

## شبیه‌سازی عددی استهلاک انرژی در تندآب با موانع استوانه‌ای مستغرق با مدل Flow 3D

محمد راشکی قلعه نو<sup>۱\*</sup>، مهدی اژدری مقدم<sup>۲</sup>، غلامرضا عزیزیان<sup>۳</sup> و کامران خلیفه ای<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، mohammadrashki@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۴- دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

پذیرش: ۹۵/۹/۲۸

بازنگری: ۹۵/۹/۲۵

دریافت: ۹۵/۳/۱۰

### چکیده

در این تحقیق به قابلیت استهلاک انرژی تندآب با موانع مستغرق استوانه‌ای پرداخته شد. از مزیت‌های این روش بر روش‌های قبلی مانند سرریز پلکانی، خطر کاویتاسیون کمتر و اقتصادی‌تر بودن آن می‌باشد. در این تحقیق برای تحلیل عددی از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. این نرم‌افزار با استفاده از روش حجم محدود معادلات جریان را حل می‌کند. 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. بررسی افت انرژی در همه مدل‌های شاهد نشان می‌دهد، مقدار افت انرژی در همه‌ی شیب‌ها با افزایش نسبت  $Y_c/Y_c/H$  عمق بحرانی و  $H$  ارتفاع تندآب دارای روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت استهلاک انرژی در مدل‌های شاهد نسبت به انرژی بالادست در محدوده دبی‌های این تحقیق بین ۱۰ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا ۶۴ 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 و 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 ۵ دارای کمترین مقدار می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت استهلاک انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست از ۸۱ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا مقدار ۴۳ درصد در مدل با موانع استوانه‌ای و شیب ۱ به ۶ و ۱ به ۸ متغیر است. همچنین در مدل‌های با موانع بستر، میزان استهلاک انرژی از ۱۶ تا ۳۹ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش داشته است. در پایان نیز با استفاده از رگرسیون چند متغیره روابطی برای پیش‌بینی افت انرژی در این نوع تندآب در حالت بستر صاف و با وجود موانع استخراج شد.

**کلید واژه‌ها:** تندآب، استهلاک انرژی، موانع مستغرق، شبیه‌سازی عددی، Flow3D.

### مقدمه

روش دیگری که می‌تواند استفاده شود کاربرد مانع و یا زبری در بستر سرریز است. 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، به‌کار می‌رود. اهمیت این نوع از مستهلک‌کننده انرژی در مواردی که سطح آب پایاب نوسان زیاد داشته، مشهودتر است (Akbaryan, 1992).

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 قبول 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.

Peterka (1964) به بررسی جنبه‌های هیدرولیکی تندآب با موانع غیر مستغرق پرداخت و مقادیر هندسه آن را استاندارد نمود.

به‌طور کلی هنگامی که آب از بالای هر نوع سرریزی از ارتفاع بالا به پایین سرریز می‌شود، مقدار زیادی از انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. چنین جریانی دارای قدرت تخریب‌کننده قابل توجهی می‌باشد که ممکن است به سازه هیدرولیکی مورد نظر آسیب جدی وارد نماید. برای ممانعت از اثرات 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 سازه از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک‌کننده انرژی پایین‌دست، بکار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تندآب‌ها می‌باشد. از جمله این روش‌ها که تاکنون استفاده شده‌است ایجاد پله در طول سرریز است.

تحقیق، مهمترین هدف این است که آیا موانع استوانه‌ای می‌توانند انرژی جنبشی را به‌طور مؤثری کاهش دهد و از ابعاد حوضچه‌ای آرامش پایین دست بکاهد و یا خیر؟ و اگر جواب مثبت است در چه شیب‌هایی و با چه میزانی؟

### مواد و روش‌ها

#### معرفی مدل FLOW3D و معادلات حاکم

در این تحقیق برای تحلیل عددی از نرم‌افزار سه بعدی FLOW-3D استفاده شده است. نرم‌افزار FLOW-3D قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را به‌صورت حجم محدود دارا می‌باشد. معادله های 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 معادله های فوق  $u_i$  مولفه سرعت درجهت  $x_i$ ،  $P$  فشار کل،  $\rho$  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.

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

در معادله های فوق  $v_t$  لزجت گردابه‌ای است که تابع خصوصیات جریان و آشفتگی است.  $\delta_{ij}$  برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم توسط رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود.

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

Rhone (1971) 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.

Katoorani and Kashefipor (2011) به بررسی آرایش موانع تندآب بر استهلاک انرژی پرداختند. نتایج این تحقیقات که به ازای عرض و فواصل مختلف انجام شد نشان داد که افزایش عرض و فاصله باعث کارایی بیشتر و افزایش استهلاک انرژی است.

Zulfequar et al. (2009) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نیم‌کره‌های برآمده بر استهلاک انرژی بروی شیب‌های سنگی با آرایش‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار استهلاک انرژی در بستر زبر بیشتر از بستر صاف می‌باشد. هم‌چنین مقدار افت انرژی با افزایش تراکم اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش می‌یابد.

Rahmanshahi و Shafai Bajestan (2012) تأثیر اندازه

زبری بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در سه شیب مختلف با قرار دادن سه نوع زبری با اندازه‌های متفاوت و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت روی بستر آن‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با وجود زبری بستر تندآب، میزان استهلاک انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد.

Pagliara و Chiavaccini (2006) با استفاده از کره‌های فلزی که با پوشش آلومینیمی احاطه شده بودند، به بررسی اثر تخته سنگ‌های برآمده بر مقاومت جریان در بستر شیب‌های سنگی (Block Ramp)، پرداختند. در آزمایش‌های آنها نحوه‌ی قرار گیری این کره‌ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بودند. بر اساس نتایج پالیارا و واچینی این کره‌ها سبب پایداری بیشتر شیب‌های سنگی می‌شوند، زیرا این عمل به آشفتگی 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 آلومینیم، عمق جریان نسبت به سطح صاف بیشتر می‌شود. نتایج پالیارا و واچینی نشان می‌دهد، که تأثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد ۰/۳۲ بی‌تأثیر است. ولی در شیب‌های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریعی پیدا می‌کند.

Pagliara et al. (2009) به ارزیابی اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی روی افت انرژی در حوضچه پایین دست یک تندآب سنگی که حوضچه آن دارای بستر متحرک می‌باشد، پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی در شیب‌های مختلف تندآب و اندازه‌های مختلف مصالح بستر کانال انجام شد و روند استهلاک انرژی و آبستگي حوضچه آرامش با بستر متحرک بررسی گردید.

هدف تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی تأثیر موانع استوانه‌ای مستغرق بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی سازه می‌باشد. در این

$k$  و  $\varepsilon$  هستند. مقدار  $\mu_{eff}$  از طریق انتگرال گیری از معادله دیفرانسیلی زیر بدست می آید. این مورد امکان شبیه سازی دقیق در اعداد رینولدز کم و جریان نزدیک دیواره را فراهم می آورد. در شکل (۱) مدل اجرا شده در محیط نرم افزار نمایش داده شده است.

در این تحقیق جریان از نوع دائمی و اغتشاشی و سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق  $k-\varepsilon(RNG)$  می باشد. دلیل استفاده از این مدل علاوه بر توصیه های تحقیقات پیشین، همخوانی خوب مدل با جریان های چرخشی و انحادار و جریان های با کرنش های بزرگ می باشد. تعیین پروفیل سطح آزاد به کمک مدل VOF انجام گرفته است. مدل VOF بر این فرض استوار است که دو سیال در هم نفوذ نمی کنند. به هر فاز سیال متغیری نسبت داده می شود که نشان می دهد چند درصد از سلول محاسباتی توسط آن فاز اشغال شده است. این متغیر کسر حجمی نامیده می شود. در مدل FLOW-3D مش بندی با استفاده از المان های مکعبی قائمه انجام می شود. شرایط مرزی مدل شامل مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیوار و سطح آزاد جریان می باشد. 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 برای همگرایی مسئله از روش همگرایی RMS (ریشه متوسط جذر باقیمانده ها) استفاده شده است.

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

به منظور حل میدان جریان آشفته براساس معادله های پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش های رینولدز در معادله های 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 مدل های آشفتگی استفاده می شود. (Rodi, 1979).

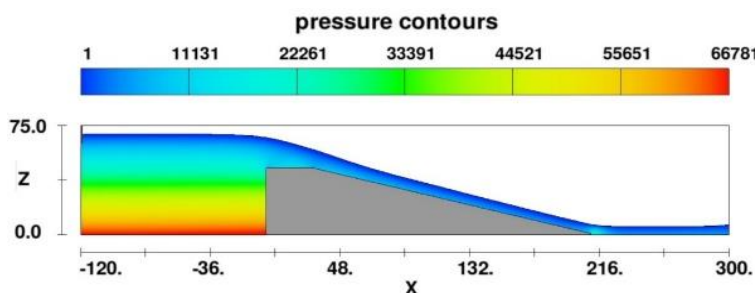
#### مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$

مدل آشفتگی  $k-\varepsilon(RNG)$  که نخستین بار توسط Yakhot et al. (1992) ارائه شده است. روابط (۷) و (۸) روابط مربوط به  $k$  و  $\varepsilon$  را در این مدل آشفتگی نشان می دهند.

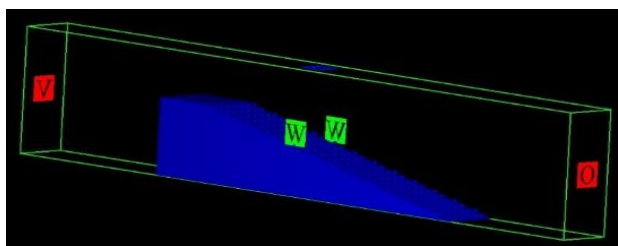
$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (7)$$

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

$G_k$  و  $G_b$  ترم های چشمه های معادله  $k$  می باشند که همانند مدل استاندارد تعیین می شوند.  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  عکس عدد پراوتل برای معادله های



شکل ۱- مدل اجرا شده در محیط نرم افزار



شکل ۲- اعمال شرایط مرزی در مدل عددی

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

که در آن  $q$  دبی در واحد عرض،  $\Delta E/E_0$  افت نسبی انرژی،  $H$  ارتفاع تندآب،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب،  $\rho$  جرم حجمی آب،  $g$  شتاب ثقل،  $\theta$  زاویه بستر تندآب با افق و  $\sigma$  کشش سطحی می‌باشد. با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام رابطه کلی زیر به دست 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  $W = W / \rho v^2 l / \sigma$  عدد وبرمی‌باشد. مطابق شکل (۴) و پارامترهای مشخصه روی آن، میزان افت انرژی نسبی جریان از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در این تحقیق به علت ماهیت آشفتنه جریان از عدد رینولدز  $Re$  صرف نظر شده و همچنین چون ارتفاع جریان روی سرریز بیشتر از ۵ سانتی متر است، از عدد وبر  $W$  نیز صرف نظر شد. (Chow, 1959)

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

در این رابطه  $\Delta E_r$  افت نسبی انرژی نسبی جریان،  $E_0$  انرژی کل جریان در بالادست و  $E_1$  انرژی کل پای تندآب می‌باشد.

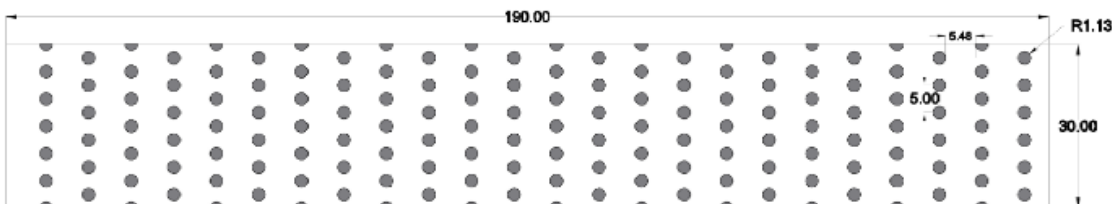
در شکل (۲) شرایط مرزی اعمال شده در مدل نمایش داده شده است.

### مشخصات مدل فیزیکی

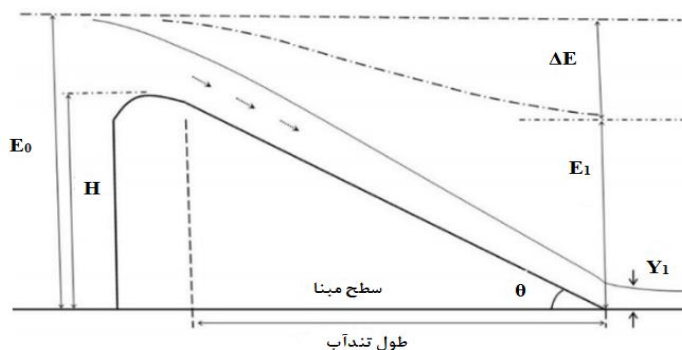
در این تحقیق در ابتدا با توجه به آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه شهید چمران اهواز، مدل عددی کالیبره شده و سپس اثر متغیرهای مختلف این تحقیق از جمله شیب تندآب و نسبت استغراق نسبی موانع بررسی می‌شود. (Rashidi Avandi and Fattahi, 2016). آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۳۰ سانتی متر، ارتفاع ۸۰ در ابتدا و ۴۰ سانتی متر در قسمت انتهایی و طول ۷ متر انجام شد. تندآب از جنس پلاکسی 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 تندآب با بستر صاف و ۴۰ اجرا برای مدل تندآب با بستر با موانع استوانه). در شکل (۲) و (۳) نحوه‌ی چیدمان موانع روی بستر تندآب نمایش داده شده است.

### تحلیل ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاک 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:



شکل ۳- چیدمان موانع روی تندآب با موانع استوانه‌ای مستغرق



شکل ۴- معرفی تندآب و اجزا آن

## نتایج و بحث

### کالیبراسیون مدل ریاضی

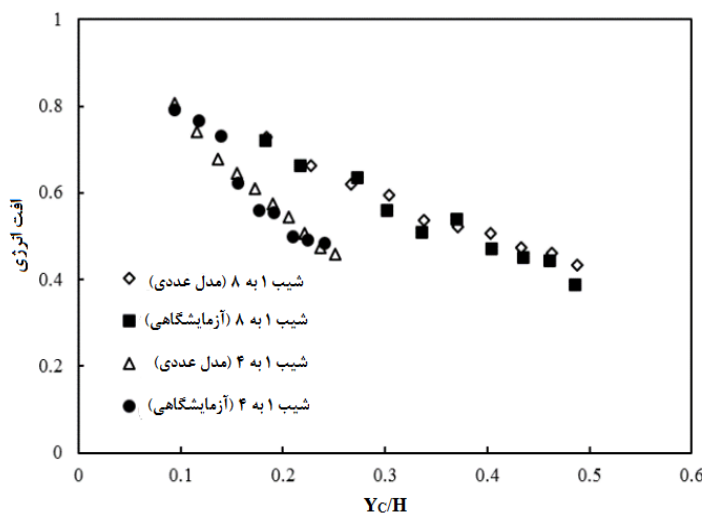
مطابق شکل (۵) مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل ریاضی با دقت قابل‌قبولی توانایی مدل‌سازی این نوع تندآب را دارد. برای مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی از تندآب با موانع استوانه‌ای با دو شیب ۱ به ۴ و ۱ به ۸ استفاده شده است. به طور متوسط مقدار خطای آزمایشگاهی و عددی حدود ۳/۷۸ درصد می‌باشد.

### بررسی افت انرژی

مطابق شکل (۶) بررسی افت انرژی ( $\Delta E_r$ ) در همه مدل‌های با بستر صاف نشان می‌دهد، مقدار 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 استهلاک انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادستدر محدوده دبی‌های این تحقیق تا ۶۱ درصد در دبی‌های پایین افزایش می‌یابد.

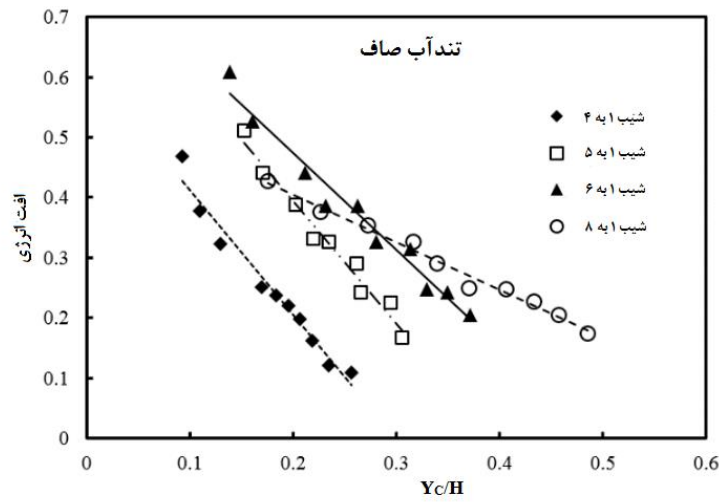
در شکل (۷) مقدار افت انرژی در مقابل نسبت  $Y_c/H$  در مدل‌های صاف و مدل‌های با مانع‌رسیم شده است. مطابق نتایج در همه مدل‌ها

روند نزولی با شیب نسبتاً تند می‌باشد و همچنین نرخ کاهش به‌صورت تقریباً خطی است. 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 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  $Y_c = (q^2/g)^{1/3}$  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 استهلاک انرژی بیشتر از تندآب صاف بوده و مقدار این استهلاک محسوس می‌باشد. در شکل (۸) افت انرژی در مدل‌های با موانع استوانه‌ای 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.

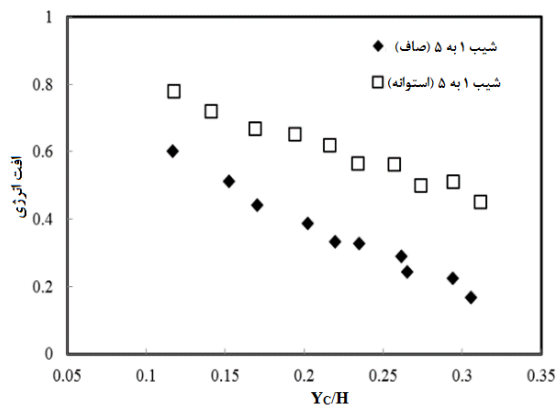


شکل ۵-مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در دو مدل با موانع استوانه‌ای

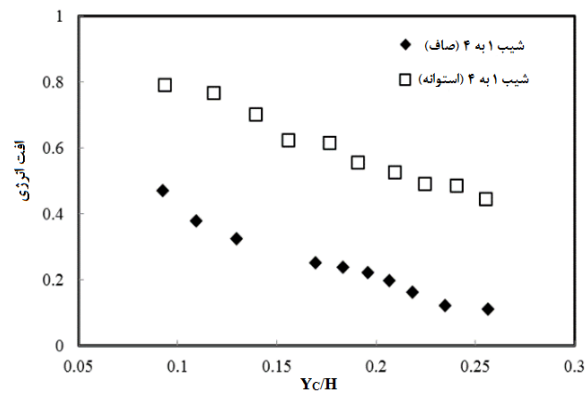
راشکی و همکاران: شبیه‌سازی عددی استهلاک انرژی در تندآب‌ها...



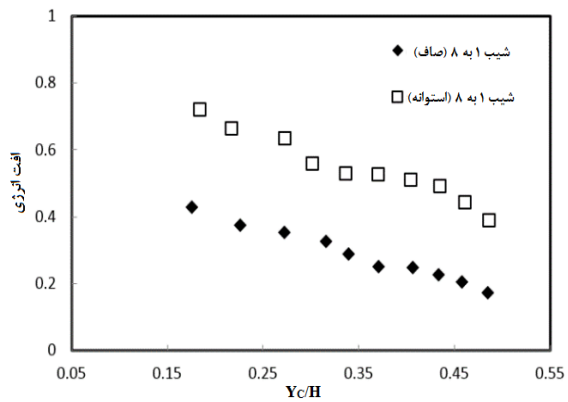
شکل ۶-مقایسه افت انرژی در مدل‌های صاف با شیب مختلف



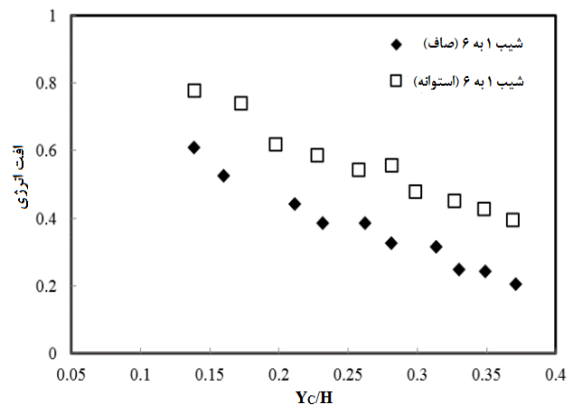
(ب)



(الف)



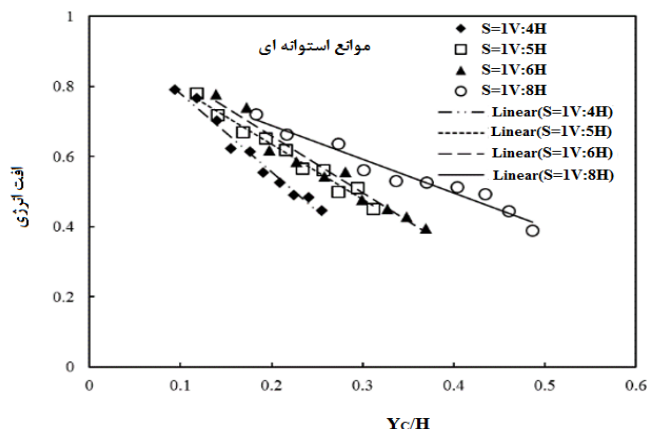
(د)



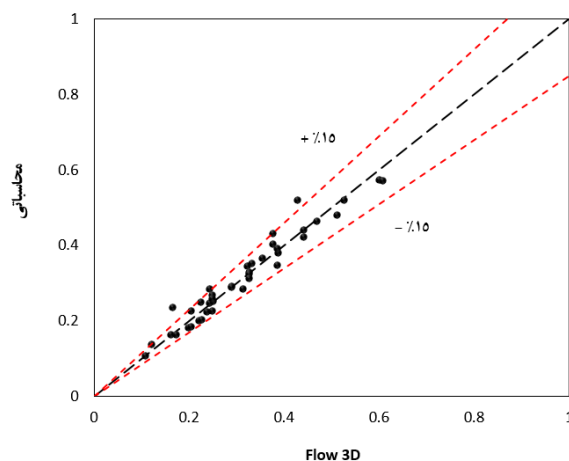
(ج)

شکل ۷-مقایسه افت 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 ۸- مقایسه افت انرژی در مدل‌های با بستر مانع‌دار در شیب‌های مختلف



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

که در آن‌ها  $\Delta E_r/H$  مقدار افت نسبی انرژی،  $Y_c/H$  نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سرریز و  $\theta$  زاویه بستر تندآب با افق می‌باشد. 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.

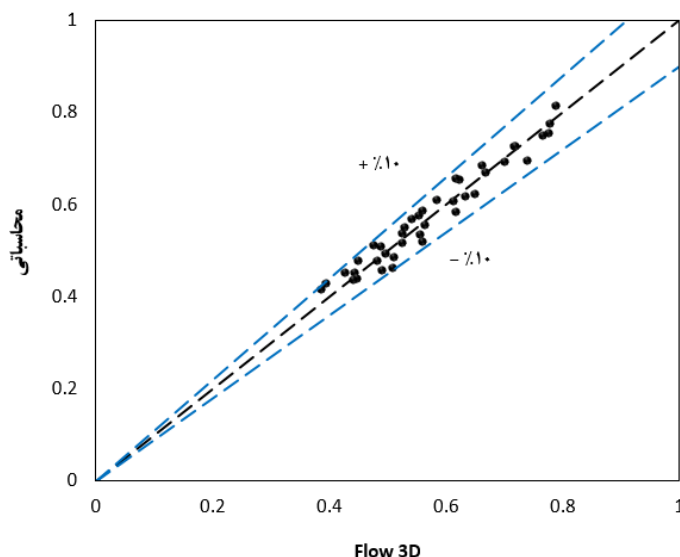
#### استخراج رابطه‌ای جهت پیش‌بینی افت انرژی

در ادامه با توجه به تحلیل 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 براساس مدل عددی 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.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = 175.48 - 175.56 \times \left(\frac{Y_c}{H}\right)^{0.002} - 219.33 \times (\tan(\theta))^{4.78} \Rightarrow R^2 = 0.95 \quad (12)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = -0.115 + \text{EXP}(-12.255 \left(\frac{Y_c}{H}\right) + 0.854) \times \tan(\theta) \Rightarrow R^2 = 0.95 \quad (13)$$

راشکی و همکاران: شبیه‌سازی عددی استهلاک انرژی در تندآب ...



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

شیب نسبتاً تند است 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 استهلاک انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست از ۸۱ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا مقدار ۴۳ درصد در مدل با موانع استوانه‌ای و شیب ۱ به ۸ متغیر است. همچنین در مدل‌های با موانع بستر، میزان استهلاک انرژی از ۱۶ تا ۳۹ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش داشته است. در ضمن مقادیر عددی و مقادیر محاسباتی از روابط استخراج شده، دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند، و همبستگی این دو مقدار با استفاده از روش‌های آماری ۹۵ 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.

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی اثر موانع مستغرق در بستر تندآب بر استهلاک انرژی با استفاده از مدل ریاضی FLOW-3D در شرایط هیدرولیکی مختلف می‌باشد. در تحقیق حاضر با ۴ متغیر شبیه 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 مدل‌های شاهد نشان می‌دهد که 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. به طور کلی می‌توان گفت استهلاک انرژی در مدل‌های شاهد بین ۱۰ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۴ تا ۶۴ درصد برای مدل با شیب ۱ به ۵ متغیر است. نتایج مقایسه افت در مدل‌های با بستر دارای موانع نشان می‌دهد که در همه مدل‌ها، روند نزولی با

### منابع

- 1- Akbaryan, A. 1992. Hydraulic Design of structures of channels. *Amidi pub*, p700. (In Persian)
- 2- Chow, V.T. 1959. Open Channel Hydraulics. *McGraw-Hill Book Co*, New York, NY.
- 3- Katoorani, S. and, Kashefipour, S.M. 2011. Laboratory investigation of the effect of distance and width of the obstacles on the length of the hydraulic jump along the obstructed drop downstream, *National Congress of Structures, Road, Architecture*, Chalus, Islamic Azad University, Chalous Branch. (In Persian).



- 4- Pagliara, S. and Chiavaccini, P. 2006. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *J. Hydraulic Engineerig. ASCE. 128(4)*, pp.545-553.
- 5- 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.
- 6- Peterka, A. , Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, Engineering Monograph No. 25, *U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation*, 1964, pp. 154-188.
- 7- Rahmanshahi, Z.M. and Shafai Bajestan M. 2012. Experimental Investigation of the Effect of Chute Bed Roughness Height on Energy Dissipation. *Journal of Water and Soil Science*. Vol 22, Num 2, Summer 2012, pp: 95-106. (In Persian).
- 8- Rashidi Avandi, M. and Fathhi, A. 2016. The effect of artificial roughness in sloping drains on scouring Depth of Stilling basin ,Master thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.p 97. (In Persian).
- 9- Rhone, L. 1971. Studies to Determine the Feasibility of a Baffled Apron Drop as a Spiliway Energy Dissipator-Conconully Dam Spillway-Okanogan Project, Washington, *U.S. Bureau of Reclamation, Report REC-ERC-71- 29*.
- 10-Rodi, W. 1979. Turbulence models and their application in hydraulics- a state-of-the-art review. *IAHR, Delft, Netherlands*.
- 11-Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G. 1992. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique. *Physics of Fluids A*, 4,pp.1510-1520.
- 12-Zulfequar, A, Nadimetla, M, P, and Bernhard, W. 2009. Energy Dissipation on Block Ramps with Staggered Boulders. *J. Hydraulic. Eng. ASCE. 135(6)*, pp.522-526.