نشان می دهد.

استفاده همزمان از واگرایی دیواره و صفحات مشبک به دلیل ایجاد پرش هیدرولیکی و تلاطم جریان، باعث افزایش استهلاک انرژی و عمق استخر می گردد. مقایسه نسبت تخلخل صفحات مشبک با حضور دیواره های واگرا نشان می دهد که افزایش نسبت تخلخل در واگرایی دیواره ثابت، تأثیر کمی نسبت به هم در استهلاک انرژی دارد؛ ولی عمق استخر را کاهش می دهد. همچنین در نسبت تخلخل ثابت، افزایش واگرایی دیواره باعث افزایش استهلاک انرژی و عمق استخر می گردد. بکارگیری همزمان دیواره واگرا و صفحات مشبک بطور متوسط باعث افزایش ۴۶ درصد میزان استهلاک انرژی جریان در پایین دست شیب شکن قائم می‌گردد.

شکل های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب جریان عبوری از شیب شکن قائم با سه ارتفاع متفاوت با حضور واگرایی دیواره و صفحات مشبک و میزان استهلاک انرژی جریان در شرایط سه ارتفاع متفاوت را نشان می دهد.

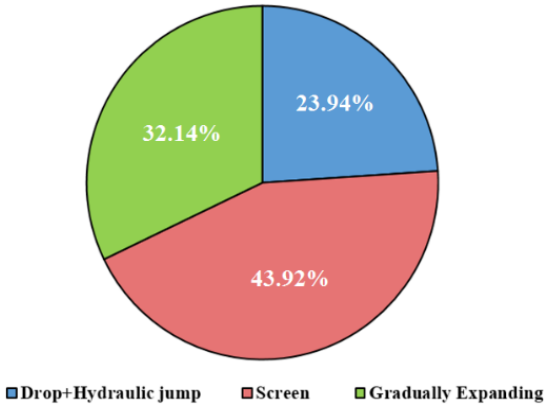
مشاهده می گردد که با افزایش ارتفاع شیب شکن تحت شرایط واگرایی تدریجی دیواره و صفحات مشبک، عمق استخر کاهش و میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد. به طوری که افزایش ارتفاع از ۱۵ به ۲۵ سانتی متر، باعث کاهش ۷/۵ درصدی عمق استخر و افزایش ۴/۵ درصدی میزان استهلاک انرژی می شود. شکل های ۱۹ و ۲۰ پرش تشکیل یافته در پایین دست شیب شکن قائم با وجود صفحات مشبک و واگرایی دیواره در دبی های مختلف را نشان می دهد.

با دقت در شکل های بالا مشاهده می شود که پرش تشکیل



شکل ۲۰. پرش ساده بعد از شیبشکن با وجود صفحات اسکرین و واگرایی دیواره در دبیهای بالا

Fig. 20. Classic hydraulic jump in high discharge with screen plates and gradually expanding wall



شکل ۲۱. میانگین سهم مشارکتی کلی هر یک از حالات مختلف در میزان استهلاک انرژی

Fig. 21. Averaged contribution percentage of different components in the energy dissipation

یافته بعد از شیب شکن با وجود صفحات اسکرین و دیواره واگرایی در دبی های پایین به صورت V شکل می باشد. دلیل این امر شدت جریان برخوردی به دیواره های کناری و توزیع غیریکنواخت سرعت و عمق در مقطع عرضی کانال به جهت وجود واگرایی می باشد. این درحالی است که با افزایش دبی، از تأثیر واگرایی دیواره بر روی نوع پرش تشکیل شده کاسته شده و پرش ایجاد شده از نوع ساده می باشد. همچنین در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد، پرش هیدرولیکی تمایل حرکت به سمت بالادست را دارد. در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۵۰ درصد، پرش هیدرولیکی به پایین دست در حال حرکت می باشد. در شکل ۲۱ سهم مشارکتی کلی هر کدام از حالات مختلف در میزان استهلاک انرژی جریان نشان داده شده است.

مشاهده می شود که سهم بکارگیری صفحات مشبک در انتهای شیب شکن قائم بیشتر از واگرایی تدریجی دیواره می باشد؛ به طوری که تقریباً ۱۲ درصد اختلاف میان این دو حالت وجود دارد. با این حال می توان گفت بکارگیری همزمان صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره باعث افزایش سهم مشارکتی تا ۳۳/۵ درصد در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از شیب شکن قائم شده و باعث کاهش هزینه احداث حوضچه های آرامش از طریق افزایش میزان استهلاک انرژی جریان می گردد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن های قائم با صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره در پایین دست آن با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداخته شد. برای شبیه سازی سطح آزاد جریان از روش جزء حجم سیال VOF و برای آشفتگی از مدل های RNG و $K-\varepsilon$ استفاده شد. نتایج بصورت خلاصه در زیر آمده است:

۱- نتایج عددی با مدل آشفتگی RNG داده های نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل آشفتگی k-ε بدست می‌دهد.

بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار $RMSE$ به ترتیب ۳/۹۹ درصد و ۰/۰۱ متر است.

۲- صحت سنجی به وسیله مقایسه عمق استخر از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی برای تمامی دبی ها انجام گردید. بیشترین درصد خطای نسبی و $RMSE$ برای مقادیر عمق استخر به ترتیب ۳/۷۸ درصد و ۰/۰۱۸ می باشد. که تطابق خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

۳- واگرایی دیواره ایجاد شده، باعث تلاطم در کناره ها و همچنین توزیع غیریکنواخت عمق در پایین دست آن می شود. ضمناً افزایش عمق های استخر و پایین دست شیب شکن باعث افزایش ۲۵ درصدی راندمان استهلاک انرژی می گردد. همچنین با افزایش نسبت y_c/P، استهلاک انرژی به دلیل استغراق جریان در پایین دست شیب شکن کاهش می یابد.

۴- با افزایش ارتفاع شیب شکن از ۱۵ به ۲۵ سانتی متر، استهلاک انرژی به دلیل شدت برخورد جت با کف، افزایش و عمق استخر کاهش می یابد، که بیشترین استهلاک انرژی مربوط به ارتفاع ۲۵ سانتی متر به میزان ۵۱/۶۰ درصد و کمترین آن برای ارتفاع ۱۵ سانتی متر به مقدار ۴۴/۲۵ درصد می باشد.

۵- ایجاد واگرایی در دیواره موجب تلاطم در کناره ها و توزیع غیریکنواخت عمق در پایین دست آن می شود و با افزایش عمق های استخر و پایین دست باعث افزایش ۲۵ درصدی استهلاک انرژی می گردد. وجود صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن باعث افزایش عمق استخر، عمق پایین دست و همچنین افزایش ۴۴ درصدی استهلاک انرژی می گردد.

۶- استفاده همزمان از واگرایی دیواره و صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن ها باعث افزایش استهلاک انرژی ۴۶ درصدی و کاهش عمق استخر و عمق پایین دست می شود.

۷- سهم مشارکتی استفاده از صفحات مشبک در مقایسه با واگرایی تدریجی دیواره بیشتر است که با بکارگیری همزمان آن ها، استهلاک انرژی تا ۳۳/۵ درصد افزایش می یابد.

۸- پرش تشکیل یافته بعد از شیب شکن با وجود صفحات اسکرین و دیواره واگرایی در دبی های پایین به صورت V شکل می‌باشد. دلیل این امر شدت جریان برخوردی به دیواره های کناری و توزیع غیریکنواخت سرعت و عمق در مقطع عرضی کانال به جهت وجود واگرایی می باشد. این درحالی است که با افزایش دبی، از تأثیر واگرایی دیواره بر روی نوع پرش تشکیل شده کاسته شده و پرش ایجاد شده از نوع ساده می باشد. همچنین در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد، پرش هیدرولیکی تمایل حرکت به سمت بالادست را دارد. در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۵۰ درصد، پرش هیدرولیکی به پایین دست در حال حرکت می باشد.

مراجع

[1] Moore, W. L., Energy loss at the base of a free overfall. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1943. 1(108), p. 1360-1343.

[2] Rajaratnam, N. and M. R. Chamani, Energy Loss at Drops. Journal of Hydraulic Research, 1995. 3(33), p. 384-373.

[3] Esen, I.I., J.M. Alhumoud, and K. A. Hannan, Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base. Water international, 2004. 4(29), p. 529-523.

[4] Chamani, M. R., N. Rajaratnam, and M.K. Beirami, Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. Journal of hydraulic engineering, 2008. 10(134), p. 1535-1532.

[5] Mansouri, R., and A.N. Ziaei, Numerical modeling of the flow in the vertical drop with inverse apron. 11th International Conference on Hydroinformatics, New York City, USA, 2014.

[6] Sadeghfam, S., A.A. Akhtari, R. Daneshfaraz, and G. Tayfur, Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2015. 2(38), p. 138-126.

[7] Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, A. Rezazadeh Joudi, Experimental investigation on the effect of screen's location on the flow's energy dissipation. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 2017. 67(17), 62-47 (in Persian). DOI: 10.22092/aridse.2017.109616

[8] Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, and A. Ghahramanzadeh, Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. Canadian Journal of Civil Engineering, 2017. 10(44), p. 859-850.

[9] Kabiri-Samani, A.R., E. Bakhshian, and M.R. Chamani,

Measurement Handbook5 ."th ed. ISCO Inc. 1998.

[18] Çakir, P. Experimental investigation of energy dissipation through screens (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey). 2003.

[19] Balkiş, G. Experimental Investigation of Energy Dissipation through Inclined Screens. (Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey), 2004.

[20] Flow Science Inc. FLOW-3D V 11.2 User's Manual. Santa Fe, NM, USA. 2016

[21] Ghaderi, A., Abbasi, S. CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. Sādhanā, 10(44), 216, 2019.

[22] Daneshfaraz, R., A. Ghahramanzadeh, A. Ghaderi, A.R. Joudi, J. Abraham, Investigation of the Effect of Edge Shape on Characteristics of Flow under Vertical Gates. Journal-American Water Works Association, 2016. 8(108): 432-425.

[23] Daneshfaraz, R., O. Minaei, J. Abraham, S. Dadashi, A. Ghaderi, 3-D Numerical simulation of water flow over a broad-crested weir with openings. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2019. 9-1.

[24] Daneshfaraz, R., and Ghaderi, A. Numerical Investigation of Inverse Curvature Ogee Spillway. Civil Engineering Journal, 11(3): 1156-1146. 2017.

[25] Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson Education. 2007.

[26] Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., and Abraham, J. Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. Applied Water Science, 1(10), pp. 12-1, 2020

[27] Nayebzadeh, B., M.A. Lotfolahi-Yaghin, and R. Daneshfaraz, Experimental study of Energy Dissipation at a Vertical Drop Equipped with Vertical Screen with Gradually Expanding at the Downstream. AUT Journal of civil engineering, 2019. (In Persian). DOI: 1022060/CEEJ.2019.16493.6265.

Flow characteristics of grid drop-type dissipators. Flow Measurement and Instrumentation, 2017. 54, p. 306-298.

[10] Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, A. Rezazadeh Joudi, Experimental Investigation of Energy Dissipation in the Sudden Choked Flow with Free Surfaces. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018. 2(48), 108-101 (in Persian).

[11] Ghaderi, A., M. Dasineh, S. Abbasi, Impact of Vertically Constricted Entrance on Hydraulic Characteristics of Vertical Drop (Numerical Investigation). Journal of Hydraulics, 2019. 4(13), p. .131-121

[12] Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, and A. Tahni, Experimental Investigation of Screen as Energy Dissipators in the Movable-Bed Channel. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2019. Doi: 10.1007/s7-00306-019-40996.

[13] Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam, V. Hasanniya, Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow. Iranian Journal of Soil and Water Research, 2019. (In Persian). DOI: 10.22059/ijswr.2019.269301.668053

[14] Norouzi, R, R. Daneshfaraz, and A. Bazyar, The Study of Energy Dissipation due to the use of Vertical Screen in the Downstream of Inclined Drops by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). AUT Journal of civil engineering. 2019. (In Persian). DOI: 10.22060/CEEJ.2019. 16694. 6305.

[15]] Sadeghfam, S. R. Daneshfaraz, R. Khatibi, O. Minaei, Experimental studies on scour of supercritical flow jets in upstream of screens and modelling scouring dimensions using artificial intelligence to combine multiple models (AIMM), Journal of Hydroinformatics, 2019.

[16] Hager, W.H. Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels. Journal of Hydraulic Research, 1985. 1(23), p. 35-21.

[17] Grant, D.M. and B.D. Dawson, Open Channel Flow

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Nayebzadeh, M.A. Lotfollahi-Yaghin, R. Daneshfaraz, Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Vertical Drops with Screens and Gradually Wall Expanding, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3221-3238.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17779.6671