

مدلسازی عددی افت انرژی در تندآب با موانع مکعبی

مصطفی میرزایی جشنی^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲، احمد فتحی^۳، 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 نزولی با شیب نسبتاً تند و همچنین نرخ کاهش به‌صورت تقریباً خطی را نشان می‌دهد. در مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، مقدار نسبی افت انرژی در شیب ۱ به ۴ دارای بیشترین و در شیب ۱ به ۵ دارای کمترین مقدار می‌باشد. به‌طور کلی 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 با استفاده از رگرسیون چند متغیره روابطی برای پیش‌بینی افت انرژی استخراج شد.

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

^{۱*} دانشجوی 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

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

fathiahmad2000@yahoo.com

^۴ دانشجوی 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 جریان‌های دارای قدرت تخریب‌کننده قابل توجهی می‌باشد که ممکن است به سازه هیدرولیکی مورد نظر آسیب جدی وارد نماید. جهت ممانعت از آثار تخریبی جریان با سرعت‌های خیلی زیاد از روی سرریزها، از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. در این میان تندآب‌ها از جمله متداول‌ترین ساختمان‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه‌های آبرفتی و سیستم‌های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب می‌باشند. پایین‌دست این ابنیه‌ها از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی پایین دست بکار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تندآب‌ها می‌باشد. از جمله‌ی این روش‌ها که تاکنون استفاده شده‌است ایجاد پله در طول سرریز است. به کار بردن مانع یا زبری در بستر سرریز روش دیگری است که می‌تواند استفاده شود. تندآب مانع‌دار از نوع تلف‌کننده انرژی ضربه‌ای است که کاربرد زیادی در شبکه‌های زهکشی روباز و در جاهایی که سطح آب پایین‌دست نوسانات زیادی دارد، به کار می‌رود. اهمیت این نوع از مستهلک‌کننده انرژی در مواردی که سطح آب پایاب نوسان زیاد داشته، مشهودتر است (طراحی سازه‌های کانال کوچک، ۱۹۸۷).

در واقع ردیف‌های ضربدری بلوک‌های مانع‌دار روی تندآب، فارغ از ارتفاع شیب‌شکن از شتاب‌گیری بیش از حد جریان جلوگیری کرده و یک سرعت نهایی قابل قبولی را فراهم می‌آورد. 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) آزمایش‌هایی با شیب‌های مختلف و میزان زاویه انقباض متفاوت به منظور بررسی میزان افت انرژی و بدست آوردن رابطه‌ای میان پارامترهای شیب و زاویه انقباض انجام دادند. نتایج حاصل از کار آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب، میزان استهلاک انرژی افزایش و با افزایش زاویه انقباض میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

رون^۲ (۱۹۷۱) در مطالعه‌ای به بررسی اجرایی بودن تندآب مانع‌دار به عنوان تلف‌کننده انرژی پرداخت و نشان داد ساختار و هندسه موانع می‌تواند مقدار دبی طراحی را کنترل نماید.

اورتال^۳ (۲۰۱۱) سراسیمه‌های با تخت سنگ‌های ردیفی عرضی را مورد مطالعه قرار داد. در نتایج بدست آمده رژیم جریان بر روی تخت سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی شکل‌گیری جریان بر روی شیب و تخت سنگ‌ها و مقایسه ارتفاع آب به ارتفاع تخت سنگ‌ها رژیم جریان عبوری به سه نوع رژیم جریان حوضچه‌ای، موج و کانالی تقسیم‌بندی شد. هم چنین با مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه نیروی درگ روابطی ارائه شد.

ذوالفقار احمد و همکاران^۴ (۲۰۰۹) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نیم‌کره‌های برآمده بر افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی با آرایش‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار افت انرژی در بستر زیر بیشتر از بستر صاف می‌باشد. همچنین مقدار افت انرژی با افزایش تراکم اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش می‌یابد.

رحمانشاهی و شفاعی بجستان (۱۳۹۱) تأثیر اندازه زبری بستر تندآب بر میزان افت انرژی جنبشی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در ۳ شیب مختلف با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آن‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که با وجود زبری بستر تند آب، میزان افت

⁴ Zulfequar Ahmad et al.

¹ Das

² Rhone

³ Oertel

سال هشتم • شماره سی و یکم • بهار ۱۳۹۷
انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاوی این مطلب است. پاگلیارا و چیاواچینی^۱ (۲۰۰۶) با استفاده از کره-های فلزی که با پوشش آلومینیومی احاطه شده بودند، به بررسی اثر تخته سنگ‌های برآمده بر مقاومت جریان در بستر شیب‌های سنگی^۲ پرداختند. در آزمایشات آنها نحوه‌ی قرار گیری این کره‌ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بودند. بر اساس نتایج پاگلیارا و چیاواچینی این کره‌ها سبب پایداری بیشتر شیب‌های سنگی می‌شوند، زیرا این عمل به آشفته‌گی جریان دامن‌زده و از تنش برشی وارد شده بر مواد بستر می‌کاهد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در صورت وجود کره‌های فلزی پوشیده شده با آلومینیوم، عمق جریان نسبت به سطح صاف بیشتر می‌شود. نتایج پاگلیارا و چیاواچینی نشان دادند، که تاثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد ۰/۳۲ بی-تأثیر است. ولی در شیب‌های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریعی پیدا می‌کند.

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 می‌باشد، پرداختند. آزمایشات آنها در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی در شیب‌های مختلف تندآب و اندازه‌های مختلف مصالح بستر کانال انجام شد و روند استهلاک انرژی و همچنین آبشستگی حوضچه آرامش با بستر متحرک بررسی گردید.

هدف تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی تأثیر موانع مکعبی مستغرق بستر تندآب بر میزان افت انرژی سازه می‌باشد. در این تحقیق، به‌طور خاص هدف این است که آیا موانع می‌تواند انرژی جنبشی را به‌طور مؤثری کاهش دهد و از ابعاد حوضچه‌ی آرامش پایین دست بکاهد و یا خیر، و اگر جواب مثبت است در چه شیب‌هایی و با چه میزانی؟

مواد و روش‌ها

معرفی مدل Fluent و معادلات حاکم در این تحقیق برای تحلیل عددی از نرم‌افزار سه بعدی Fluent استفاده شده است. نرم‌افزار Fluent قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارا می‌باشد 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 می‌شود.

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

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

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

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

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

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

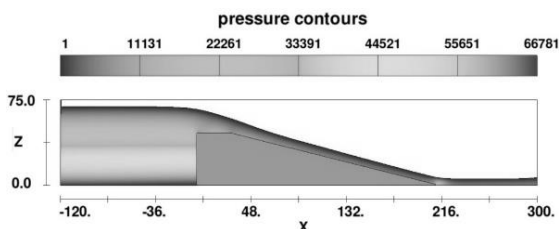
در معادلات فوق v_t لزجت گردابه‌ای است که تابع خصوصیات جریان و آشفته‌گی است. برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفته‌گی بر واحد جرم توسط رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود.

² Block Ramp

¹ Pagliara and Chiavaccini

تحقیقات پیشین، همخوانی خوب مدل با جریان‌های چرخشی و انحنادار 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 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

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

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

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

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 آشفته‌گی استفاده می‌شود (رودی، ۱۹۷۹).

مدل آشفته‌گی (RNG) k-ε

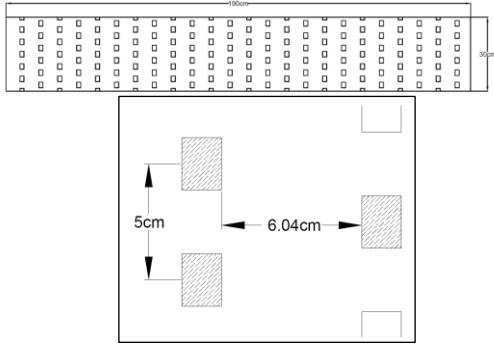
مدل آشفته‌گی (RNG) k-ε که نخستین بار توسط (Yakhot et al, ۱۹۹۲) ارائه شده است. روابط (۷) و (۸) روابط مربوط به k و ε را در این مدل آشفته‌گی نشان می‌دهند.

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

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

Gk و Gb ترم‌های چشمه‌ی معادله‌ی k می‌باشند که همانند مدل استاندارد تعیین می‌شوند. αk و αε عکس عدد پراوتل برای معادلات k و ε هستند. مقدار μeff 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 آشفته‌گی مورد استفاده در این تحقیق (RNG) k-ε می‌باشد. دلیل استفاده از این مدل علاوه بر توصیه‌های



شکل ۳- چیدمان موانع روی تندآب با موانع مکعبی مستغرق

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:

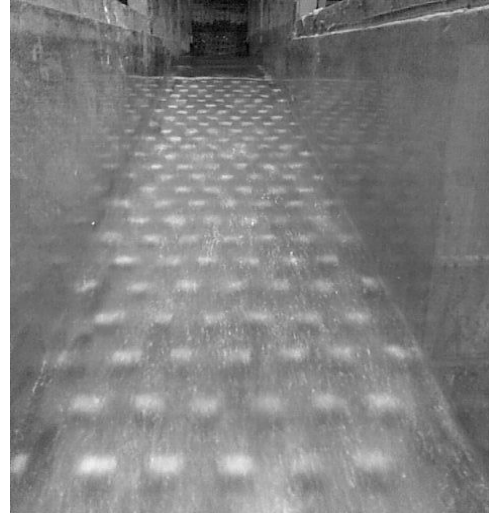
$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{H}, Re, W, \theta\right) \quad (10)$$

در این رابطه $Re = \rho v R / \mu$ عدد رینولدز بالادست و $W = \rho v 2l / \sigma$ 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.

سال هشتم • شماره سی و یکم • بهار ۱۳۹۷
گرفته شد (۴۰ اجرا برای مدل تندآب با بستر صاف و ۴۰ اجرا برای مدل تندآب با بستر با موانع مکعبی). در شکل (۲) و (۳) مدل آزمایشگاهی و نحوه 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)

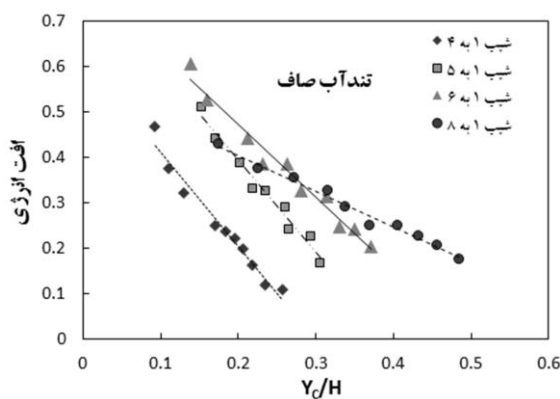
آنالیز ابعادی

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:

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

در شکل (۷) مقدار افت انرژی در مقابل نسبت YC/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 به صورت تقریباً خطی می‌باشد. مطابق تئوری لایه مرزی 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 جداشدگی تشکیل شده کوچک‌تر شده و در نتیجه نیروی درگ فشاری کاهش می‌یابد. در شکل (۷) این تحقیق در تندآب با موانع بستر با افزایش $yC=(q^2/g)1/3$ در واقع دبی افزایش می‌یابد، بنابراین، در یک شیب خاص با افزایش YC/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.

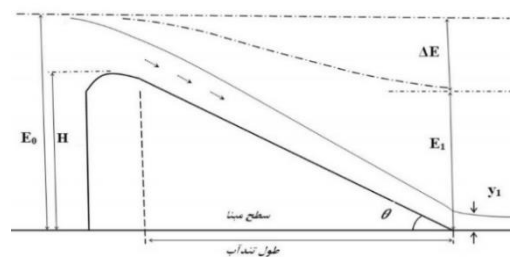


شکل ۶- مقایسه افت انرژی در مدل‌های صاف با شیب مختلف

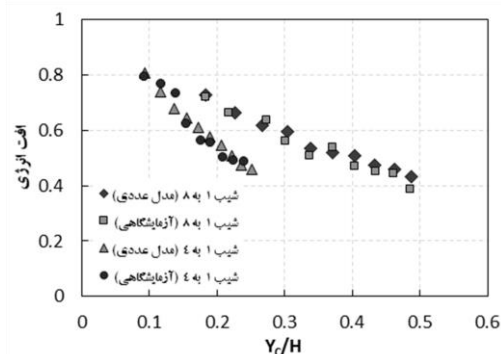
نتایج و بحث

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.



شکل ۴- معرفی تندآب و اجزا آن



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

بررسی افت انرژی

مطابق شکل (۶) افت انرژی در همه‌ی شیب‌ها با افزایش نسبت YC/H دارای روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد. همچنین با کاهش 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.

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

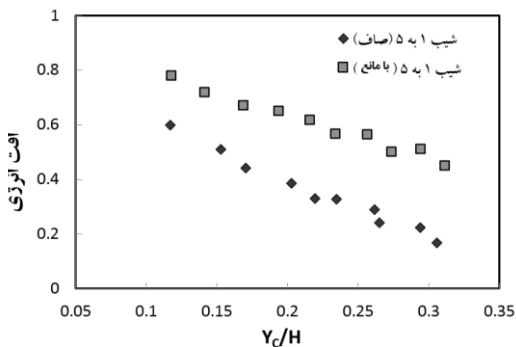
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(h_s)_i - (h_m)_i|}{(h_m)_i} \quad (15)$$

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

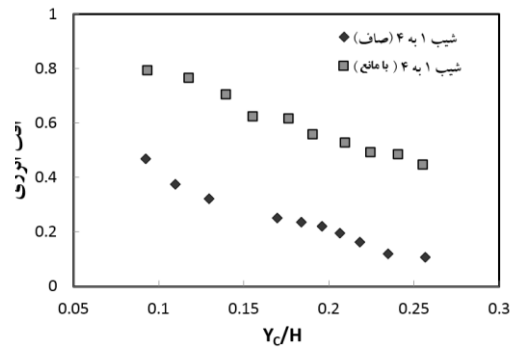
مدل شاهد و مانع دار	مدل	
	با شاهد	بدون شاهد
RMSE	۰/۰۵۳	۰/۰۳۶
MAPE	۰/۰۲۳	۰/۰۱۹

در شکل (۹) مقدار افت محاسبه شده با استفاده از داده‌های مدل عددی (محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از رابطه (۱۲) (محور قائم) با هم مقایسه شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر عددی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. و مقدار ضریب تبیین این دو مقدار با استفاده از روش‌های آماری ۹۵ درصد و در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد.

در شکل (۱۰) نتایج عددی و محاسباتی از رابطه (۱۳) برای تندآب با موانع نسبت به خط ۴۵ درجه مقایسه شده‌اند. مطابق شکل این رابطه نیز دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



(ب)



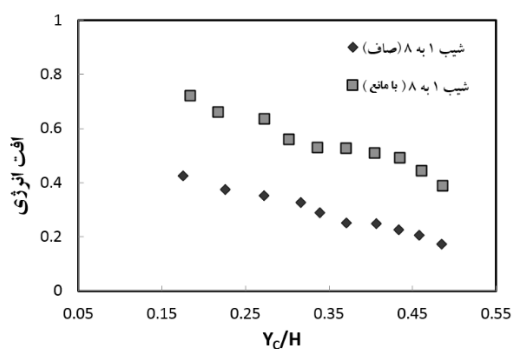
(الف)

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.

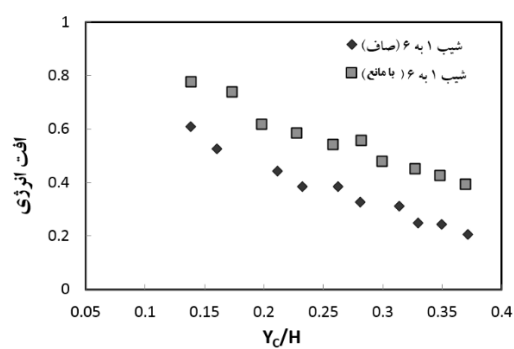
$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = 175.48 - 175.56 \times \left(\frac{Y_c}{H}\right)^{0.002} - 219.33 \times (\tan(\theta))^{4.78} \Rightarrow R^2 = 0.96 \quad (12)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = -0.115 + \text{EXP}(-12.255 \left(\frac{Y_c}{H}\right) + 0.854) \times \tan(\theta) \Rightarrow R^2 = 0.96 \quad (13)$$

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



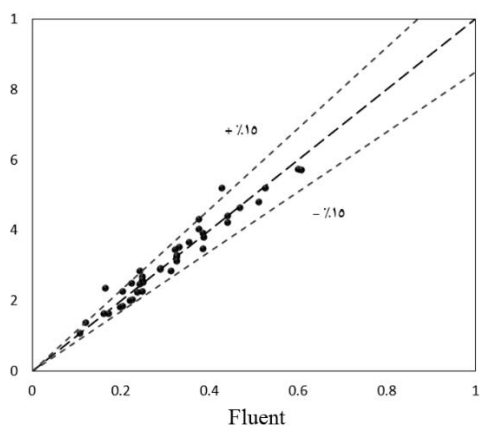
(د)



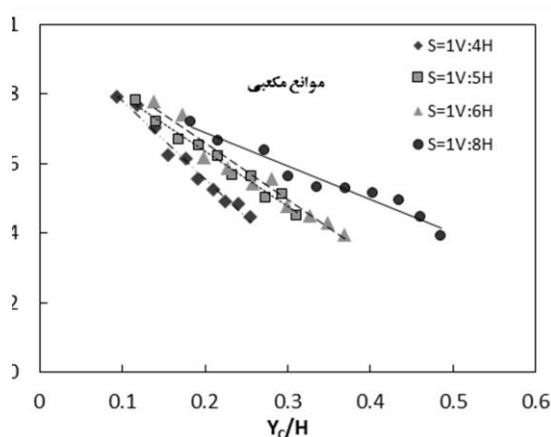
(ج)

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



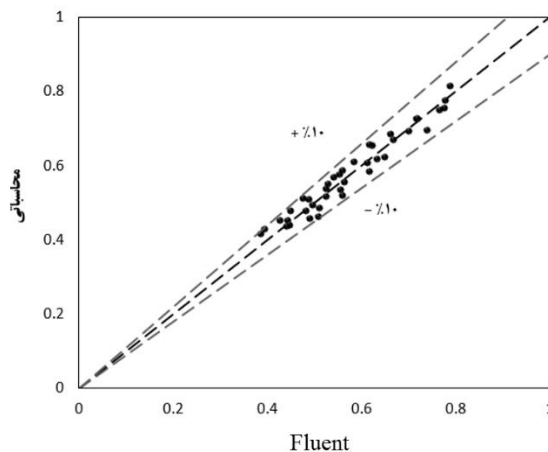
شکل ۹- مقایسه افت نسبی انرژی عددی و محاسباتی از رابطه (۱۲) برای مدل صاف



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

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 افت انرژی با نرخ کمتری اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی می‌توان



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

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 به صورت 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 رگرسیون گیری غیرخطی چند متغیره روابطی در تندآب با بستر صاف و تندآب با موانع جهت محاسبه میزان افت نسبی انرژی استخراج شد.

منابع

- رحمانشاهی، م و شفاعی 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.
- Pagliara, 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-jeshni^{11*}, Manoochehr Fathi-Moghadam¹², Ahmad Fathi¹³, Asghar Akbari¹⁴

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 the less risk of cavitation. FLUENT finite volume software was used for numerical computation which employs finite elements method to solve flow equations. The flow was considered turbulent and fluid was considered 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 loss varies from 11% in 1:4 slopes to 66% in 1:5 ones for witness models. The results of energy loss in blocked-bed models showed a downward and linear trend with a relatively steep slope. However, the “relative energy loss” 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. Furthermore, energy loss in blocked-bed models has been increased from 18 to 41 percent in comparison to the control models. At last, using multivariate regression, some equations were extracted to estimate energy loss.

Keywords: Chute, energy loss, submerged ob

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

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

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

⁴ AssistantProfessor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Number phone: 09161138292, Email: fathiahmad2000@yahoo.com