

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی تأثیر تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با استفاده از مدل عددی

امیر قادری¹، مهدی دسینه² و سعید عباسی^{3*}

1- دانشجوی دکترای عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

2- کارشناس ارشد عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

3- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

* abbasi.saeed@znu.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/6/11؛ پذیرش مقاله: 97/8/21)

چکیده - شیب‌شکن‌های قائم، سازه‌هایی هستند که در کانال‌های آبیاری، زهکشی، جمع‌آوری آب‌های سطحی استفاده می‌شوند. در تحقیق حاضر به بررسی عددی اثرات تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است. در گام اول برای انتخاب بهترین مدل آشفتگی از دو نوع مدل آشفتگی جریان $k-\varepsilon$ و $RNG k-\varepsilon$ استفاده گردید. در گام بعدی از چهار آرایش تنگ‌شدگی 2 و $S/H = 0/312, 0/5, 0/875$ (نسبت فاصله‌ی تنگ‌شدگی‌ها به ارتفاع شیب‌شکن) در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی در شرایط جریان زیربحرانی استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی $RNG k-\varepsilon$ با RMSE و درصد خطای نسبی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها، کارایی بیشتری برای شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی روی شیب‌شکن‌ها داشت. بر اساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که تنگ‌شدگی قائم در بهینه‌ترین حالت در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی باعث کاهش مقادیر نسبی عمق آب استخر تشکیل شده در پای شیب‌شکن، عمق آب پایین‌دست و انرژی باقیمانده‌ی نرمال به ترتیب به مقدارهای 42/31٪، 47/23٪ و 23/59٪ می‌گردد. وجود تنگ‌شدگی قائم ورودی، باعث افزایش سرعت در لبه شیب‌شکن 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 پایین دست می‌گردد. روابطی نیز برای عمق نسبی آب استخر، عمق نسبی آب پایین دست و انرژی باقیمانده‌ی نرمال، با ضرایب همبستگی قابل قبول ارائه گردید که با نتایج سایر محققان تطابق خوبی دارد.

کلیدواژگان: شیب‌شکن، تنگ‌شدگی قائم، اتلاف انرژی، انرژی باقی‌مانده، FLOW-3D.

1- مقدمه

لازم برای کف کانال تندتر باشد، برای انتقال آب از سطح بالاتر به سطح پایین‌تر از شیب‌شکن¹ استفاده می‌کنند. جریان در بالادست شیب‌شکن‌ها می‌تواند به دو صورت زیر

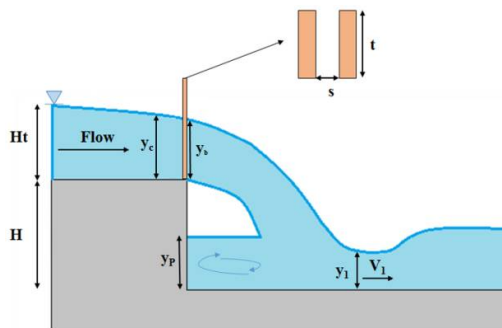
در کانال‌های باز جهت بهینه‌سازی حجم عملیات خاکی، شیب کانال با شیب طبیعی زمین متعادل می‌گردد. چنانچه در بعضی از موارد شیب طبیعی زمین از شیب

¹ Drop

افزایش می‌یابد. کاتورانی و کاشفی‌پور (1392) به بررسی تأثیر عرض‌های مختلف مانع و فاصله‌های مختلف بین ردیف‌های مانع بر میزان استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های مانع‌دار پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش همزمان عرض و فاصله، میزان استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد. مطالعات عددی بسیاری نیز در زمینه شیب‌شکن‌های قائم صورت گرفته است. Anari et al. (2013) به شبیه‌سازی جریان درون شیب‌شکن گردابه‌ای مماسی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج حاکی از تطابق داده‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. ترین و مشکاتی (1393) به بررسی عددی اثرات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم در یک کانال مستطیلی با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. نتایج شامل تعیین فاصله‌ی اثر شیب‌شکن در بالادست و پایین‌دست، نوع جریان ایجاد شده، فاصله‌ی محل پرش هیدرولیکی، عدد فرود جریان و عمق آن می‌باشد. Farouk and Elgamel (2012) به بررسی عملکرد شیب‌شکن‌ها به صورت تکی و چندتایی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش عمق آب در بالادست سبب افزایش عمق نسبی آب استخر و عمق پایین‌دست می‌گردد. Mansouri and Ziaei (2014) به ارزیابی خصوصیات هیدرولیکی جریان اطراف انواع مختلف شیب‌شکن قائم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار استهلاک انرژی مربوط به شیب‌شکن قائم با آستانه‌ی انتهایی و کمترین آن نیز مربوط به شیب‌شکن قائم ساده می‌باشد. در بیشتر تحقیق‌های صورت گرفته بر روی شیب‌شکن‌های قائم، ورودی شیب‌شکن به صورت امتدادی از کانال منظور شده است. در تحقیق حاضر فرم‌هایی از تنگ‌شدگی در ورودی شیب‌شکن پیشنهاد شده و سعی شده که به این وسیله راندمان شیب‌شکن بالاتر رود. برای این منظور به بررسی اثرات تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی با آرایش‌های مختلف بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم به صورت عددی پرداخته شده است.

بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. شیب‌شکن‌ها بخش یا مقدار قابل توجهی از انرژی بالادست را از طریق اختلاط آشفته در حوضچه تشکیل شده در پایین‌دست مستهلک می‌کنند. استهلاک انرژی در حین عبور از شیب‌شکن به دو صورت استهلاک ناشی از شکل هندسی ساختمان و استهلاک ناشی از وقوع پدیده‌ی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین‌دست رخ می‌دهد. مطالعات زیادی بر روی خصوصیات شیب‌شکن‌ها انجام شده است که از آن مورد می‌توان به تحقیق‌های انجام شده توسط Bakhmeteff (1932)، Rouse (1936)، Moore (1943)، White (1943)، Rajaratnam and Chamani, Gill (1979), Rand (1955) (1995)، Wu and Rajaratnam (1997) و Chamani and Beirami (2002) اشاره نمود. Esen et al. (2004) به مطالعه‌ی تأثیر وجود پله با ابعاد مختلف در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم پرداختند. نتایج شامل ارائه‌ی روابطی برای عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین‌دست برای حالت با و بدون پایه نیز می‌باشند. Chamani et al. (2008) با استفاده از تئوری لایه‌ی برشی و جت سطحی توسعه یافته در شیب‌شکن قائم، روابطی برای تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی جریان عبوری از شیب‌شکن قائم در رژیم جریان زیر بحرانی بیان نمودند. Hong et al. (2010) مطالعاتی در زمینه‌ی تأثیر شیب پایین‌دست بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از شیب‌شکن‌ها انجام دادند. نتایج نشان داد که طول شیب‌شکن (L_d) و نیروی برخورد (F_d) با افزایش میزان شیب در پایین‌دست شیب‌شکن افزایش یافته است. Liu et al. (2014) به بررسی اثرات شیب بالادست روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش عدد فرود و شیب بالادست، مقادیر عمق لبه، عمق آب استخر و زاویه‌ی برخورد جت کاهش و فاصله‌ی محل برخورد جت با کف افزایش می‌یابد. Kabiri-Samani et al. (2017) به مطالعه‌ی پارامترهای هیدرولیکی جریان در مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای و شباری 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

مورد توجه خاصی قرار گرفته است. نرم‌افزار FLOW-3D یک برنامه‌ی جامع دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی انواع مختلف جریان سیال و پدیده انتقال حرارت است (Flow Science, 2008).



شکل 1 شیب‌شکن قائم با تنگ‌شدگی در ورودی DVCE

این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه-بعدی غیرماندگار با هندسه‌ی پیچیده کاربرد فراوانی دارد. معادلات حاکم در این نرم‌افزار معادلات ناویر استوکس و معادله‌ی بقای جرم است (Zahabi et al., 2018). این نرم افزار برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادلات ناویر-استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. این معادلات در دستگاه مختصات کارتزین (x, y, z) به صورت روابط (4) تا (6) می‌باشند:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (7)$$

در این روابط، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی و (f_x, f_y, f_z) شتاب لزوجت در جهت‌های (x, y, z) چگالی سیال، R_{SOR} منبع جرم، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی، V_F کسری از حجم مرتبط با جریان و P فشار می‌باشند.

1-1- آنالیز ابعادی

عملکرد هیدرولیکی شیب‌شکن با تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی (DVCE) به مشخصات هیدرولیکی سیال و مشخصات هندسی شیب‌شکن طبق رابطه‌ی (1) بستگی دارد؛ از این رو می‌توان نوشت:

$$\phi(H, y_c, y_1, y_b, y_p, g, q, t, B, S) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از قضیه‌ی پی باکینگهام رابطه‌ی (2) بدست می‌آید:

$$\phi\left(\frac{y_c}{H}, \frac{y_1}{H}, \frac{y_b}{H}, \frac{y_p}{H}, \frac{q}{H\sqrt{gH}}, \frac{t}{H}, \frac{B}{H}, \frac{S}{H}\right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به این که عبارت $\frac{q}{H\sqrt{gH}}$ از لحاظ ابعادی معادل

عدد فرود می‌باشد و همچنین، از آنجایی که عبارت $\frac{t}{H}$ و $\frac{B}{H}$ در تمام شبیه‌سازی ثابت است، رابطه‌ی (2) به رابطه‌ی (3) تبدیل می‌شود:

$$\phi\left(\frac{y_c}{H}, \frac{y_1}{H}, \frac{y_p}{H}, \frac{y_b}{H}, Fr_0, \frac{S}{H}\right) = 0 \quad (3)$$

که در روابط فوق، H ارتفاع شیب‌شکن، B عرض شیب‌شکن، y_c عمق بحرانی بر روی شیب‌شکن، y_1 عمق آب پایین‌دست شیب‌شکن، y_p عمق آب استخر در پای شیب‌شکن، y_b عمق جت جریان، Fr_0 عدد فرود بالادست، t ارتفاع تنگ‌شدگی، S فاصله بین تنگ‌شدگی‌ها، q دبی در واحد عرض، g شتاب گرانش زمین می‌باشد.

با اندازه‌گیری عمق بالادست در $10y_b$ (Grant and USBR, 2001) (Dawson, 1998) مشاهده شد که در تمامی مدل‌های شبیه‌سازی شده عدد فرود در محدوده $0.64 < Fr_0 < 0.68$ می‌باشد، با توجه به محدوده کوچک عدد فرود بالادست از تأثیر این پارامتر بر روی مشخصه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن‌ها صرف‌نظر می‌شود (Kabiri-Samani et al. (2017)). شکل 1 نمایی شماتیک از شیب‌شکن با تنگ‌شدگی قائم در ورودی را نشان می‌دهد.

2- مواد و روش‌ها

1-2- معادلات حاکم

در طی سالیان اخیر، مدل‌سازی عددی در بین محققان

² Drop with Vertically Constricted Entrance (DVCE)

2-2- مدل‌سازی آشفتگی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی مشخصات جریان در شرایط جریان آشفته از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG استفاده شده است. انتخاب این مدل‌های آشفتگی در این تحقیق به دلایل متعددی بوده که می‌توان به مواردی نظیر وجود گزارش‌های مبتنی بر نتایج قابل قبول در به کارگیری آن در حل مسائل هیدرولیکی و شبیه‌سازی جریان (تقی‌زاده و صالحی نیشابوری، 1393؛ Mansouri and Ziaei, 2016).

و اعتمادپذیری مدل در حل مسائل متنوع و نیازهای محاسباتی قابل قبول در مدل‌ها اشاره نمود. مدل $k-\varepsilon$ یک مدل دو معادله‌ای است. معادله‌ی اول (رابطه‌ی 8) انرژی در آشفتگی را بیان می‌کند که انرژی جنبشی آشفته (k) نامیده می‌شود. معادله‌ی دوم (رابطه‌ی 9) استهلاک در آشفتگی (ε) است که میزان استهلاک انرژی جنبشی آشفته را تعیین می‌کند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

در به کارگیری این معادلات مقادیر ضرایب برای دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و $k-\varepsilon$ RNG به صورت جدول 1 منظور شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007).

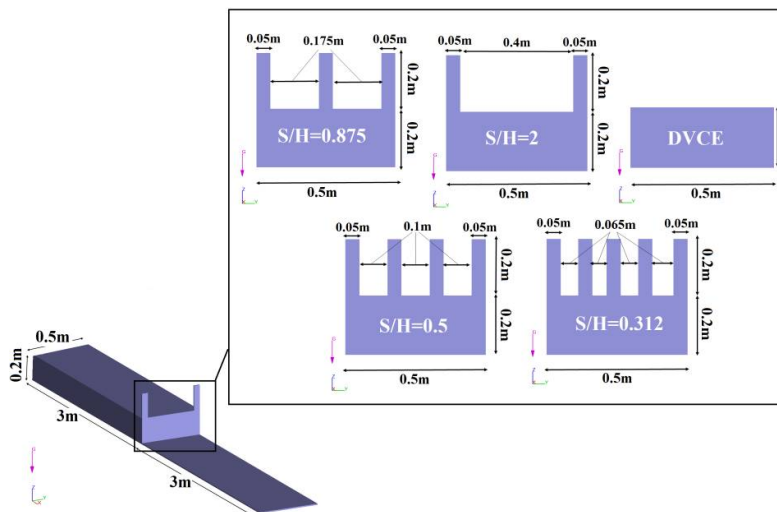
در نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده می‌شود، که در این روش با حل معادله‌ی زیر، F به عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right) = 0 \quad (10)$$

در صورتی که $F=0$ باشد سلول پر از هوا و در صورتی که $F=1$ باشد، سلول پر از آب می‌باشد سطح آزاد جایی تعیین می‌شود که در آن $F=0.5$ است.

2-3- مشخصات مدل عددی و شبکه محاسباتی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی اثرات تنگ‌شدگی‌های قائم بر روی شیب‌شکن قائم از آرایش‌های مختلف S/H (فاصله آزاد تنگ‌شدگی‌ها و H ارتفاع شیب‌شکن) استفاده گردیده است. نتایج شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد شیب‌شکن قائم بدون تنگ‌شدگی به ارتفاع cm $H=20$ و نسبت $y_c/H=0/14$ با نتایج آزمایشگاهی (2007) Lin et al. صحت‌سنجی شده است. آزمایش‌های انجام شده توسط لیون و همکاران در فلوم دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $3/06$ ، $0/50$ و $0/54$ متر با دیواره‌هایی از جنس شیشه انجام شده است. شکل 2 و جدول 2 مشخصات هندسی شیب‌شکن‌های قائم با تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی و خلاصه‌ای از شرایط هیدرولیکی جریان عبوری در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل 2 مشخصات هندسی و تنگ‌شدگی‌های قائم ایجاد شده در ورودی شیب‌شکن قائم

جدول 1 مقادیر ضرایب ثابت مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
$k-\varepsilon$	0/09	1/44	1/92	1/00	1/30
$RNG k-\varepsilon$	0/08	1/42	1/68	0/72	0/72

جدول 2 مشخصات هیدرولیکی جریان و هندسی شیب‌شکن‌های قائم با تنگ‌شدگی‌های قائم تحقیق حاضر

رژیم جریان	y_c/H	عرض شیب شکن قائم (m)	ارتفاع شیب شکن قائم (m)	عمق بحرانی (m)	عمق جریان بالادست (m)	دبی در واحد عرض ($m^3/s.m$)
زیر بحرانی	0/145	0/5	0/2	0/029	0/038	0/015
زیر بحرانی	0/215	0/5	0/2	0/043	0/059	0/028
زیر بحرانی	0/240	0/5	0/2	0/048	0/064	0/033
زیر بحرانی	0/300	0/5	0/2	0/060	0/082	0/046
زیر بحرانی	0/380	0/5	0/2	0/076	0/102	0/066
زیر بحرانی	0/420	0/5	0/2	0/084	0/109	0/076
زیر بحرانی	0/490	0/5	0/2	0/098	0/123	0/096
زیر بحرانی	0/545	0/5	0/2	0/109	0/142	0/112
زیر بحرانی	0/635	0/5	0/2	0/127	0/166	0/142
زیر بحرانی	0/700	0/5	0/2	0/140	0/183	0/164

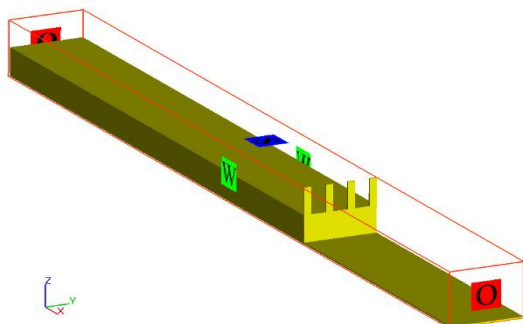
مش مناسب و بهینه انتخاب گردید. شکل 4 مقایسه‌ی نیم رخ سطح آزاد به دست آمده از مدل‌های آشفتگی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول 3 شرایط مرزی مورد استفاده در تحقیق حاضر

شرط مرزی بالایی	Symmetry
شرط مرزی ورودی	Volume flow rate
شرط مرزی خروجی	Outflow
شرط مرزی دیواره‌ها و کف	Wall

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 شبکه‌ی حل از شرایط بیرون، از شرط مرزی خروجی استفاده شده است. برای دیواره‌ها و کف کانال شرط مرزی Wall تعریف شده که همانند یک دیوار مجازی بدون اصطکاک عمل می‌کند. جدول 3 و شکل 3 نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی به مدل‌های شیب‌شکن قائم با تنگ‌شدگی‌های قائم را در فضای محیط FLOW-3D نشان می‌دهد.

در این تحقیق مدل‌های مختلفی برای انتخاب مش مناسب و بهینه، شبیه‌سازی گردیده است. البته حساسیت‌سنجی مش تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر و دارای اختلاف خطای کم بین نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام گردید. با توجه به تحلیل و آنالیز حساسیت مش انجام شده در جدول 4 و مقایسه‌ی نیم‌رخ سطح آزاد برای نسبت $y_c/H=0/14$ بر روی شیب‌شکن قائم بدون تنگ‌شدگی بدست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی با سه نوع مش محاسباتی، سرانجام تعداد



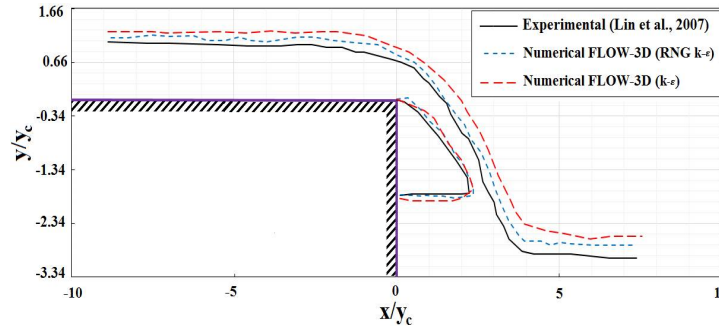
شکل 3 اعمال شرایط مرزی به مدل‌های تحقیق حاضر

جدول 4 آنالیز حساسیت مش

حالت	مدل آشفتگی	اندازه مش داخلی (cm)	اندازه مش خارجی (cm)	تعداد مش کل	*MAPE (%)	**RMSE(cm)
					$100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \right $	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp} - X_{num})^2}$
1	$k-\varepsilon$	2/75	1/47	1214258	28/26	1/48
	$RNGk-\varepsilon$	2/75	1/47	1214258	25/38	1/26
2	$k-\varepsilon$	2/36	1/24	1613849	19/87	1/09
	$RNGk-\varepsilon$	2/36	1/24	1613849	15/42	0/81
3	$k-\varepsilon$	2/05	0/89	2095412	12/19	0/49
	$RNGk-\varepsilon$	2/05	0/89	2095412	8/52	0/34

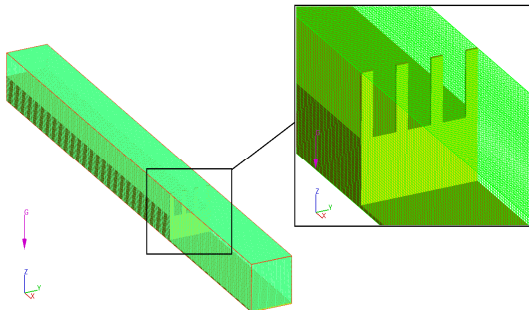
*Mean Absolute Percentage Error (درصد خطای مطلق متوسط) X_{exp} : نتایج مربوط به آزمایشگاهی، X_{num} : نتایج مربوط به عددی، n: تعداد داده‌ها

**Root Mean Square Error (خطای ریشه‌ی میانگین مربعات) X_{exp} : نتایج مربوط به آزمایشگاهی، X_{num} : نتایج مربوط به عددی، n: تعداد داده‌ها



شکل 4 مقایسه‌ی نیم‌رخ سطح آزاد به دست آمده از مدل‌های آشفتگی با داده‌های آزمایشگاهی برای نسبت $y_c/H=0/14$

در جدول 4 منظور از مش داخلی و خارجی، به ترتیب کوچکترین و بزرگترین ابعاد مش یا سلول محاسباتی است که در شبکه محاسباتی در نرم‌افزار FLOW-3D انتخاب شده است. اندازه‌ی مش بزرگتر 2/05 سانتی‌متر به تعداد 964278 و اندازه‌ی مش کوچکتر 0/89 سانتی‌متر به تعداد 1131134 می‌باشد. به طور کلی تعداد 2095412 مش با درصد خطای نسبی برابر 8/52 درصد و خطای RMSE برابر 0/34 سانتی‌متر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده شد و برای کاهش اثر شبکه‌ی محاسباتی در نتایج شبیه‌سازی، این تعداد مش برای تمامی مدل‌های تحقیق حاضر یکسان در نظر گرفته شد (شکل 5). همچنین بر اساس نتایج جدول 4 و شکل 4 این نتیجه حاصل گردید که مدل آشفتگی $RNGk-\varepsilon$ با تعداد مش بهینه، بهترین جواب را با ضریب همبستگی 0/96 ارائه می‌دهد. علت این امر توانایی مدل آشفتگی $RNGk-\varepsilon$ در



شکل 5 محدوده‌ی شبکه محاسباتی تحقیق حاضر

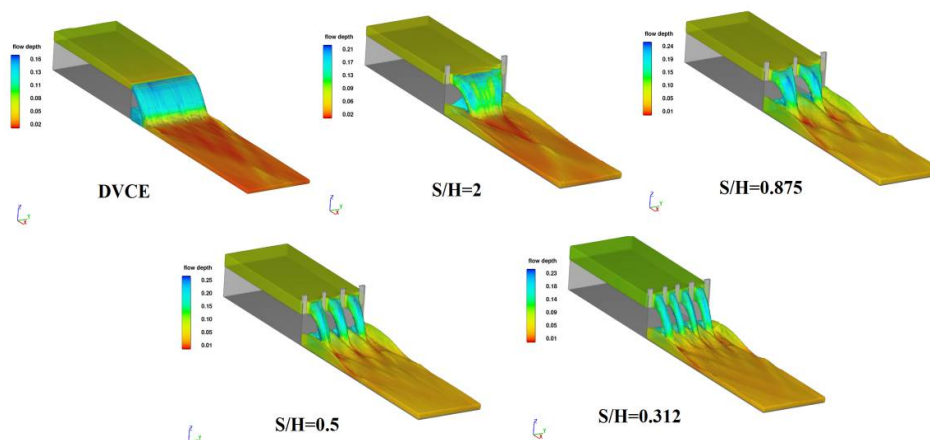
3- نتایج و بحث

3-1- نیمرخ سطح آب

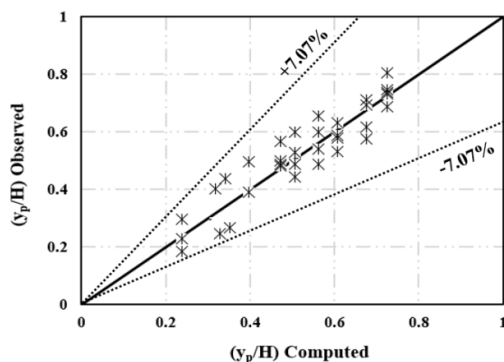
شکل 6 نشان‌دهنده‌ی نیمرخ سطح آب برای مدل‌های مختلف تنگ‌شدگی در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی می‌باشد. با توجه به شکل، زمانی که جریان آب بصورت جت آزاد از لبه شیب‌شکن پرتاب می‌شود، باعث ایجاد یک محیط دو فازی از آب و هوا در استخر پای شیب‌شکن قائم می‌گردد. این موضوع برای دبی‌های بیشتر محسوس‌تر است. با ایجاد تنگ‌شدگی‌های مختلف مشاهده می‌گردد که عمق آب استخر کاهش یافته و اختلاط با هوای بیشتری ایجاد شده است. با توجه به وجود تنگ‌شدگی، سرعت در لبه شیب‌شکن افزایش می‌یابد و در نتیجه افزایش تلاطم جریان در اثر سقوط جت‌های جریان، باعث کاهش انرژی جنبشی پایین‌دست می‌گردد.

3-2- عمق نسبی آب استخر (y_p/H)

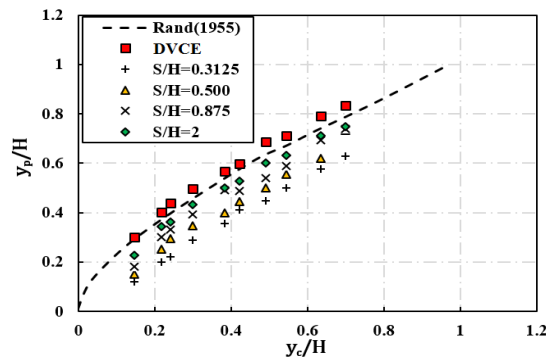
شکل 7 نشان‌دهنده‌ی تغییرات نسبی عمق آب استخر در پای شیب‌شکن به عمق بحرانی برای مدل تنگ‌شدگی‌های $S/H = 0/312, 0/5, 0/875, 2$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با افزایش y_p/H نسبت y_p/H نیز افزایش می‌یابد که نمایانگر رابطه‌ی مستقیم بین هر دو پارامتر بی‌بعد می‌باشد. این نتیجه کاملاً منطبق بر نتایج حاصل از تحقیق Rand (1955) است؛ بدین صورت که با کاهش فاصله‌ی بین تنگ‌شدگی‌ها از 2 به $0/3125$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی، نسبت y_p/H نیز کاهش می‌یابد. در این شکل بیش‌ترین کاهش مربوط به حالت بهینه‌ی $S/H = 0/312$ به دلیل فاصله‌ی کم بین تنگ‌شدگی‌ها به سبب وجود تنگ‌شدگی‌های قائم می‌باشد.



شکل 6 نیمرخ سطح آب در مدل‌های مختلف



شکل 8 تغییرات داده‌های عددی به محاسباتی



شکل 7 تغییرات y_p/H به y_c/H

رابطه‌ی (12) برای بیان رابطه‌ی بین عمق آب پایین‌دست و عمق بحرانی پیشنهاد می‌شود. شکل 10 نیز نمایانگر تغییرات داده‌های عددی به محاسباتی می‌باشد.

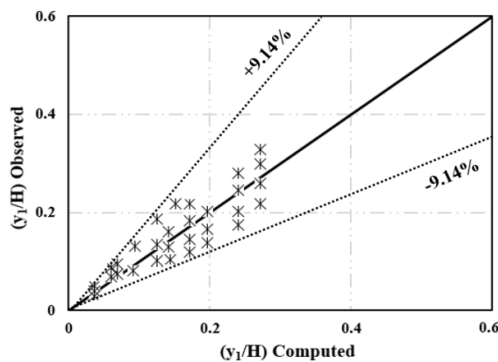
$$\frac{y_1}{H} = 0.441 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{1.224} \quad R^2 = 0.962 \quad (12)$$

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE با توجه به قانون 70 به 30 حاکم بر رابطه (12) به ترتیب برابر 9/14 % و 0/047 است که حاکی از تطابق خوب بین داده‌های عددی و محاسباتی می‌باشد.

3-4- انرژی باقیمانده نرمال¹ (E_1/H_{max})

ایجاد تنگ‌شدگی با آرایش‌های مختلف منجر به افزایش سرعت در لبه شیب‌شکن و تبدیل جریان عبوری از شیب شکن به تعدادی جت ریزشی شده و سبب افزایش اختلاط و آشفته‌گی جریان و کاهش انرژی جنبشی می‌گردد.

در شکل 11 مشاهده می‌گردد که در اثر اختلاط و آشفته‌گی ایجاد شده حاصل از جریان ریزشی تقسیم شده و پخش شدن آنها در پای کف شیب‌شکن، افت انرژی جریان در اثر تنگ‌شدگی در پایین‌دست شیب‌شکن نسبت به حالت بدون تنگ‌شدگی افزایش چشمگیری داشته و در نتیجه جریان با انرژی جنبشی کمتری به حوضچه آرامش پایین‌دست شیب‌شکن انتقال پیدا می‌کند. همچنین می‌توان گفت در این ناحیه اختلاط آب و هوا به شدت افزایش یافته است. شکل 12 نشان‌دهنده تغییرات E_1/H_{max} به y_c/H برای مدل تنگ‌شدگی‌های 2 و 0/875، 0/5، 0/312، $S/H=$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی می‌باشد.



شکل 10 تغییرات داده‌های عددی به محاسباتی

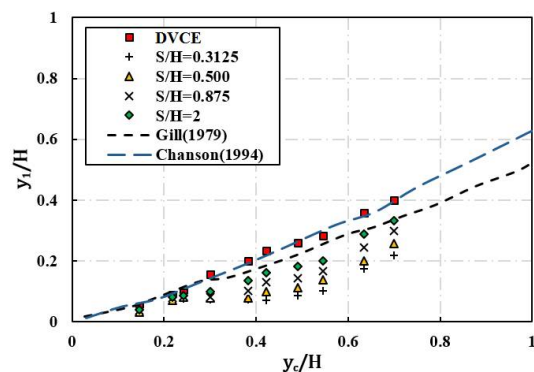
درصد کاهش y_p/H برای حالت $S/H= 0/312$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی برای مقادیر عمق نسبی بحرانی 0/14، 0/30 و 0/70 به ترتیب برابر 60/48%، 41/97% و 24/49% می‌باشد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته رابطه‌ی (11) برای بیان رابطه‌ی بین عمق آب استخر در پای شیب‌شکن و عمق بحرانی پیشنهاد می‌گردد. شکل 8 نمایانگر تغییرات داده‌های عددی به محاسباتی می‌باشد.

$$\frac{y_p}{H} = 0.919 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{0.786} \quad R^2 = 0.971 \quad (11)$$

درصد خطای نسبی و خطای RMSE بر اساس قانون 70 به 30 حاکم بر رابطه‌ی 11 که در آن با 70 درصد داده‌ها، توان و ضریب مربوطه استخراج و با 30 درصد باقیمانده به صحت‌سنجی رابطه پرداخته می‌شود، به ترتیب برابر 7/07 % و 0/021 است که حاکی از تطابق بین داده‌های عددی حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D و داده‌های محاسباتی می‌باشد.

3-3- عمق نسبی آب پایین‌دست (y_1/H)

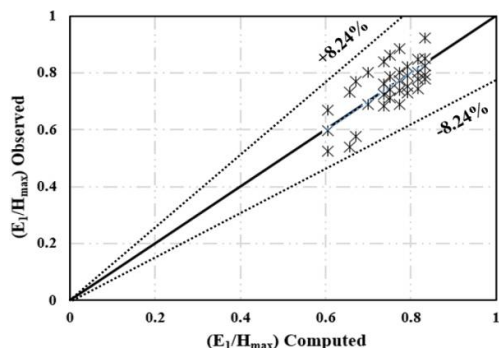
شکل 9 نشان‌دهنده تغییرات نسبی عمق آب پایین‌دست به عمق بحرانی در مدل تنگ‌شدگی‌ها مختلف می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با افزایش y_c/H ، پارامتر y_1/H نیز افزایش می‌یابد، که منطبق با نتایج بدست آمده توسط Gill (1979) و Chanson (1994) می‌باشد. نسبت $0/312$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی بیشترین کاهش را در نسبت y_1/H دارا می‌باشد به طوریکه برای y_c/H با مقادیر 0/14، 0/30 و 0/70 به ترتیب برابر 43/20 %، 52/84 % و 45/64 % است.



شکل 9 تغییرات y_1/H به y_c/H

¹ Normalized Residual Energy

$$\frac{E_1}{H_{max}} = 0.884 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{0.192} \quad R^2 = 0.966 \quad (13)$$



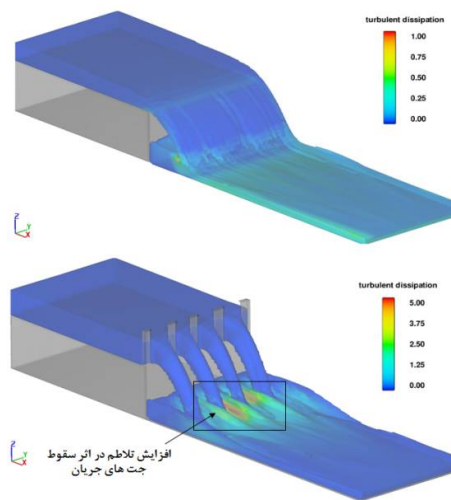
شکل 13 تغییرات داده‌های عددی به محاسباتی

درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE با توجه به قانون 70 به 30 حاکم بر رابطه (13) به ترتیب برابر 8/24% و 0/046 است که حاکی از تطابق بین داده‌های عددی و محاسباتی می‌باشد.

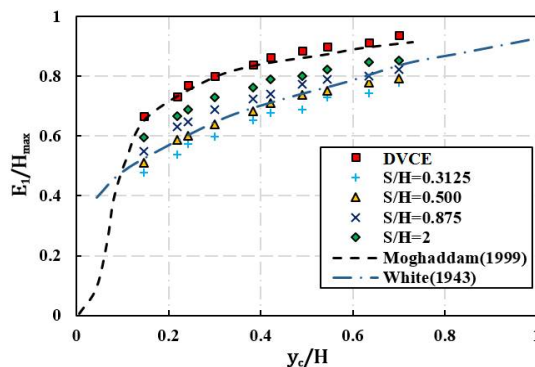
4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عددی اثرات تنگ‌شدگی‌های قائم بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم در شرایط جریان زیربحرانی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است. در این تحقیق از چهار آرایش تنگ‌شدگی 2 و 0/875، 0/5، 0/312، S/H (نسبت فاصله تنگ‌شدگی به ارتفاع شیب‌شکن) در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی استفاده گردید که خلاصه‌ی نتایج آن به شرح زیر است:

- ایجاد تنگ‌شدگی ورودی باعث تقسیم شدن جریان عبوری از شیب‌شکن به تعدادی جت ریزشی می‌شود که این امر باعث ایجاد اختلاط و آشفتگی حاصل از این جت‌ها در پای کف شیب‌شکن شده و به استهلاك انرژی بیشتر جریان کمک شایانی می‌کند.
- مقادیر نسبی عمق آب استخر در پای شیب‌شکن، عمق آب پایین‌دست و انرژی باقیمانده نرمال با ایجاد تنگ‌شدگی کمتر از حالت بدون تنگ‌شدگی است.
- مقادیر v_p/H ، v_i/H و E_1/H_{max} با افزایش y_c/H ، افزایش می‌یابد که نمایانگر رابطه‌ی مستقیم بین پارامترها است.
- از بین آرایش‌های تنگ‌شدگی $S/H = 0/312, 0/5,$



شکل 11 افزایش تلاطم و استهلاك بیشتر انرژی جریان در اثر ایجاد تنگ‌شدگی



شکل 12 تغییرات E_1/H_{max} به y_c/H

در شکل 12، $E_1 = y_1 + v_1^2/2g$ انرژی باقیمانده در پایین‌دست و $H_{max} = 1.5y_c + H$ انرژی در مقطع بالادست است. با توجه به شکل یاد شده، با افزایش y_c/H نسبت بی‌بعد E_1/H_{max} نیز افزایش پیدا می‌کند که منطبق بر نتایج بدست آمده توسط Moghaddam (1999) و White (1943) می‌باشد. بیشترین درصد کاهش مربوط به حالت بهینه $S/H = 0/312$ در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی می‌باشد که برای y_c/H با مقادیر 0/14، 0/30 و 0/70 به ترتیب برابر 28/49%، 25/22% و 17/08% است. رابطه‌ی (13) رابطه‌ی پیشنهادی تحقیق حاضر برای بیان ارتباط بین E_1/H_{max} و y_c/H است. شکل 13 تغییرات داده‌های مدل عددی به محاسباتی را نشان می‌دهد.

6- منابع

ترین، س.ع.، و مشکاتی، س.م.ه. (1393). "شبیه‌سازی عددی اثرات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم در یک کانال مستطیلی". دو فصلنامه علمی تخصصی مهندسی آب، (3)، 1، صص. 55-66.

تقی‌زاده، ح.، و صالحی نیشابوری، ع.ا. (1393). "بررسی عددی الگوی رفتاری جریان روی سرریزهای سه جانبی"، مجله پژوهش آب ایران، (8)، 14، صص. 211-215.

کاتورانی، س.، و کاشفی‌پور، س.م. (1392). "اثر مشخصات هندسی مانع و شیب کف دراپ روی شرایط هیدرولیکی جریان در دراپ‌های مانع‌دار"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، (2)، 37، صص. 51-59.

Bakhmeteff, M.W. (1932). "Hydraulics of open channels". New York and London, McGraw-Hill book company, Inc.

Chamani, M., and Beirami, M. K. (2002). "Flow characteristics at drops". Journal of Hydraulic Engineering, 128(8), 788-791.

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

Chanson, H. (1994). "Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways". Australian Civil Engineering Transactions, IEAust, 36(1), 69-76.

Daneshfaraz, R., Joudi, A. R., Ghahramanzadeh, A., and Ghaderi, A. (2016). "Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway", Advances and Applications in Fluid Mechanics, 19(4), 811.

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

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

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

0/875 و 2 بیشترین مقدار کاهش درصد عمق آب استخر در پای شیب‌شکن، عمق آب پایین‌دست و انرژی باقیمانده نرمال در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی مربوط به آرایش $S/H = 0/312$ است که در بین مدل‌های بررسی شده، بهینه‌ترین حالت می‌باشد.

– مقادیر متوسط کاهش درصد عمق آب استخر در پای شیب‌شکن، عمق آب پایین‌دست و انرژی باقیمانده نرمال در آرایش $S/H = 0/312$ نسبت به حالت بدون تنگ‌شدگی به ترتیب برابر $42/31\%$ ، $47/23\%$ و $23/59\%$ می‌باشد.

– نیمرخ سطح آب در آرایش‌های $S/H = 0/312$ ، $0/5$ ، $0/875$ و 2 در مقایسه با حالت بدون تنگ‌شدگی دارای جریان گردابی با عمق کمتر و تلاطم جریان بیشتر و در نهایت اختلاط با هوای بیشتر به دلیل ایجاد فاصله لب به لب مختلف تنگ‌شدگی‌ها و همچنین کاهش انرژی جنبشی می‌باشد.

– سه رابطه برای محاسبه عمق نسبی آب استخر در پای شیب‌شکن، عمق نسبی آب پایین‌دست و انرژی باقیمانده نرمال با ضرایب همبستگی قابل قبول پیشنهاد شد و میزان همبستگی روابط پیشنهادی با نتایج مدل عددی بررسی گردید.

5- فهرست علائم

B	عرض شیب‌شکن
Fr_0	عدد فرود بالادست
g	شتاب گرانش زمین
H	ارتفاع شیب‌شکن
H_{max}	انرژی باقیمانده در پایین‌دست
q	دبی در واحد عرض
S	فاصله بین تنگ‌شدگی‌ها
t	ارتفاع تنگ‌شدگی
y_l	عمق آب پایین‌دست شیب‌شکن
y_b	عمق جت جریان
y_c	عمق بحرانی بر روی شیب‌شکن
y_p	عمق آب استخر در پای شیب‌شکن

- Mansouri, R., and Ziaei, A.N. (2014). "Numerical modeling of the flow in the vertical drop with inverse apron". 11th International Conference on Hydroinformatics, New York City, USA.
- Rouse, H. (1936). "Discharge characteristics of the free overfall: Use of crest section as a control provides easy means of measuring discharge". *Civil Engineering*, 6(4), 257-260.
- Rand, W. (1955). "Flow geometry at straight drop spillways". In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13.
- Rajaratnam, N. and Chamani, M. R. (1995). "Energy Loss at Drops". *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- Simsek, O., Akoz, M.S. and Soydan, N.G. (2016). "Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir", *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, Vol. 16, No. 6, pp. 364-378.
- USBR. (2001). "Water Measurement Manual". 3rd ed., US Government Printing Office Washington DC.
- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (2007). "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method". Pearson Education.
- White, M.P. (1943). "Discussion of Moore (1943)". *ASCE*, 108, 1361-1364.
- Wu, S. and Rajaratnam, N. (1997). "Impinging Jet and Surface Flow Regimes at Drops". *Journal of Hydraulic Engineering*, 36(1), 69-74.
- Zahabi, H., Torabi, M., Alamatian, E., Bahiraei, M., and Goodarzi, M. (2018). "Effects of Geometry and Hydraulic Characteristics of Shallow Reservoirs on Sediment Entrapment". *Water*, 10(12), 1725.
- 529.
- Farouk, M., and Elgamal, M. (2012). "Investigation of the performance of single and multi-drop hydraulic structures". *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2(1), 48-74.
- Gill, M. A. (1979). "Hydraulics of Rectangular Vertical Drop Structures". *Journal of Hydraulic Research*, 17(4), 289-302.
- Grant, D.M. and Dawson, B.D. (1998). "Open Channel Flow Measurement Handbook." 5th ed. ISCO Inc.
- Hong, Y. M., Huang, H. S., and Wan, S. (2010). "Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway". *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129.
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., and Chamani, M. R. (2017). "Flow characteristics of grid drop-type dissipators". *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- Liu, S. I., Chen, J. Y., Hong, Y. M., Huang, H. S., and Raikar, R. V. (2014). "Impact Characteristics of Free Over-Fall in Pool Zone with Upstream Bed Slope". *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 476-486.
- Lin, C., Hwang, W. Y., Hsieh, S. C., and Chang, K. A. (2007). "Experimental study on mean velocity characteristics of flow over vertical drop". *Journal of Hydraulic Research*, 45(1), 33-42.
- Moore, W. L. (1943). "Energy loss at the base of a free overfall". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), 1343-1360.
- Moghaddam, M.A.A. (1999). "Modified theory for rectangular vertical drop structures". Unpublished report.