



مدل سازی عددی الگوی جریان و بررسی پارامترهای هیدرولیکی در شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب

رامین منصوری^۱، علی نقی ضیائی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

ramin_mansouri@yahoo.com

an_ziaei@yahoo.com

خلاصه

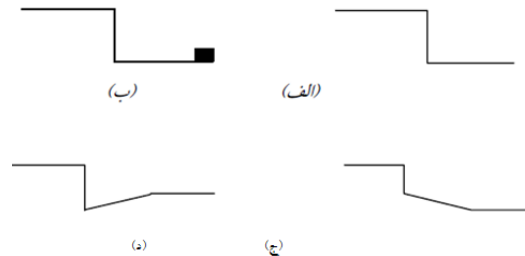
خصوصیات هیدرولیکی جریان گردابه از جمله افت انرژی، عمق مرده در پشت جت نقش بسزایی در طراحی هیدرولیکی شیب شکن قائم ایفا می کنند. در این تحقیق الگوی جریان در داخل شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب (vertical drop with sloping aprons) به صورت دو بعدی با استفاده از نرم افزار Fluent که معادلات جریان را به روش حجم محدود حل می نماید، شبیه سازی گردید. در این نرم افزار، روش حجم سیال (volume of fluid) جهت مدل سازی سطح آزاد به کار گرفته شد. میدان محاسباتی با استفاده از شبکه بندی منشوری منظم (structured grid) گسسته گردید. ابتدا برای یک دبی صحت سنجی نتایج و استقلال حل از شبکه تحقیق شده و بهترین شبکه با 52745 گره که دارای تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی بود انتخاب شد. از این شبکه سپس برای مدل سازی جریان با دبی های دیگری استفاده گردید. مدل آرام و برخی از مدل های مختلف آشفتگی موجود در نرم افزار مورد استفاده قرار گرفت که صحت سنجی مدلها نشان داد عمق پایاب و عمق مرده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد به علت اینکه لزجت گردابه ای را در محاسبات دخالت میدهد تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. سپس با استفاده از نتایج عددی افت انرژی حاصل از وجود شیب شکن قائم مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

کلمات کلیدی: شیب شکن قائم، الگوی جریان، روش حجم محدود، مدل آشفتگی، عمق پایاب، عمق مرده، Fluent

۱. مقدمه

شیب شکن ها سازه هایی هستند که در کانالهای آبیاری، شبکه های جمع آوری آب و فاضلاب و شبکه های جمع آوری آبهای سطحی مورد استفاده فراوان قرار می گیرند و از جمله سازه های هیدرولیکی هستند که برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به پایین تر و استهلاک انرژی اضافی با استفاده از برخورد و تلاطم، به منظور اعمال یک سرعت بهینه در کانالها و شبکه های آبیاری و زهکشی به کار میروند. در کانالهای آبیاری پس از طرح و محاسبه ابعاد و مشخصات کانال، اگر شیب طبیعی زمین در قسمتهایی از مسیر زیاد و تندتر از شیب مجاز کانال باشد و مخارج خاکریزی و خاک کوبی در مقایسه با ایجاد پله های سقوط (آبشار) زیادتر باشد، از شیب شکن استفاده می نمایند. هیدرولیک شیب شکن قائم به این صورت است که جریان فوق بحرانی یا زیر بحرانی با عبور از روی شیب شکن به داخل حوضچه پایین دست ریزش میکند و وجود شیب شکن باعث خواهد شد تا انرژی مخرب آب به سه صورت، اختلاط جریان با هوا، برخورد جریان با کف کانال پایین دست و چرخش آب در حوضچه گردابی از بین رود.

شیب شکن ها از نظر شکل هندسی به سه دسته شیب شکن قائم، شیب شکن مایل و شیب شکن لوله ای تقسیم می شوند. شیب شکن های قائم از نظر شکل هندسی شامل چهار دسته ساده، مانع دار، با شیب مثبت در پایاب و با شیب معکوس در پایاب می باشند. (شکل ۱)



شکل ۱. انواع شیب شکن از نظر شکل هندسی؛ (الف) شیب شکن قائم ساده (ب) شیب شکن قائم با مانع در پایاب (ج) شیب شکن قائم با شیب کف مثبت در پایاب (د) شیب شکن قائم با شیب معکوس در پایاب

تحقیقات در مورد خصوصیات هیدرولیکی شیب شکن قائم با جریان زیر بحرانی و کف افقی در پایین دست برای اولین بار توسط بخمیتف (1932) شروع گردید. از آن پس تحقیقات زیادی بر روی شیب شکن قائم صورت گرفت که می توان این تحقیقات را به چند دسته کلی تقسیم کرد. یکی از این دسته ها تحقیق در مورد اعماق (عمق حوضچه، عمق ریزش و عمق پایین دست) و افت انرژی در شیب شکن می باشد. از اینرو مور (1943) با انجام آزمایشاتی و اندازه گیری خصوصیات جریان در شیب شکن با جریان زیر بحرانی نشان داد که افت انرژی به عمق آب در پشت جت (عمق مرده) بستگی دارد. در ادامه وایت (1943) با در نظر گرفتن فرضیاتی از جمله شبیه سازی مدل جریان با مدل جت آزاد، یک مدل تحلیلی پیشنهاد داد. رند (1955) در مطالعات آزمایشگاهی خود، عبارت بدون بعدی را به عنوان عدد شیب شکن تعریف نموده و بقیه پارامترها را تابعی از آن در نظر گرفت و خصوصیات جریان را بر اساس عدد شیب شکن $(D = (d_c/h)^3)$ ارائه کرد. در ادامه گیل (1979) برای ارائه یک فرمول تجربی آزمایشاتی را صورت داد و با لحاظ کردن عمق گرداب، روابط وایت را تصحیح نمود. چانسون (۱۹۹۴) با استفاده از معادله مومنتم و با استفاده از معادله خط سیر جت آمعادلاتی برای اعماق مورد نظر ارائه داد راجاراتنام و چمنی (1995) با استفاده از داده های آزمایشگاهی، روشی تحلیلی- تجربی برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی جریان زیر بحرانی ارائه نمودند. چمنی و دهقانی (۲۰۰۵) نیز شیب شکن قائم با کف معکوس در پایاب و جریان زیر بحرانی در بالادست را مطالعه کرده و پارامترهایی مانند عمق مرده، عمق پایین دست و افت انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. مطالعات ایشان نشان داد که عمق مرده در حالت شیب شکن شیب دار بیشتر از شیب شکن ساده و نیز عمق پایاب برای پایین دست شیب دار نیز اندکی بزرگتر می باشد. همچنین افت انرژی با افزایش شیب از صفر به ۵ درجه افزایش پیدا می کند. راجاراتنام و چمنی (۲۰۰۸) افت انرژی در شیب شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست بر مبنای یکسان بودن جت آشفته با جریان بر روی شیب شکن اندازه گیری کردند. لذا عمده مطالعات پیشین بر روی مدل سازی آزمایشگاهی و بدست آوردن روابط تجربی برای افت انرژی متمرکز بوده اند همچنین مدل سازی آزمایشگاهی علاوه بر هزینه بر بودن از مشکلاتی نظیر انتقال نتایج به پروتوتایپ (prototype) نیز رنج می برد لذا در این مطالعه مدل سازی عددی جریان آب در اطراف این سازه مورد بررسی قرار می گیرد که دارای هزینه اندک و اعمال هر گونه تغییر در ابعاد سازه براحتی امکان پذیر است. جریان آب پیرامون این سازه را می توان دو بعدی فرض نمود. لذا در این تحقیق خصوصیات هیدرولیکی در شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب با شبیه سازی جریان در نرم افزار Fluent نتایج حاصل شده با نتایج آزمایشگاهی چمنی و همکاران (۲۰۰۵) مقایسه شده است.

در این تحقیق شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب از نظر خصوصیات هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق نتایج چمنی و همکاران (۲۰۰۵) در شیب شکن قائم با شیب معکوس در کف با جریان زیر بحرانی می باشد. که این اندازه گیری ها در کانالی به طول ۱۱ متر و عرض ۰.۴۰۱ متر با امکان هوادهی در پشت جت بر روی شیب شکن با ارتفاع ۲۱ سانتی متر و شیب کف پایین دست ۵ درجه صورت گرفته است.

در بررسی تحلیلی جریان آب در سازه شیب شکن قائم با فرض جریان یک بعدی و سرعت متوسط در مقاطع مختلف، با استفاده از قوانین بقای جرم، انرژی و اندازه حرکت معادلات لازم استخراج می گردد. چمنی و دهقانی (۲۰۰۵) نیز تحقیقاتی را بر روی شیب شکن قائم با کف معکوس در پایاب و جریان زیر بحرانی در بالادست انجام داده اند و پارامترهایی مانند عمق مرده، عمق پایین دست و افت انرژی را مورد ارزیابی قرار داده اند و به این نتیجه دست یافته اند که عمق مرده در حالت شیب شکن شیب دار بیشتر از شیب شکن ساده و نیز عمق پایاب برای پایین دست شیب دار نیز اندکی بزرگتر می باشد و همچنین افت انرژی با افزایش شیب از صفر به ۵ درجه افزایش پیدا می کند. معادلات زیر حاصل تحقیق چمنی و دهقانی (۲۰۰۵) بر روی شیب شکن قائم با شیب معکوس در پایاب می باشد.

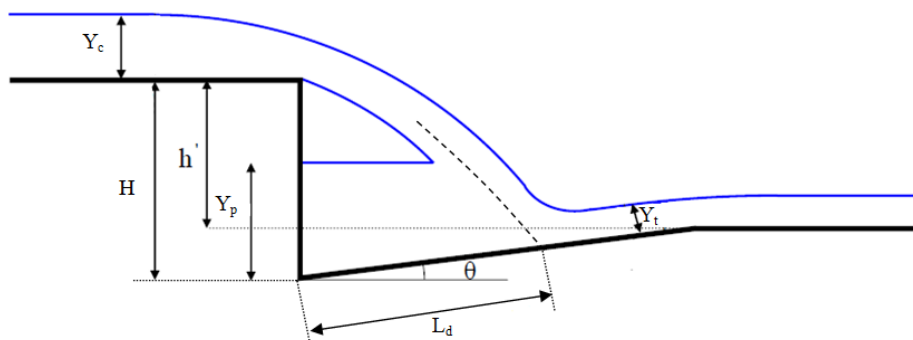
$$\frac{Y_t}{h'} = 0.516 \left(\frac{Y_c}{h'} \right)^{1.184} \theta^{0.045} \quad (1)$$

$$\frac{Y_p}{h} = 0.89 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.765}$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \dots$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 0.173 \left(\frac{Y_c}{h'} \right)^{0.602}$$

در معادلات بالا ارتفاع شیب شکن H ، ارتفاع آستانه انتهایی h ، ارتفاع آب در محل ریزش Y_b ، عمق بحرانی Y_c ، سرعت بحرانی V_c ، عمق و سرعت پایین دست به ترتیب Y_t و V_t ، سرعت برخورد جت V_i ، عمق گرداب Y_p ، طول حوضچه L و محل برخورد جت L_d پارامترهای بالا در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی شماتیک از شیب شکن قائم با شیب معکوس در پایاب

داده های آزمایشات (جدول ۱) توسط چمنی و دهقانی بر روی شیب شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست و با کف شیب دار در پایین دست کانال (شکل ۲) اندازه گیری شده است، استفاده گردیده است. خصوصیات جریان از جمله عمق پایاب (Y_t) و عمق مرده پشت جت (Y_p) و افت انرژی (ΔE)

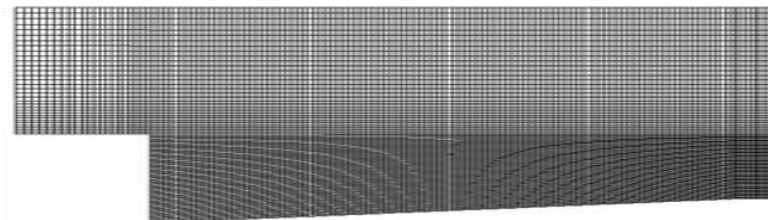
بر روی شیب شکن به ارتفاع ۲۱ سانتی متر در کانال آزمایشگاهی با امکان هوادهی در پشت جت با شیب ۵ درجه اندازه گیری شده است. جدول ۱ جزئیات این آزمایشات در حالات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج آزمایشگاهی شیب شکن قائم با کف شیب دار در پایاب (H=21cm)

H(m)	θ	h'(m)	Q(l/s)	Y_t/h'	Y_p/h'	$Y_t(m)$	$Y_p(m)$
			10/6	0/14	0/57	0/021	0/087
			12/4	0/14	0/64	0/021	0/098
0/21	5	0/153	17/8	0/18	0/75	0/027	0/115
			23/2	0/22	0/84	0/034	0/128
			30/4	0/27	0/96	0/041	0/147

۳. مدل سازی عددی

مدلسازی عددی جریان شامل حل عددی معادلات ناویراستوکس و معادله پیوستگی که بعنوان معادلات جریان غیرقابل تراکم شناخته می‌شوند، می‌باشد. در تحقیق حاضر جهت شبیه سازی رایانه ای از نرم افزار FLUENT استفاده می‌گردد. برای حل عددی لازم است که میدان جریان گسسته گردیده که در این تحقیق میدان محاسباتی با استفاده از شبکه بندی منشوری منظم (Structured Grid) با استفاده از نرم افزار Gambit گسسته گردید. شکل ۳ شبکه مورد استفاده شده در این مدل سازی را نشان می‌دهد. روش حجم سیال (Volume Of Fluid) (Geo- Reconstruct) جهت مدل سازی سطح آزاد به کار گرفته شد.



شکل ۳. شبکه بندی های برای شیب شکن قائم با شیب معکوس در پایاب

در مدل عددی از طرح گسسته سازی معادله فشار به روش PRESTO استفاده شده و با توجه به اینکه جریان بصورت غیر ماندگار مدلسازی می‌گردد از الگوریتم کوپل کننده فشار-سرعت PISO که برای جریان های گذرا (غیر ماندگار) توصیه شده، استفاده می‌گردد. به منظور مدل سازی تنش رینولدز از مدل های آشفتگی استفاده می‌شود. در این تحقیق مدل های آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ (Standard)، $k-\omega$ (Realizable)، $k-\epsilon$ (RNG) و مدل آشفتگی ۵ معادله ای Reynolds Stress Model (RSM) مورد استفاده قرار گرفته است.

۴. شرایط مرزی

در مرز ورودی شرط سرعت ورودی (Velocity Inlet)، در مرز فوقانی (قسمت فوقانی فاز هوا) و همچنین در محل خروجی فلووم شرط مرزی فشار خروجی، و برای قسمت مجرای ورودی هوا شرط مرزی Inlet Vent به برنامه معرفی گردیده است. که سرعت جریان ورودی بر اساس دبی مورد نظر با در نظر گرفتن عمق بحرانی اعمال گردیده است. در مورد بستر و دیواره ها از شرط مرزی غیر لغزشی استفاده شد. به منظور بررسی اثر دیواره ها در مدل های

تلاطم، دو نوع تابع $\text{Standard Wall Function}$ و $\text{Non-Equilibrium Wall Function}$ برای یک دبی مورد بررسی قرار گرفت. تابع دیوار استاندارد ($\text{Standard Wall Function}$) نتایج بهتری را نسبت به دیگر تابع دیواره ارائه کرد از اینرو این تابع دیواره برای مدل سازی انتخاب شد

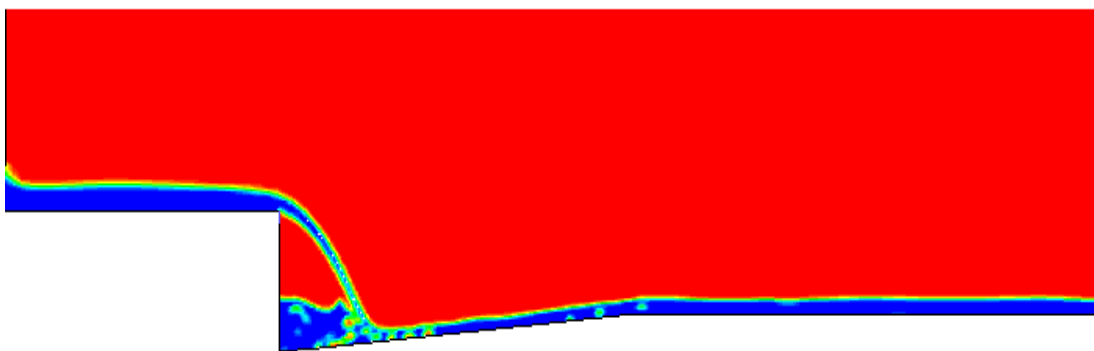
۵. نتایج و بحث

در مرحله نخست برای یک دبی با استفاده از چهار شبکه محاسباتی مختلف (۵۷۵۱۲، ۳۲۷۲۹، ۱۸۹۰۱، ۷۹۰۸) صحت سنجی نتایج و استقلال حل از شبکه تحقیق شده و ریزترین شبکه با ۵۷۵۱۲ گره که دارای تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی بود انتخاب شد. از این شبکه سپس برای مدل سازی جریان با دبی های دیگر استفاده گردید.

در مدل سازی عددی برای کاهش زمان محاسبات معمولاً قسمتی از طول کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته می شود که در این پژوهش با توجه به مدل سازی در طول های مختلف کانال مشخص گردید که طول بیش از $1/5$ متر تاثیری در نتایج مدل سازی نداشته و در این طول جریان بطور کامل توسعه پیدا می کند. در کلیه مقایسه ها مقادیر بدست آمده برای دو عمق (Y_p, Y_t) مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه با استفاده از ریزترین شبکه که دارای نوسانات کمتر و تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشت دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای یک دبی مورد بررسی قرار گرفت. که با بررسی نتایج تفاوت محسوسی مشاهده نگردید و در ادامه از روش آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ که کاربرد بیشتری در شبیه سازی جریان سیال غیرقابل تراکم دارد استفاده گردید. در ادامه نتایج شبیه سازی از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ سه حالت $k-\epsilon$ (Standard)، $k-\epsilon$ (RNG)، $k-\epsilon$ (Realizable) نشان داد که عمق پایاب و عمق مرده در سه مدل تفاوت چندانی با همدیگر نداشته و تقریباً به یک مقدار ثابت همگرا می گردند. که از بین مدل های بالا مدل $k-\epsilon$ (Standard) برای دیگر دبی ها به علت کاربرد بیشتر در مسائل شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

از دیگر بررسی صورت گرفته در این تحقیق می توان به بررسی اثر دیواره ها (Wall Function) اشاره کرد که دو حالت Standard و Non-Equilibrium مورد تحقیق قرار گرفته و نتایج حاصل نشان دهنده این است که در حالت $\text{Standard Wall Function}$ عمق پایاب نسبت به دیگر حالات، مقادیر کمتری را ارائه می دهد که نزدیکی بیشتری به نتایج آزمایشگاهی دارد. در نتیجه در ادامه روند شبیه سازی از این تابع برای دیگر دبی ها استفاده گردید. در شکل ۴ نتایج حاصل از مدل در ریزترین شبکه (۵۷۵۱۲ گره)، طول ۳ متری حوضچه و مدل $k-\epsilon$ (Standard) به همراه تابع دیواره استاندارد نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از مدل سازی این نوع سازه با شرایط نهایی در جدول ۲ به صورت خلاصه ارائه گردیده است.



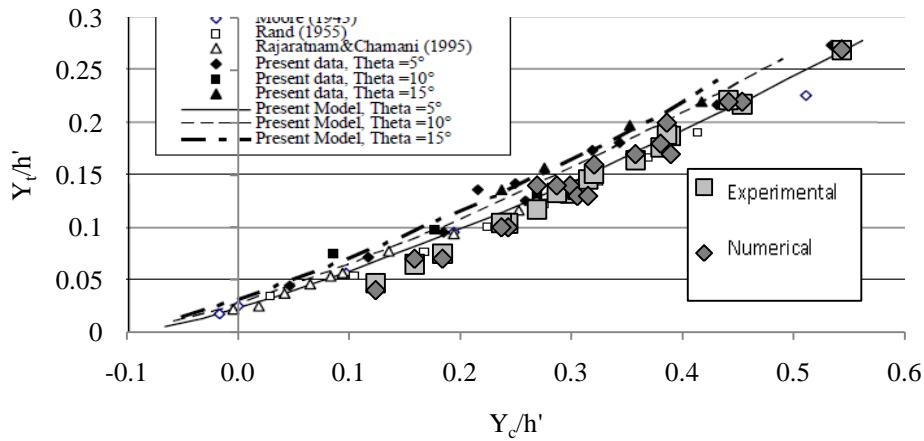
شکل ۴. الگوی جریان در شبیه سازی توسط نرم افزار فلوئنت

جدول ۲. نتایج عددی شیب شکن قائم با کف شیب دار در پایاب

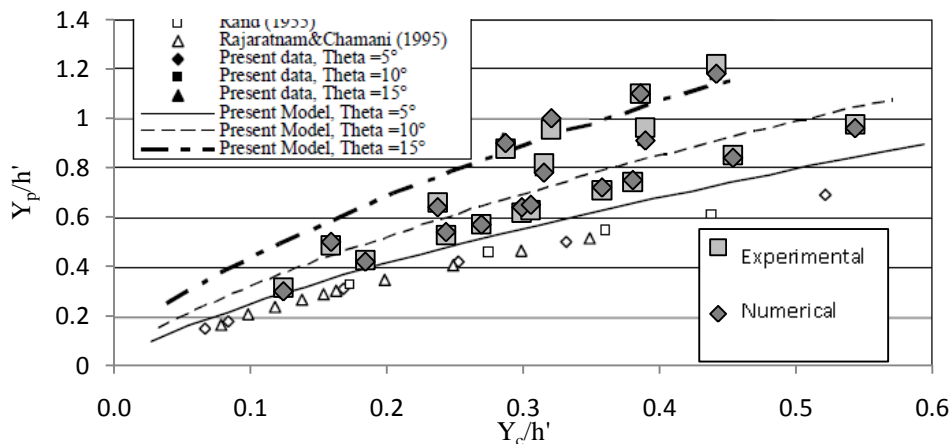
H(m)	θ	h'(m)	Q(l/s)	Y_t/h'	Y_p/h'	Y_t/H	Y_p/H	Y_t (m)	Y_p (m)
			10/6	0/140	0/578	0/102	0/421	0/021	0/088
			12/4	0/143	0/639	0/104	0/466	0/021	0/098
0/21	5	0/153	17/8	0/182	0/753	0/132	0/548	0/028	0/115
			23/2	3	0/842	0/162	0/614	0/034	0/129
			30.4	0.291	0/959	0/212	0/699	0/044	0/147

برای مقایسه اعماق حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی اعماق Y_t و Y_p این مقادیر در مقابل مقادیر نرمال شده Y/H و Y/h' رسم گردیده و

بر گراف های ارائه شده در تحقیقات گذشته منطبق گردیده است (شکل های ۴ و ۵). نتایج حاکی از صحت نتایج عددی تولید شده می باشد.

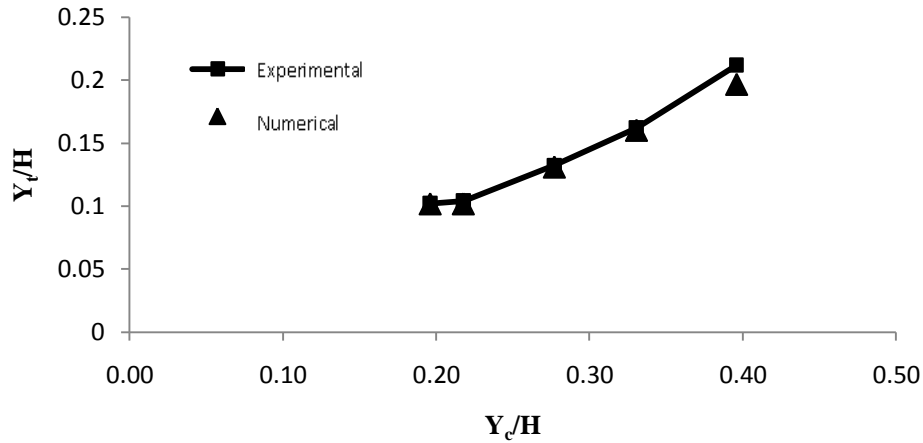


شکل ۴. تغییرات Y_t/h' نسبت به Y_c/h'

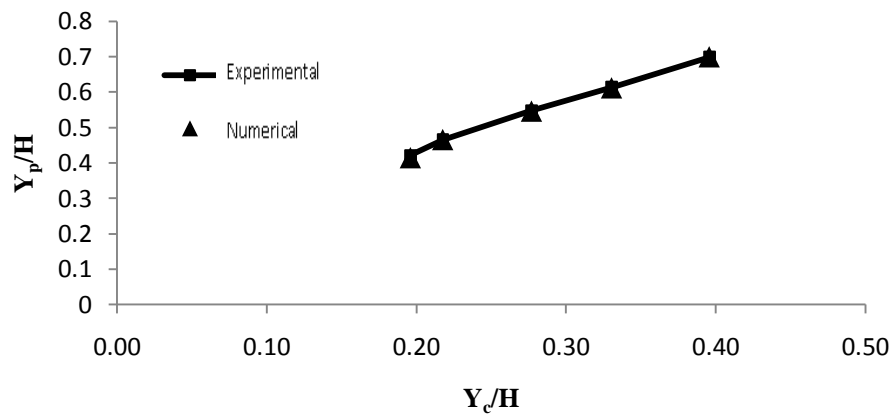


شکل ۵. تغییرات Y_p/h' نسبت به Y_c/h'

در بررسی اعماق بی بعد نسبت به ارتفاع شیب شکن نیز تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی مشاهده گردید. از اینرو می توان نتیجه گرفت مدل انتخاب شده برای مدل کردن اعماق در این سازه مدل مناسبی می باشد. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب مقایسه نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی عمق پایین دست و عمق پشت جت ریزشی را نشان میدهد.

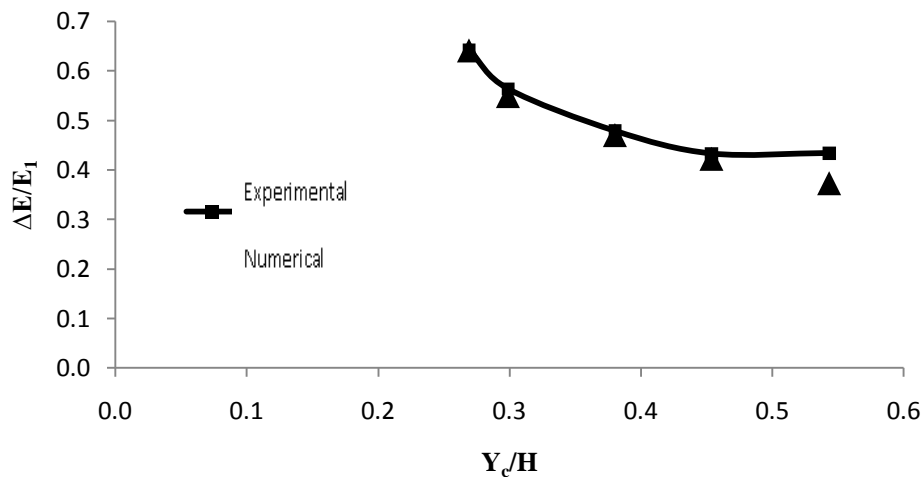


شکل ۶. تغییرات Y_p/H نسبت به Y_c/H



شکل ۷. تغییرات Y_p/H نسبت به Y_c/H

در بررسی افت انرژی نیز بین نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی مشاهده می گردد. که استفاده درست از مدل آشفتنه دو معادله ای $k-\epsilon$ (Standard) در این مدل سازی را تصدیق می کند.



شکل ۸. افت انرژی در شیب شکن قائم با کف شیب دار پایاب

۶. نتیجه گیری

در بررسی عمق پایاب و عمق پشت جت ریزشی استفاده از مدل $k-\epsilon$ (Standard) به دلیل شبیه سازی گردابه های ایجاد شده در قسمت پشت جت نتایج بسیار خوبی با که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند را ارائه می کند. از اینرو با توجه به اینکه اعماق به خوبی مدل شده اند در نتیجه افت انرژی نیز در این سازه با مدل بالا به خوبی شبیه سازی می شود.

۷. منابع

- ۱ - منصور، ر. ضیائی، ع.ن. (۱۳۹۰). " شبیه سازی عددی دو بعدی الگوی جریان در شیب شکن قائم با در نظر گرفتن شرایط مرزی و شبکه بندی مختلف " ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، اردیبهشت.
- 2- Bakhmeteff, B. A. (1932). *Hydraulics of open channels*, McGraw-Hill, New York.
- 3- Chamani, M. R., Beirami, M. K., and Mohammadi, R. A. (2000). "Analysis of subcritical flow at vertical drops." *Proc., 5th Int. Conf. on Civil Engineering*, Mashhad, Iran, May 9–11, Univ. of Mashhad, 300–307.
- 4- Ead, S. A., and Rajaratnam, N. (2001). "Plane turbulent surface jets in shallow tailwater." *J. Fluids Eng.*, 123_3_, 121–127.
- 5- Gill, M. A. (1979). "Hydraulics of rectangular vertical drop structures." *J. Hydraulic Res.*, 17_4_, 289–302.
- 6- Moore, W. L. (1943). "Energy loss at the base of free overfall." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108, 1343–1360.
- 7- Rajaratnam, N., and Chamani, M. R. (1995). "Energy loss at drops." *J. Hydraulic Res.*, 33_3_, 373–384.
- 8- Rand, W. (1955). "Flow geometry at straight drop spillways." *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 81_791_, 1–13.
- 9- White, M. P. (1943). "Discussion of 'Moore_1943_'." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108, 1361–1364.
- 10- Rajaratnam, N., and Chamani, M. R. (1995). "Energy loss at drops." *J. Hydraulic Res.*, 33_3_, 373–384
- 11- Chamani, M. R., Rajaratnam, N. And Beirami, M. K. (2008). "Turbulent Jet Energy Dissipation at Vertical Drops" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 10, October 1, 2008.
- 12- Fluent Manual, (2005). Manual and user guide of Fluent Software, Fluent Inc.,