

مدلسازی عددی افت انرژی در تندآب با موانع مکعبی

مصطفی میرزایی‌جشنی^۱، منوچهر فتحی‌مقدم^{۲*}، احمد فتحی^۲، اصغر اکبری^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴

چکیده

در این تحقیق افت انرژی تندآب با موانع مستغرق مکعبی مورد بررسی قرار گرفت. از مزیت‌های این روش بر روش‌های قبلی مانند سرریز پلکانی، خطر کاویتاسیون کمتر آن می‌باشد. برای تحلیل عددی از روش حجم محدود نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. در این تحقیق جریان از نوع دائمی و اغتشاشی و سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق $k-\varepsilon(RNG)$ می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت افت انرژی در مدل‌های شاهد بین ۱۱ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا ۶۶ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۵ متغیر است. نتایج مقایسه افت در مدل‌های با بستر دارای موانع در همه مدل‌ها روند خطی نزولی را نشان می‌دهد. بطور کلی، مقدار نسبی افت انرژی در شیب ۱ به ۴ دارای بیشترین و در شیب ۱ به ۵ دارای کمترین مقدار می‌باشد. به اضافه، افت انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست از ۸۳ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا مقدار ۴۵ درصد در مدل با موانع مکعبی و شیب ۱ به ۸ متغیر است. همچنین در مدل‌های با موانع بستر میزان افت انرژی از ۱۸ تا ۴۱ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش داشته است. همچنین با استفاده از رگرسیون چند متغیره روابطی برای پیش‌بینی افت انرژی استخراج شد.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، تندآب، شبیه‌سازی عددی، موانع مستغرق، Fluent.

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره تماس: ۰۹۱۷۸۶۷۴۹۷۹، پست الکترونیکی: mostafamj9094@gmail.com

^{۲*}استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره تماس: ۰۹۱۶۱۱۳۵۱۷۱، پست الکترونیکی: fathi49@gmail.com (نویسنده مسئول)

^۳استادیار گروه سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره تماس: ۰۹۱۶۱۱۳۸۲۹۲، پست الکترونیکی: fathiahmad2000@yahoo.com

^۴دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره تماس: ۰۹۳۳۸۳۳۲۱۶۰، پست الکترونیکی: a.akbari94347@gmail.com

مقدمه

به طور کلی هنگامی که آب از بالای هر نوع سرریزی به پایین سرازیر شود، مقدار زیادی از انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل خواهد شد. چنین جریانی دارای قدرت تخریب کننده قابل توجهی می باشد که ممکن است به سازه هیدرولیکی مورد نظر آسیب جدی وارد نماید. جهت ممانعت از آثار تخریبی جریان با سرعت های خیلی زیاد از روی سرریزها، از سازه های مستهلک کننده انرژی استفاده می شود. در این میان تندآب ها از جمله متداول ترین ساختمان های انتقال آب در سدها، شبکه های آبیاری و زهکشی، آبراهه های آبرفتی و سیستم های جمع آوری، تصفیه و دفع فاضلاب می باشند. پایین دست این ابنیه ها از سازه های مستهلک کننده انرژی استفاده می شود. از جمله روش های کاهش ابعاد و یا حذف سازه های مستهلک کننده انرژی پایین دست بکار بردن روش هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تندآب ها می باشد. از جمله ای این روش ها که تاکنون استفاده شده است ایجاد پله در طول سرریز است. به کار بردن مانع یا زبری در بستر سرریز روش دیگری است که می تواند استفاده شود. تندآب مانع دار از نوع تلف کننده انرژی ضربه ای است که کاربرد زیادی در شبکه های زهکشی روباز و در جاهایی که سطح آب پایین دست نوسانات زیادی دارد، به کار می رود. اهمیت این نوع از مستهلک کننده انرژی در مواردی که سطح آب پایاب نوسان زیاد داشته، مشهودتر است (طراحی سازه های کانال کوچک، ۱۹۸۷).

در واقع ردیف های ضربدری بلوک های مانع دار روی تندآب، فارغ از ارتفاع شیب شکن از شتاب گیری بیش از حد جریان جلوگیری کرده و یک سرعت نهایی قابل قبولی را فراهم می آورد. مشکلی که در استفاده از بلوک وجود دارد هزینه بسیار زیاد ساخت و ریسک بالای کاویتاسیون است. از این رو این روش با محدودیت زیادی همراه است.

داس^۱ و همکاران (۲۰۱۴) آزمایش هایی با شیب های مختلف و میزان زاویه انقباض متفاوت به منظور بررسی میزان افت انرژی و بدست آوردن رابطه ای میان

پارامترهای شیب و زاویه انقباض انجام دادند. نتایج حاصل از کار آن ها نشان داد که با افزایش شیب، میزان استهلاک انرژی افزایش و با افزایش زاویه انقباض میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد.

رون^۲ (۱۹۷۱) در مطالعه ای به بررسی اجرایی بودن تندآب مانع دار به عنوان تلف کننده انرژی پرداخت و نشان داد ساختار و هندسه مواع می تواند مقدار دبی طراحی را کنترل نماید.

اورتال^۳ (۲۰۱۱) سرایشی های با تخت سنگ های ردیفی عرضی را مورد مطالعه قرار داد. در نتایج بدست آمده رژیم جریان بر روی تخت سنگ ها مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی شکل گیری جریان بر روی شیب و تخت سنگ ها و مقایسه ارتفاع آب به ارتفاع تخت سنگ ها رژیم جریان عبوری به سه نوع رژیم جریان حوضچه ای، موج و کانالی تقسیم بندی شد. هم چنین با مدل سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه نیروی درگ روابطی ارائه شد.

ذوالفقار احمد و همکاران^۴ (۲۰۰۹) با انجام آزمایش هایی به بررسی اثر نیم کره های برآمده بر افت انرژی بر روی شیب های سنگی با آرایش های مختلف پرداختند. نتایج آن ها نشان می دهد که مقدار افت انرژی در بستر زبر بیشتر از بستر صاف می باشد. همچنین مقدار افت انرژی با افزایش تراکم اندازه ی آن ها افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش می یابد.

رحمانشاهی و شفاعی بجستان (۱۳۹۱) تأثیر اندازه زبری بستر تنداب بر میزان افت انرژی جنبشی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش های آن ها بر روی مدل های فیزیکی در ۳ شیب مختلف با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه های متفاوت و دانه بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آن ها انجام شد. نتایج آزمایش های انجام شده نشان می دهند که با وجود زبری بستر تند آب، میزان افت انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می یابد. همچنین نتایج حاوی این مطلب است.

² Rhone³ Oertel⁴ Zulfequar Ahmad et al.¹ Das

بعدی Fluent استفاده شده است. نرم افزار Fluent قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارا می باشد معادلات حاکم بر حرکت سیال

عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم، که برای جریان آشفته تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می شود.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij} \quad (2)$$

در معادلات فوق u_i مولفه سرعت در جهت x_i ، P فشار کل، ρ چگالی سیال، g_i شتاب ثقل در جهت x_i ، S_{ij} تانسور تنش بوده که برای جریان آشفته به صورت معادله (۳) بیان می شود:

$$S_{ij} = \left[\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

تنش برشی در جریانهای آشفته شامل دو ترم بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مؤلفه متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مؤلفه های نوسانی سرعت ایجاد می شود که به تنش های رینولدز معروف بوده و توسط رابطه (۴) بیان می شود.

$$S_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

در معادلات فوق v_t لزجت گردابه ای است که تابع خصوصیات جریان و آشفتگی است. برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه ای استفاده می شود. انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم توسط رابطه (۵) بیان می شود.

پاگلیارا و چیواوچینی^۱ (۲۰۰۶) با استفاده از کره های فلزی که با پوشش آلومینیمی احاطه شده بودند، به بررسی اثر تخته سنگ های برآمده بر مقاومت جریان در بستر شیب های سنگی^۲ پرداختند. در آزمایشات آنها نحوه ی قرار گیری این کره ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بودند. بر اساس نتایج پاگلیارا و چیواوچینی این کره ها سبب پایداری بیشتر شیب های سنگی می شوند، زیرا این عمل به آشفتگی جریان دامن زده و از تنش برشی وارد شده بر مواد بستر می کاهد. نتایج آنها نشان می دهد که در صورت وجود کره های فلزی پوشیده شده با آلومینیم، عمق جریان نسبت به سطح صاف بیشتر می شود. نتایج پاگلیارا و چیواوچینی نشان دادند، که تاثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد ۰/۳۲ بی-تأثیر است. ولی در شیب های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریعی پیدا می کند.

پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر روی افت انرژی در حوضچه پایین دست یک تندآب سنگی که حوضچه آن دارای بستر متحرک می باشد، پرداختند. آزمایشات آنها در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی در شیب های مختلف تندآب و اندازه های مختلف مصالح بستر کانال انجام شد و روند استهلاک انرژی و همچنین آبستگي حوضچه آرامش با بستر متحرک بررسی گردید.

هدف تحقیق حاضر شبیه سازی عددی تأثیر موانع مکعبی مستغرق بستر تندآب بر میزان افت انرژی سازه می باشد. در این تحقیق، به طور خاص هدف این است که آیا موانع می تواند انرژی جنبشی را به طور مؤثری کاهش دهد و از ابعاد حوضچه آرامش پایین دست بکاهد و یا خیر، و اگر جواب مثبت است در چه شیب هایی و با چه میزانی؟

۲- مواد و روش ها

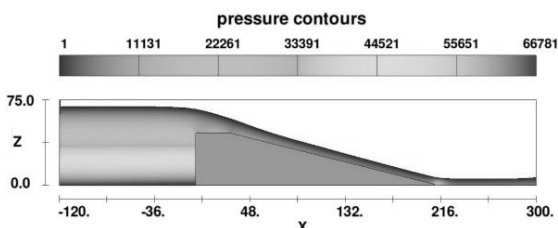
۲-۱ معرفی مدل Fluent و معادلات حاکم

در این تحقیق برای تحلیل عددی از نرم افزار سه

¹ Pagliara and Chiavaccini

² Block Ramp

تحقیقات پیشین، همخوانی خوب مدل با جریان‌های چرخشی و انحنا دار و جریان‌های با کرنش‌های بزرگ می‌باشد. تعیین پروفیل سطح آزاد به کمک مدل VOF انجام گرفته است. مدل VOF بر این فرض استوار است که دو سیال در هم نفوذ نمی‌کنند، به هر فاز سیال متغیری نسبت داده می‌شود که نشان می‌دهد چند درصد از سلول محاسباتی توسط آن فاز اشغال شده است، این متغیر کسر حجمی نامیده می‌شود. در مدل Fluent مش‌بندی با استفاده از المان‌های مکعبی و هرمی انجام می‌شود. شرایط مرزی مدل شامل مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیوار و سطح آزاد جریان می‌باشد. در شرط مرزی ورودی از سرعت استفاده شده است، شرط مرزی خروجی مدل Specific pressure، شرط مرزی سطح آزاد Symmetry و برای دیوار از شرط مرزی Wall استفاده شده است. همچنین جهت همگرایی مسئله از روش همگرایی RMS (ریشه متوسط جذر باقیمانده‌ها) استفاده شده است.



شکل ۱- مدل اجرا شده در محیط نرم افزار

۳-۲ مشخصات مدل فیزیکی

در این تحقیق در ابتدا با توجه به یک مدل آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه شهید چمران اهواز، مدل عددی کالیبره شده و سپس اثر متغیرهای مختلف این تحقیق از جمله شیب تندآب و نسبت استغراق نسبی موانع بررسی می‌شود (رشیدی آوندی و فتحی، ۱۳۹۵). آزمایشات در فلومی به عرض ۳۰ سانتی متر، ارتفاع ۸۰ در ابتدا و ۴۰ سانتی متر در قسمت انتهایی و طول ۷ متر انجام شد. تندآب از جنس پلگسی گلاس بوده و دارای سرریز لبه پهن ورودی به طول ۳۰ سانتی متر می‌باشد. در این تحقیق در مجموع ۸۰ اجرای نرم‌افزاری گرفته شد (۴۰ اجرا برای مدل

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u_i^2} + \overline{u_j^2} + \overline{u_k^2} \right) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

به منظور حل میدان جریان آشفته بر اساس معادلات پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش‌های رینولدز در معادلات به روش خاصی مدل شوند. در این شرایط برای یک جریان سه بعدی با چهار معادله (پیوستگی و حرکت در سه بعد)، چهار مجهول (سرعت در سه جهت عمود و فشار) بدست خواهند آمد. برای حاکم کردن سیستم معادلات فوق از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود (رودی، ۱۹۷۹).

۲-۲ مدل آشفتگی (RNG) $k-\varepsilon$

مدل آشفتگی (RNG) $k-\varepsilon$ که نخستین بار توسط (Yakhot et al, ۱۹۹۲) ارائه شده است. روابط (۷) و (۸) روابط مربوط به k و ε را در این مدل آشفتگی نشان می‌دهند.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{\tau_e} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

G_k و G_b ترم‌های چشمه‌ی معادله‌ی k می‌باشند که همانند مدل استاندارد تعیین می‌شوند. α_k و α_ε عکس عدد پراوتل برای معادلات k و ε هستند. مقدار μ_{eff} از طریق انتگرال‌گیری از معادله‌ی دیفرانسیلی زیر بدست می‌آید این مورد امکان شبیه‌سازی دقیق در اعداد رینولدز کم و جریان نزدیک دیواره را فراهم می‌آورد. در شکل (۱) مدل اجرا شده در محیط نرم‌افزار نمایش داده شده است.

در این تحقیق جریان از نوع دائمی و اغتشاشی و سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق (RNG) $k-\varepsilon$ می‌باشد. دلیل استفاده از این مدل علاوه بر توصیه‌های

که در آن q دبی در واحد عرض، $\Delta E/E_0$ افت نسبی انرژی، H ارتفاع تندآب، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل، θ زاویه بستر تندآب با افق و σ کشش سطحی می‌باشد.

با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش Π باکینگهام رابطه کلی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{H}, Re, W, \theta\right) \quad (10)$$

در این رابطه $Re = \rho v R / \mu$ عدد رینولدز بالادست و $W = \rho v^2 l / \sigma$ عدد وبر می‌باشد. مطابق شکل (۴) و پارامترهای مشخصه روی آن، میزان افت انرژی نسبی جریان از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در این تحقیق به علت ماهیت آشفته جریان از عدد رینولدز Re صرف‌نظر شده و همچنین چون ارتفاع جریان روی سرریز بیشتر از ۵ سانتی متر است، از عدد وبر W نیز صرف‌نظر شد (چاو، ۱۹۵۹).

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \left(\frac{E_0 - E_1}{E_0}\right) \quad (11)$$

در این رابطه ΔE_r افت نسبی انرژی جریان، E_0 انرژی کل جریان در بالادست و E_1 انرژی کل پای تندآب می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کالیبراسیون مدل ریاضی

مطابق شکل (۵) مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل ریاضی با دقت قابل‌قبولی توانایی مدلسازی این نوع تندآب را دارد. برای مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی از تندآب با موانع مکعبی با دو شیب ۱ به ۴ و ۱ به ۸ استفاده شده است. به طور متوسط مقدار خطای آزمایشگاهی و عددی حدود ۲/۸۸ درصد می‌باشد.

تندآب با بستر صاف و ۴۰ اجرا برای مدل تندآب با بستر با موانع مکعبی). در شکل (۲) و (۳) مدل آزمایشگاهی و نحوه‌ی چیدمان موانع روی بستر تندآب نمایش داده شده است.

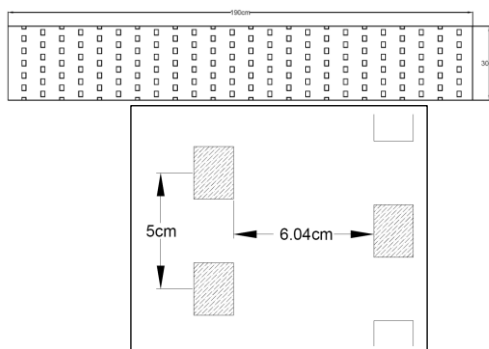


شکل ۲- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق (آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز)

۲-۴ آنالیز ابعادی

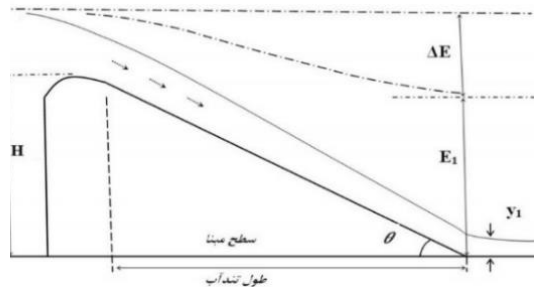
به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در افت انرژی مؤثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه (۹) ارائه شده‌اند:

$$f\left(q, \frac{\Delta E}{E_0}, H, \mu, \rho, g, \theta, \sigma\right) = 0 \quad (9)$$

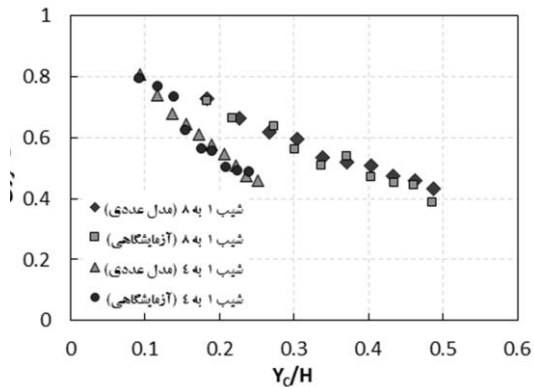


شکل ۳- چیدمان موانع روی تندآب با موانع مکعبی مستغرق

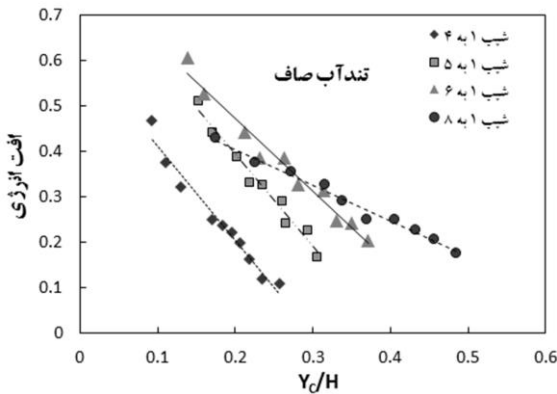
می‌یابد. در شکل (۷) این تحقیق در تندآب با موانع بستر با افزایش Y_C ($Y_C = (q^2/g)^{1/3}$) در واقع دبی افزایش می‌یابد، بنابراین، در یک شیب خاص با افزایش Y_C/H (دبی)، نیروی درگ کل (عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی) کم شده و در نتیجه افت انرژی کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین در همه مدل‌ها همان‌طور که بدیهی است در تندآب با وجود موانع مقدار افت انرژی بیشتر از تندآب صاف بوده و مقدار این افت محسوس می‌باشد. در شکل (۸) افت انرژی در مدل‌های با موانع مکعبی در شیب‌های ۱ به ۴ تا ۱ به ۸ با هم مقایسه شده‌اند. مطابق شکل در این مدل‌ها شیب ۱ به ۸ به طور کلی دارای بیشترین افت می‌باشد و همچنین نرخ کاهش افت در مدل با شیب کمتر، کمتر است.



شکل ۴- معرفی تندآب و اجزا آن



شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در دو مدل با موانع مکعبی



شکل ۶- مقایسه افت انرژی در مدل‌های صاف با شیب مختلف

۲-۳ بررسی افت انرژی

مطابق شکل (۶) افت انرژی در همه‌ی شیب‌ها با افزایش نسبت Y_C/H دارای روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد. همچنین با کاهش شیب بستر تندآب، روند کاهش افت انرژی با نرخ کمتری اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی می‌توان گفت افت انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست در محدوده دبی‌های این تحقیق تا ۶۶ درصد در دبی‌های پایین افزایش می‌یابد.

در شکل (۷) مقدار افت انرژی در مقابل نسبت Y_C/H در مدل‌های صاف و مدل‌های با مانع ترسیم شده است. مطابق نتایج در همه مدل‌ها روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد و همچنین نرخ کاهش به‌صورت تقریباً خطی می‌باشد. مطابق تئوری لایه‌مرزی و همچنین مباحث پیرامون نقطه جدایی جریان اطراف ذره در میدان سرعت، هر چه سرعت و به دنبال آن عدد رینولدز بیشتر شود نقطه جدایی روی سطح ذره دیرتر اتفاق می‌افتد، بنابراین منطقه جداسازی تشکیل شده کوچک‌تر شده و در نتیجه نیروی درگ فشاری کاهش

۳-۳ استخراج رابطه‌ای جهت پیش‌بینی افت انرژی

در ادامه با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد مؤثر استخراج شده بر روی مقدار افت نسبی انرژی و ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد و در نهایت روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب برای تندآب صاف و بامانع پس از تحلیل‌های متعدد استخراج گردید.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = 175.48 - 175.56 \times \left(\frac{Y_C}{H}\right)^{0.002} - 219.33 \times (\tan\theta)^{4.78} \Rightarrow R^2 = 0.96 \quad (12)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = -0.115 + EXP(-12.255(\frac{Y_c}{H}) + 0.854) \quad (13)$$

نیز دارای دقت قابل قبولی می باشد.

که در آنها مقدار افت نسبی انرژی، Y_c/H نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سرریز و θ زاویه بستر تندآب با افق می باشد. مقدار RMSE و MAPE روابط (۱۲) و (۱۳) با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) استخراج گردید و در جدول (۱) ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_m)_i - (h_s)_i]^2} \quad (14)$$

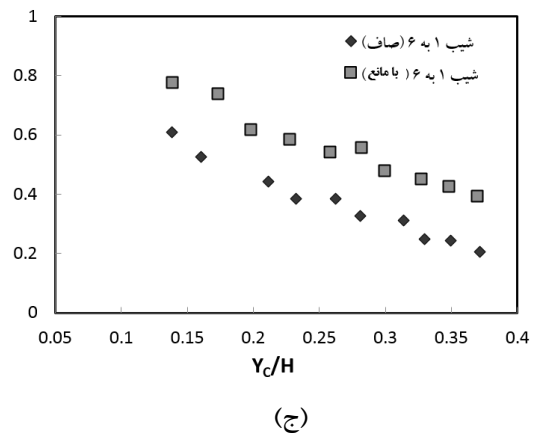
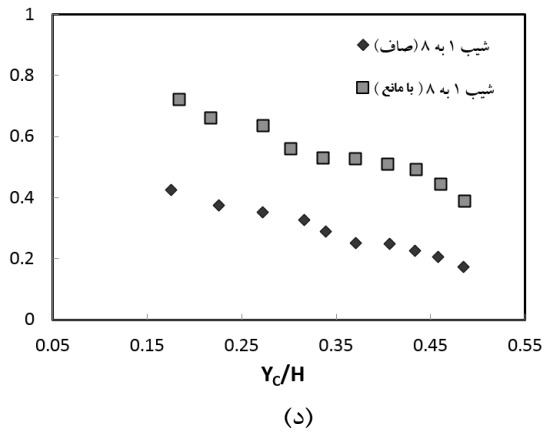
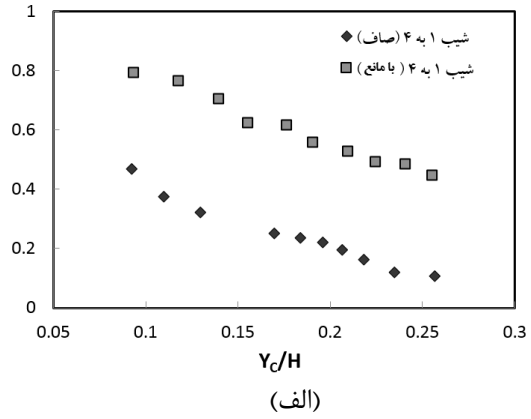
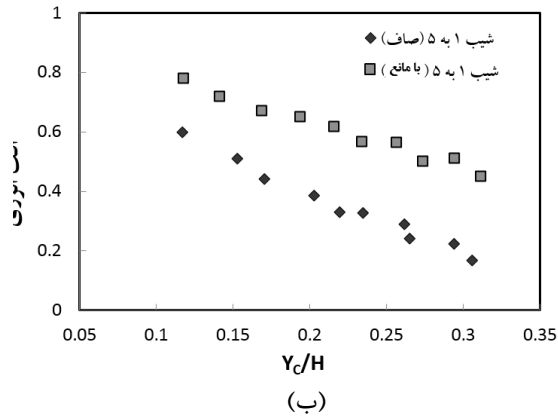
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(h_s)_i - (h_m)_i|}{(h_m)_i} \quad (15)$$

جدول (۱): مقادیر RMSE و MAPE در دو حالت مدل

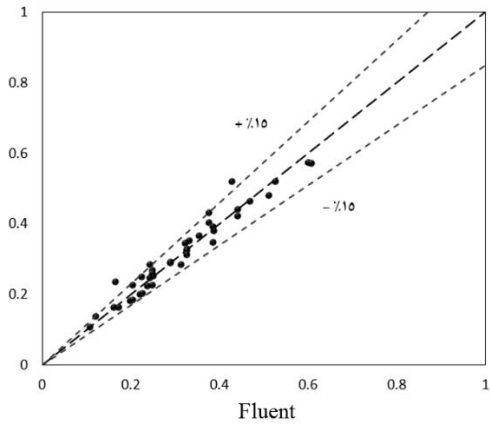
شاهد و مانع دار

	مدل شاهد	مدل با مانع
RMSE	۰/۰۵۳	۰/۰۳۶
MAPE	۰/۰۲۳	۰/۰۱۹

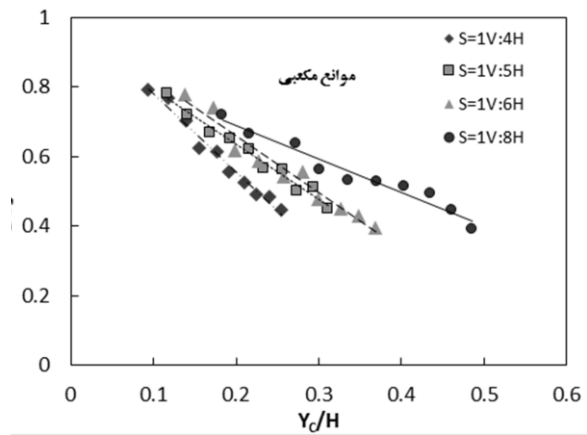
در شکل (۹) مقدار افت محاسبه شده با استفاده از داده های مدل عددی (محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از رابطه (۱۲) (محور قائم) با هم مقایسه شده اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می دهد که مقادیر عددی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می باشند. و مقدار ضریب تبیین این دو مقدار با استفاده از روش های آماری ۹۵ درصد و در سطح ۰/۰۱ معنی دار می باشد. در شکل (۱۰) نتایج عددی و محاسباتی از رابطه (۱۳) برای تندآب با موانع نسبت به



شکل ۷- مقایسه افت نسبی انرژی در مدل‌های با بستر مانع‌دار و مدل شاهد با شیب‌های (الف) ۱ به ۴، (ب) ۱ به ۵، (ج) ۱ به ۶ و (د) ۱ به ۸

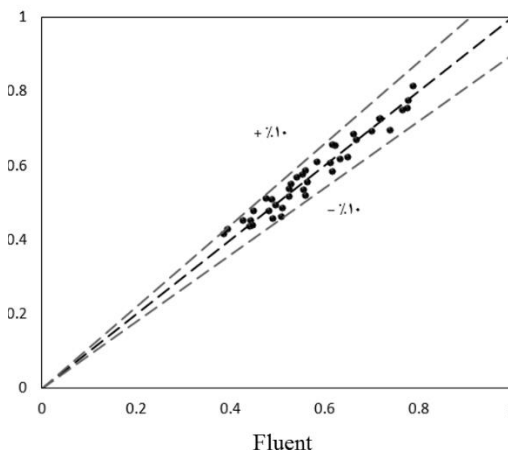


شکل ۹- مقایسه افت نسبی انرژی عددی و محاسباتی از رابطه (۱۲) برای مدل صاف



شکل ۸- مقایسه افت نسبی انرژی در مدل‌های با بستر مانع‌دار در شیب‌های مختلف

افت انرژی با نرخ کمتری اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی می‌توان گفت افت انرژی در مدل‌های شاهد بین ۱۱ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا ۶۶ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۵ متغیر است. نتایج مقایسه افت در مدل‌های با بستر دارای موانع نشان می‌دهد در همه مدل‌ها روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد و همچنین نرخ کاهش به‌صورت تقریباً خطی می‌باشد. در مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، مقدار نسبی افت انرژی در شیب ۱ به ۴ دارای بیشترین و در شیب ۱ به ۶ و ۱ به ۸ دارای کمترین مقدار می‌باشد. می‌توان گفت افت انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست از ۸۳ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا مقدار ۴۵ درصد در مدل با موانع مکعبی و شیب ۱ به ۸ متغیر است. همچنین در مدل‌های با موانع بستر میزان افت انرژی از ۱۸ تا ۴۱ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش داشته است. همچنین مقادیر عددی و مقادیر محاسباتی از روابط استخراج شده، دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند، و همبستگی این دو مقدار با استفاده از روش‌های آماری ۰/۹۶ درصد و در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشند. در پایان با استفاده از رگرسیون‌گیری غیرخطی چند متغیره روابطی در تندآب با بستر صاف و تندآب با موانع جهت محاسبه میزان افت نسبی انرژی استخراج شد.



شکل ۱۰- مقایسه افت نسبی انرژی عددی و محاسباتی از رابطه (۱۳) برای مدل با وجود موانع

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی اثر موانع مکعبی مستغرق در بستر تندآب بر افت انرژی با استفاده از مدل ریاضی Fluent در شرایط هیدرولیکی مختلف می‌باشد. در تحقیق حاضر با ۴ متغیر شیب و دبی‌های مختلف، مدل عددی اجرا شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل ریاضی با دقت قابل‌قبولی توانایی مدل‌سازی جریان در این نوع تندآب را دارد. بررسی افت انرژی در همه مدل‌ها شاهد نشان می‌دهد، مقدار افت انرژی در همه‌ی شیب‌ها با افزایش نسبت Y_c/H دارای روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد. علاوه بر این مقایسه افت انرژی در مدل‌های با بستر صاف نشان می‌دهد که با کاهش شیب بستر تندآب، روند کاهش

منابع

رحمانشاهی، م و شفافی بجستان، م. ۱۳۹۱. اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر استهلاک انرژی با استفاده از مدل فیزیکی. مجله دانش آب و خاک. دوره ۲۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۱، صفحه ۹۵-۱۰۶.
 رشیدی آوندی، م. ۱۳۹۵. اثر زبری مصنوعی در آبراهه‌های شیب‌دار بر عمق آبشستگی حوضچه‌های آرامش. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۹۷ ص.

Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co, New York, NY
 Design of Small Canal Structures. 1987. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. A technical Service Publication.
 Fluent Inc. 2006, FLUENT, User's Guid, Fluent.
 Oertel, M. 2011. Strömungsvisualisierung auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise. Wasserwirtschaft, 101: 34-44.
 Pagliara, S, Carnacina, N, and Palerm, M. (2009). "Energy dissipation in presence of block

ramps with enlarged stilling basins.” 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment.

Pagliari, S, and Chiavaccini, P. 2006. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *J. Hydraulic Engineerig. ASCE.* 128(4): 545-553.

Das, R., D. Pal, S. Das, and A. Mazumdar. 2014. Study of Energy Dissipation on Inclined Rectangular Contracted Chute. *Arabian Journal for Science and Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 39: 6995–7002.

25, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1964, pp. 154-188

Rhone, I. J 1971. Studies to Determine the Feasibility of a Baffled Apron Drop as a Spillway Energy Dissipator-Conconully Dam Spillway-Okanogan Project, Washington, U.S. Bureau of Reclamation, Report REC-ERC-71- 29.

Rodi, W. 1979. Turbulence models and their application in hydraulics- a state-of-the-art review. IAHR, Delft, Netherlamds.

Yakhot, V. Orszag, S. A. Thangam, S. Gatski, T. B. Speziale, C. G. 1992. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique. *Physics of Fluids A*, 4, 1510-1520.

Zulfequar, A, Nadimetla, M, P, and Bernhard, W. 2009. Energy Dissipation on Block Ramps with Staggered Boulders. *J. Hydraulic. Eng. ASCE.* 135(6), 522-526.

Numerical simulation of energy loss in the chute with submerge cubic obstacle

Mostafa Mirzaie-jeshni¹, Manoochehr Fathi-Moghadam^{2*}, Ahmad Fathi³, Asghar Akbari⁴

Abstract:

In this study, energy loss in chutes with cubic submerged obstacles is investigated. The advantages of this method over previous methods such as stepped spillway are lower risk of cavitation. FLUENT finite volume software was used for the numerical computation. The flow was considered turbulent and incompressible. The turbulent model of $k-\varepsilon(RNG)$ was used in this study. In general, for the range of discharges in this study, the energy lost varies from 11% in 1:4 slope to 66% in 1:5 slope for witness models. The results of energy lost in blocked-bed models showed a linear decrease with a relatively steep slope. In general, the “relative energy lost” was shown to be the most in 1:4 slope and the least in 1:5 slope. Moreover, the energy loss relative to upstream energy varies from 83% in models with 1:4 slope to 45% in the blocked-bed models with 1:8 slopes. Also, energy loss in blocked-bed models has been increased from 18 to 41 percent in comparison to the witness models. Using multivariate regression, some equations was developed to estimate energy lost.

Keywords: Chute, energy loss, submerged obstacle, numerical simulation, Fluent

¹ M.Sc. Graduated Student, Department of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
Number phone: 09178674979, Email:mostafamj9094@gmail.com

^{2*} Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
Number phone: 09161135171, Email: fathi49@gmail.com

³ Assistant Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
Number phone: 09161138292, Email:fathiahmad2000@yahoo.com

⁴ M.Sc. Student, Department of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
Number phone: 09338332160, Email:a.akbari94347@gmail.com