

بررسی نوسانات فشار و نیروی عکس العمل سطح در حوضچه‌های آرامش شیب‌شکن‌های مجهز به مستهلک‌کننده‌های شیاری و شبکه‌ای

عبدالرضا کبیری سامانی^{۱*}، الهام بخشیان^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

* اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

akabiri@cc.iut.ac.ir

چکیده- در این مقاله به ارائه نتایج مدل‌سازی تحلیلی و آزمایشگاهی در خصوص تعیین توزیع فشار و نیروی عکس‌العمل سطح در حوضچه‌های آرامش شیب‌شکن‌های مجهز به مستهلک‌کننده‌های شیاری و شبکه‌ای پرداخته می‌شود. این نوع مستهلک‌کننده‌ها به منظور افزایش راندمان استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های احداثی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی پیشنهاد می‌شوند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری هرچه عرض شیارها کمتر باشد، دامنه نوسانات فشار در بستر پایین‌دست بیشتر است و با افزایش دبی، دامنه نوسانات افزایش می‌یابد. ضمناً میزان نوسانات فشار در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری نسبت به مستهلک‌کننده شبکه‌ای کمتر است. توزیع فشار در بستر پایین‌دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای به صورت نوسانی است و با ثابت نگه داشتن بعد عرضی شبکه‌ها با افزایش دبی و کاهش بعد طولی شبکه‌ها تعداد نقاط حداکثر و حداقل فشار افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌گان: شیب‌شکن قائم، مستهلک‌کننده شیاری، مستهلک‌کننده شبکه‌ای، توزیع فشار، نیروی عکس‌العمل سطح.

۱- مقدمه

هنگامی که شیب قسمت‌هایی از مسیر انتقال آب با شیب محاسبه شده برای بستر کانال مطابقت نداشته باشد، یا از شیب مجاز بیشتر باشد، اختلاف بین دو شیب را می‌توان با احداث شیب‌شکن‌های متوالی تعدیل کرد. شیب‌شکن‌ها سازه‌هایی با ارتفاع کم و هم عرض کانال بوده و سبب ایجاد تغییر ارتفاع ناگهانی در بستر کانال و افت تراز سطح آب در پایین‌دست

کانال می‌شوند. با قرار دادن شیب‌شکن‌های متوالی در مسیر کانال می‌توان شیب تند مسیر را به شیب ملایم تبدیل نمود. شیب‌شکن‌ها علاوه بر این که سبب اصلاح شیب کانال می‌شوند، به عنوان کنترل‌کننده جریان و مستهلک‌کننده انرژی مخرب آن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند و با کاهش سرعت از ایجاد فرسایش زیاد در پایین‌دست کانال جلوگیری می‌کنند. انرژی جنبشی اضافه آب می‌تواند سبب بروز خسارت‌های زیادی در

عمق بحرانی در بالادست شیب‌شکن برابر با 0.715 است. Rand (1955) با انجام آزمایشاتی بر روی شیب‌شکن با ارتفاع 198 میلی‌متر، به بررسی پارامترهای مربوط به طراحی شیب‌شکن و حوضچه آرامش پرداخت. وی عدد بی‌بعدی را به نام عدد شیب‌شکن برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی جریان پیشنهاد کرد. Rajaratnam and Chamani (1995) مقدار انرژی مستهلک شده در شیب‌شکن‌ها را بررسی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از برخی فرضیات، رابطه‌ای تحلیلی - تجربی برای محاسبه مقدار انرژی مستهلک شده به دست آوردند. Chamani and Beirami (2002) طی تحقیق آزمایشگاهی - تحلیلی به مطالعه شیب‌شکن‌ها با جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در بالادست پرداختند. Lin et al. (2007) با استفاده از سرعت‌سنج لیزری (LDV) و همچنین با استفاده از تکنیک تصویربرداری به بررسی ویژگی‌های جریان در شیب‌شکن قائم پرداختند که با نتایج محققان قبلی همبستگی بسیار خوبی داشت. بین نتایج به دست آمده توسط Rajaratnam and Chamani (1995) و Lin et al. (2007)، اختلاف‌هایی به دلیل متفاوت بودن خطاهای اندازه‌گیری وجود داشت.

Ming Hong et al. (2010) مطالعاتی نیمه‌تجربی برای تخمین نیروی وارده بر شیب‌شکن و طول بهینه شیب‌شکن در سرزیرهای پلکانی هواده‌ی شده ارائه نمودند. ایشان از 64 دسته داده‌های حاصل از آزمایش برای کالیبره نمودن معادلات به دست آمده و 36 دسته اطلاعات حاصل از آزمایش برای بررسی مدل تحلیلی ارائه شده استفاده نمودند. این محققان برای تعیین نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم روابطی ارائه نمودند. تحقیقاتی نیز در شیب‌شکن‌ها در زمینه افزایش راندمان استهلاك انرژی صورت گرفته است. Chanson (1999) به بررسی ساختار شیب‌شکن‌های استوانه‌ای¹ پرداخت. وی عنوان نمود که این نوع سازه می‌تواند انتخاب مناسب‌تر و

تأسیسات هیدرولیکی پایین دست شود. یکی از روش‌های مناسب استهلاك انرژی جنبشی جریان استفاده از حوضچه‌های پرش هیدرولیکی است. شیب‌شکن‌ها متناسب با اختلاف ارتفاع و دبی جریان و همچنین توپوگرافی منطقه، از لحاظ کاربردی به پنج دسته شیب‌شکن‌های قائم، مایل، لوله‌ای، پلکانی و با کف مانع‌دار تقسیم می‌شوند (بیرامی 1384).

شیب‌شکن‌های قائم در کانال‌های آبیاری، شبکه‌های جمع‌آوری آب و فاضلاب و آب‌های سطحی و در سرریزهای پلکانی به وفور استفاده می‌شوند. معمولاً در شیب‌شکن‌های قائم برای جلوگیری از ایجاد فشار منفی، از مجاری هوا در دیواره‌ی قائم شیب‌شکن استفاده می‌شود. تاکنون تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی به منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در شیب‌شکن‌های قائم صورت گرفته است. بیشتر این تحقیقات معطوف به شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست بوده است. مهمترین مسأله، مدل‌کردن صحیح جریان ریزشی از لبه شیب‌شکن و پیش‌بینی وضعیت پیش آمده برای جریان پس از ریزش از لبه شیب‌شکن و تخمین پارامترهای مؤثر بر وضعیت جریان در شیب‌شکن بوده است. همچنین بررسی وضعیت پیش‌آمده برای جریان پس از ریزش و تحلیل آن، نرخ و علت اصلی استهلاك انرژی در شیب‌شکن‌های قائم توسط محققان مختلف بررسی شده است.

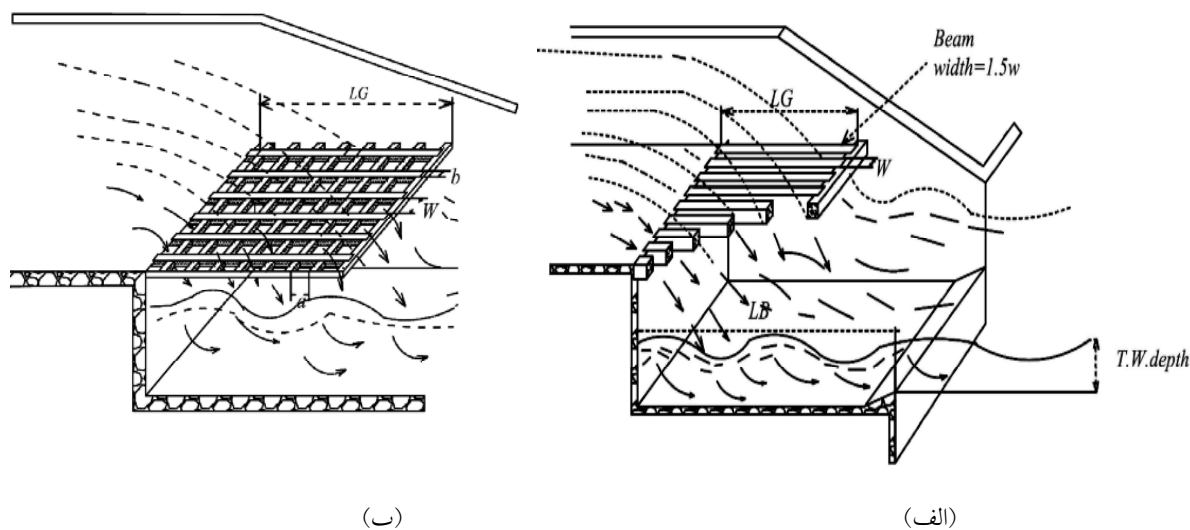
Bakmeteff (1932) با استفاده از معادله انرژی روابطی برای محاسبه سرعت در پایین دست شیب‌شکن قائم و عمق پایین دست شیب‌شکن ارائه داد. مطالعه بنیادی بر روی هیدرولیک جریان در شیب‌شکن‌ها توسط Moore (1943) به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته است. وی دریافت که انرژی مستهلک شده در شیب‌شکن‌ها به نسبت h/y_c (که y_c عمق بحرانی و h ارتفاع شیب‌شکن است) وابسته است. Rose (1943) با انجام آزمایش به این نتیجه رسید که نسبت عمق آب در لبه‌ی آبشار شیب‌شکن به

به بررسی راه‌کارهایی برای استهلاک بیشتر انرژی جریان در شیب‌شکن‌های شبکه‌های آبیاری و زهکشی پرداخته می‌شود. برای این منظور از دو نوع سقف شیاری و شبکه‌ای بر روی حوضچه آرامش شیب‌شکن قائم استفاده می‌شود (شکل ۱). نصب مستهلک‌کننده‌های شیاری و شبکه‌ای در لبه شیب‌شکن‌ها، سبب پخش شدن جریان ریزشی بر روی پرش هیدرولیکی شده و این امر از پیش‌روی پرش به سمت پایین دست جلوگیری می‌کند و سبب کاهش طول پرش می‌شود. در این مقاله به عنوان ایده‌ای نو، تأثیر نصب مستهلک‌کننده‌ها در لبه شیب‌شکن در توزیع فشار و نیروی عکس‌العمل سطح حوضچه‌های آرامش شیب‌شکن‌های قائم بررسی و با تغییر ابعاد شیاریها و شبکه‌ها و بررسی وضعیت جریان، روابط و نمودارهایی برای تعیین نیروی عکس‌العمل سطح در کف حوضچه آرامش شیب‌شکن ارائه می‌شود. در صورت تعیین توزیع فشار در کانال‌ها می‌توان تأثیر نیروی فشاری را بر تأسیسات هیدرولیکی بررسی نمود. همچنین اطلاع از چگونگی توزیع فشار در بکار بردن آگاهانه معادلات انرژی و اندازه حرکت در کانال‌ها سودمند است.

ارزاتتری نسبت به حوضچه‌های آرامش استاندارد و سازه‌های شیب‌شکن باشد. (Esen et al. (2004) برای افزایش میزان استهلاک انرژی در پای شیب‌شکن از سکویی با مقطع عرضی مربعی با عرضی برابر با عرض کانال در شیب‌شکن استفاده کردند. وجود این سکو سبب می‌شود جت ریزشی به سمت جلو هدایت شده و این امر سبب کاهش عمق استخر تشکیل شده در پای شیب‌شکن و افزایش عمق پایین دست و افزایش مقدار انرژی مستهلک شده در شیب‌شکن می‌شود. (Petit et al. (1998) نوعی مستهلک‌کننده شیاردار برای شیب‌شکن‌هایی با ارتفاع سقوط کم و اعداد فرود جریان قبل از پرش در محدوده ۲/۵ تا ۴/۵ بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد نموده است (شکل ۱- الف). رابطه ارائه شده توسط ایشان برای این نوع حوضچه‌ها به صورت رابطه (۱) است:

$$L_G = \frac{Q}{0.245wn\sqrt{2gH_e}} \quad (1)$$

که در آن، Q دبی، L_G طول سازه بر حسب ft ، w عرض شیاریها بر حسب ft ، n تعداد شیاریها و H_e عمق جریان در بالادست نقطه سقوط بر حسب ft است (شکل ۱). بر اساس آنچه در خصوص افزایش راندمان استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم ذکر شد، در تحقیق حاضر



شکل ۱ الف- مستهلک‌کننده شیاری ب- مستهلک‌کننده شبکه‌ای نصب شده بر روی شیب‌شکن قائم

۲- مدل‌سازی تحلیلی

در این بخش با استفاده از فرضیات محققان پیشین در مورد شیب‌شکن قائم، مدل‌هایی برای تحلیل شیب‌شکن دارای مستهلک‌کننده‌های شیاری و شبکه‌ای ارائه شده و سپس با افزودن فرضیاتی جدید به فرضیات قبلی و استفاده از معادلات تجربی حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای برآورد برخی مجهولات حاصل، مدلی تحلیلی برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در این نوع سازه‌ها ارائه می‌شود.

۲-۱- شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شیاری

شکل کلی جریان در این مدل مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن فرضیاتی مانند هیدرواستاتیک بودن فشار، صرف‌نظر نمودن از نیروی برشی مابین بستر و جریان در حجم کنترل مشخص شده در شکل، یکنواخت فرض نمودن توزیع سرعت و چشم‌پوشی از اثرات هوا بر خصوصیات جریان با نوشتن معادله‌ی مومنتم در راستای x برای حجم کنترل نشان داده شده می‌توان نوشت:

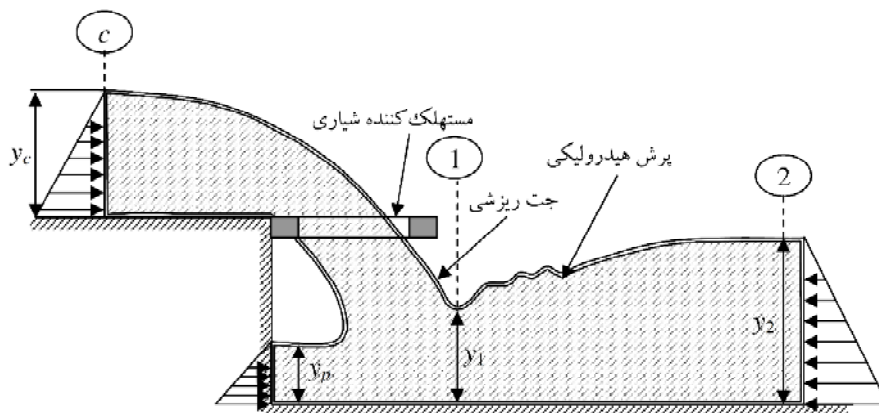
$$\frac{\gamma}{2} y_c^2 - \frac{\gamma}{2} y_2^2 + \frac{\gamma}{2} y_p^2 = \rho q (v_2 - v_c) \quad (2)$$

در این رابطه، γ وزن مخصوص آب، q دبی جریان در واحد عرض، y_p و y_2 به ترتیب عمق استخر تشکیل شده

در پای شیب‌شکن و عمق آب در پایین‌دست شیب‌شکن (عمق ثانویه پرش هیدرولیکی) هستند، v_2 و v_c به ترتیب سرعت متوسط جریان در مقاطع c و 2 هستند. کلیه پارامترها در رابطه (۲) برای عرض واحد نوشته شده است. با این فرض که ابتدای پرش (ابتدای محل جت ریزشی) قابل تعیین است، در رابطه (۲) با معلوم بودن پارامترهای v_c ، q ، y_p و v_2 ، عمق حوضچه تشکیل شده در پای شیب‌شکن (y_p) قابل محاسبه است. در ادامه رابطه مومنتم در راستای y برای حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل ۳ به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود:

$$W - R_y = \rho q (-v \sin \theta) \quad (3)$$

در رابطه (۳) W وزن حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل ۳ در واحد عرض و R_y نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم در واحد عرض حجم کنترل مشخص شده در شکل است. v سرعت متوسط برخورد جت ریزشی با سطح پرش و θ زاویه‌ی برخورد جت با سطح آب نسبت به راستای افق است. در این رابطه، W ، R_y ، v و θ مجهول هستند. برای تعیین سرعت متوسط برخورد جت با سطح پرش با توجه به شکل ۴ فرض می‌شود توزیع سرعت در حد فاصل بین اولین و آخرین نقطه برخورد جت با سطح پرش خطی است.



شکل ۲ شکل کلی هیدرولیک جریان در شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شیاری

$$P_m = \frac{\gamma y_u}{2} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، y_m متوسط y_p و y_2 فرض شده است (رابطه ۶):

$$y_m = \frac{y_2 + y_p}{2} \quad (6)$$

با قرار دادن روابط (۵) و (۶) در رابطه (۴) و ساده‌سازی، رابطه (۷) برای محاسبه v حاصل می‌شود:

$$v = \sqrt{\left(h + y_u + \frac{v_u^2}{2g} - \left(\frac{y_p + y_2}{2}\right)\right) \cdot 2g} \quad (7)$$

با معلوم بودن q و عدد فرود بالادست (Fr_u) ، y_u و v_u به ترتیب از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند:

$$y_u = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g \cdot Fr_u^2}} \quad (8)$$

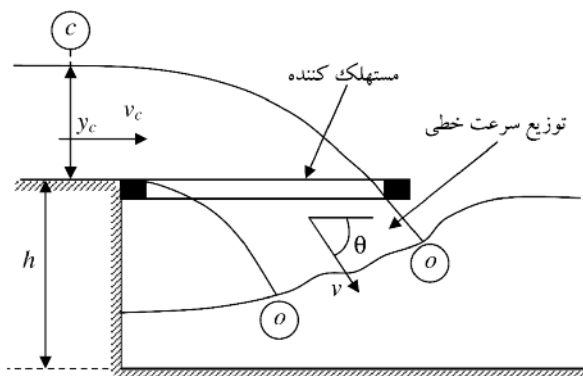
$$v_u = \frac{q}{y_u} \quad (9)$$

برای به‌دست آوردن زاویه‌ای که جت در هنگام برخورد با سطح پرش با افق می‌سازد (θ)، باتوجه به شکل ۵ با نوشتن معادله مومتمم بین مقطع c و مقطع o معادله (۱۰) حاصل می‌شود:

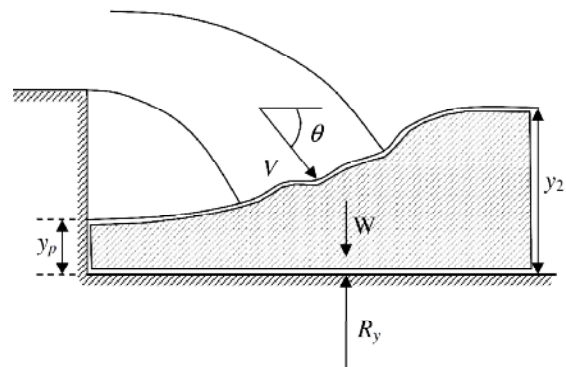
$$\frac{1}{2} \gamma y_c^2 = \rho q (v \cos \theta - v_c) \quad (10)$$

با ساده‌تر نمودن رابطه بالا، می‌توان نوشت:

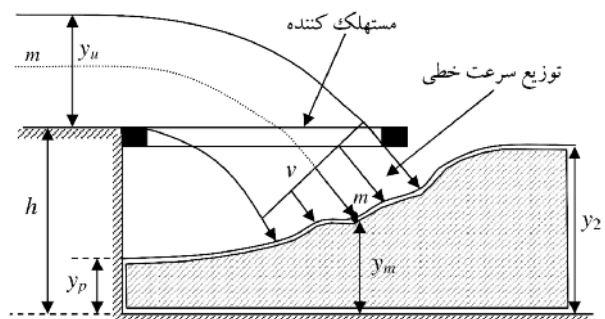
$$\cos \theta = \frac{\frac{g}{2} y_c^2 + q v_c}{q v} \quad (11)$$



شکل ۵: نمایی از وضعیت جریان در هنگام عبور از روی لبه شیب‌شکن و برخورد با پرش هیدرولیکی



شکل ۳: نمایی از حجم کنترل در نظر گرفته شده به منظور نوشتن رابطه‌ی مومتمم در راستای قائم



شکل ۴: توزیع سرعت در حد فاصل بین اولین و آخرین نقطه‌ی برخورد جت با سطح پرش هیدرولیکی

همچنین سرعت برخورد جت در میانه سطح معادل با سرعت متوسط (v) است. رابطه برنولی برای خط جریان $m-m$ با در نظر گرفتن فرضیات توزیع یکنواخت سرعت و توزیع هیدرواستاتیکی فشار در مقطع بالادست نوشته شده و روند تحلیل ادامه می‌یابد.

$$h + \frac{y_u}{2} + \frac{P_m}{\gamma} + \frac{v_u^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} + y_m \quad (4)$$

در این رابطه، با توجه به شکل ۴، h ارتفاع شیب‌شکن، y_u و v_u به ترتیب عمق و سرعت جریان در بالادست شیب-شکن، P_m فشار در نقطه m واقع در میانه مقطع u و y_m فاصله قائم نقطه m (واقع در مقطع سطح تماس جت ریزشی با سطح پرش) نسبت به کف کانال است. با فرض هیدرواستاتیک بودن فشار، P_m از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

و با توجه به $v_c = (q^2/g)^{1/3}$ می‌توان نوشت:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{3}{2} \frac{(gq)^{1/3}}{v} \right) \quad (12)$$

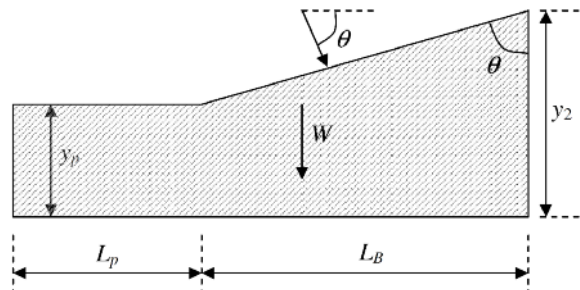
برای به‌دست آوردن W با توجه به شکل ۶ و با فرض خطی بودن سطح آب در ناحیه تشکیل پرش و اینکه عمق اولیه پرش در این حجم تنها برای محاسبه W برابر با y_p در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت:

$$W = \gamma \cdot V = \gamma \left(\frac{y_p + y_2}{2} \cdot L_B + y_p \cdot L_p \right) \quad (13)$$

که L_p و y_p به ترتیب عمق و طول حوضچه تشکیل شده در پای شیب‌شکن هستند و L_B طول حوضچه آرامش است. برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی رابطه تجربی ذیل پیشنهاد می‌شود (بخشیان ۱۳۹۰):

$$\frac{L_B}{h} = 0.650 \left(\frac{y_c}{h} \cdot \frac{L_G}{B} \right)^{0.459} \left(\frac{W}{D} \right)^{0.645} \quad (14)$$

که W عرض شیارها، B عرض کانال و D عرض تیغه مستهلک‌کننده است. برای محاسبه L_p از روابط حرکت پرتابه‌ای استفاده شده است.



شکل ۶ حجم کنترل در نظر گرفته شده برای محاسبه W

با فرض اینکه ذرات آب با زاویه‌ای نزدیک به افق از لبه شیب‌شکن پرتاب و در فاصله‌ای به اندازه y_p نسبت به کف کانال پایین‌دست شیب‌شکن با سطح استخر برخورد نمایند، با توجه به شکل ۶ می‌توان نوشت:

$$L_p = \alpha v_c \times t \quad (15)$$

$$h - y_p = \frac{1}{2} g t^2 \quad (16)$$

در رابطه (۱۵)، t مدت زمان طی شده برای حرکت ذره از

لحظه پرتاب از لبه شیب‌شکن تا لحظه برخورد با سطح استخر است و α ضریبی است که بر اساس تحقیقات فرو (۱۹۹۴) برابر با ۱/۳۱۲ در نظر گرفته شده است. با ترکیب روابط (۱۵) و (۱۶) رابطه‌ی (۱۷) برای محاسبه L_p به‌دست می‌آید.

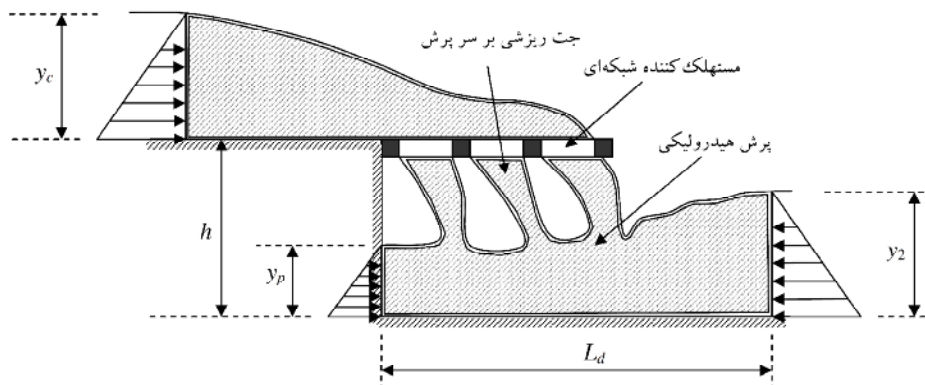
$$L_p = \alpha v_c \sqrt{\frac{2(h - y_p)}{g}} \quad (17)$$

بنابراین با محاسبه L_p ، L_B و y_p از رابطه (۱۳)، W محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی W در رابطه (۳) به‌دست می‌آید. بنابراین تمام مجهولات مسأله محاسبه می‌شود.

۲-۲- مدل تحلیلی شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شبکه‌ای

وضعیت جریان در شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شبکه‌ای مطابق با شکل ۷ مدل‌سازی شده است. با توجه به این که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی مکان شروع پرش در این مدل قابل تشخیص نیست، از پارامتر L_d (فاصله‌ی افقی بین انتهای گرداب پرش تا پای شیب‌شکن) به عنوان طول کلی حوضچه استفاده شده است. با فرض هیدرواستاتیک بودن فشار، صرف‌نظر از نیروی برشی ما-بین بستر و جریان در حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۷، فرض یکنواخت بودن توزیع سرعت و چشم-پوشی از اثرات هوا بر خصوصیات جریان، معادله مومنتم در راستای x به صورت رابطه (۳) درمی‌آید. با معلوم بودن پارامترهای v_c ، q ، v_c و v_2 عمق حوضچه تشکیل شده در پای شیب‌شکن (y_p) قابل محاسبه است.

برای تعیین سرعت متوسط برخورد جت با سطح پرش (۷)، در این مدل نیز فرض توزیع خطی سرعت در حد فاصل بین اولین و آخرین نقطه‌ی برخورد جت با سطح پرش اعمال شده است. همچنین سرعت برخورد جت در میانه سطح معادل با سرعت متوسط (۷) در نظر گرفته شده است.

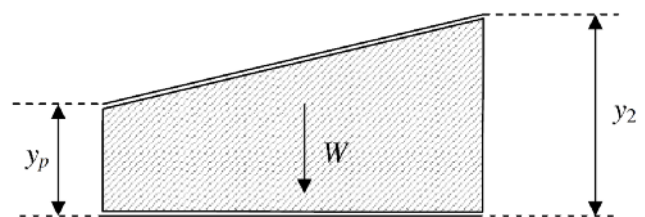


شکل ۷ مدل‌سازی وضعیت جریان در شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شبکه‌ای

در این حالت نیز با توجه به شکل ۴، رابطه برنولی برای خط جریان $m-m$ نوشته می‌شود. نهایتاً از رابطه (۷) برای محاسبه θ در این مدل همانند مدل شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیارى است. رابطه‌ی (۱۲) برای محاسبه‌ی θ استفاده شده است. با توجه به شکل ۸ از حجم کنترل مشخص شده برای محاسبه‌ی W با فرض این که سطح آب در حد فاصل بین انتهای پرش تا پای شیب‌شکن خطی است، استفاده شده است.

۳- مدل آزمایشگاهی و اطلاعات اندازه‌گیری شده

این تحقیق در کانال‌های آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. کانال شماره ۱ مستطیلی با عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و طول ۵/۸ متر است. کانال بر روی خرپای فلزی نصب شده است. در این کانال شیب‌شکن‌هایی به ارتفاع ۱۶ و ۲۱ سانتی‌متر طوری در کانال نصب شدند که فاصله آنها از ورودی کانال ۲/۸ متر بوده تا جریان قبل از رسیدن به شیب‌شکن کاملاً توسعه یافته شود. همچنین برای دستیابی به این هدف در مدخل ورودی کانال، صفحه مشبکی تعبیه شد تا جریان به آرامی به درون کانال وارد شود. توسعه‌یافتگی جریان با برداشت پروفیل‌های سرعت در مقاطع ۲، ۲/۳ و ۲/۵ متر از ابتدای کانال کنترل شد. شیب‌شکن مورد استفاده از جنس ورق فولادی و جنس جداره و کف کانال شیشه‌ای بوده است. کانال مورد نظر به صورت افقی تنظیم شد. در انتهای کانال یک سرریز لبه تیز مثلی تعبیه شده است. آب بعد از عبور از سرریز دوباره به مخزن ذخیره هدایت شده و به این ترتیب



شکل ۸ حجم کنترل در نظر گرفته شده برای محاسبه W

$$W = \gamma \cdot L_d \cdot \left(\frac{y_2 + y_p}{2} \right) \quad (18)$$

برای تعیین L_d رابطه تجربی (۱۹) پیشنهاد می‌شود (بخشیان ۱۳۹۰).

$$\frac{L_d}{h} = 1.545(N)^{0.4} \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.027} \left(\frac{b}{B} \right)^{0.4} \left(\frac{a}{B} \right)^{0.773} \quad (19)$$

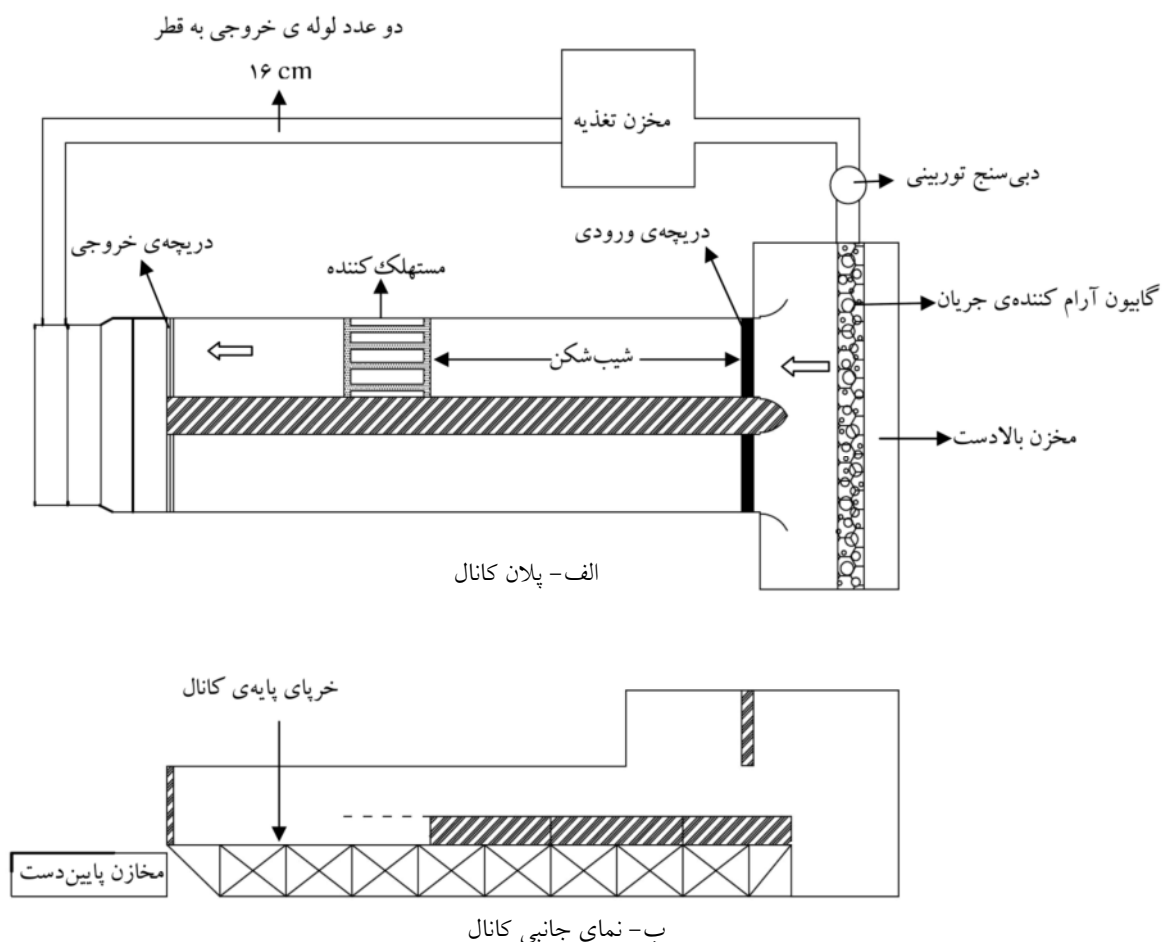
در رابطه (۱۹) B عرض کل مستهلک‌کننده، b بعد عرضی شبکه (بعد عمود بر راستای جریان)، a بعد طولی شبکه

کانال، صفحات مشبک فلزی در مدخل کانال نصب شده است.

شیب‌شکن به ارتفاع ۰/۴ متر و عرض ۰/۴۰۵ متر طوری در کانال نصب شده که فاصله آن از ورودی کانال ۶ متر است. شیب‌شکن مورد استفاده از جنس ورق فولادی است. جریان آب از مخزن زیرزمینی در بیرون آزمایشگاه، توسط پمپ با حداکثر دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه، در سیکل چرخش قرار می‌گیرد. آب از طریق لوله‌ای که از دبی‌سنج توربینی می‌گذرد، به کانال هدایت می‌شود. در ابتدا و انتهای کانال دریچه‌های کشویی برای تنظیم جریان نصب شده‌اند. در انتهای کانال چهار مخزن متوالی قرار دارد که به سرریز لبه تیز مستطیلی منتهی می‌شود و دبی جریان در این نقطه نیز قابل اندازه‌گیری است.

جریان سیکل بسته‌ای را طی می‌کند. در انتهای کانال دریچه‌ای کشویی برای تنظیم جریان قرار دارد. توسط پمپ دبی حداکثر برابر با ۱۲ لیتر بر ثانیه در سیکل چرخشی وارد می‌شود.

به علت کوتاه بودن طول و ارتفاع کانال و محدود بودن دبی جریان در کانال شماره (۱)، آزمایش‌هایی نیز در کانال بزرگ‌تر (کانال شماره ۲) انجام شد (شکل ۹). طول کلی کانال ۱۱ متر و عرض آن ۰/۴۰۵ متر است. کانال بر روی خرابایی فلزی نصب شده است. ارتفاع دیواره کانال در ۲/۵ متر اول برابر با ۱/۲ متر است که سپس به وسیله تبدیلی به طول ۰/۵ متر، ارتفاع آن به ۰/۷۵ متر کاهش می‌یابد. جنس بدنه کانال از شیشه سکوریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. به منظور ایجاد جریان توسعه یافته در



شکل ۹ نمایش از کانال آزمایشگاهی ۲،

ADV استفاده شده است. این دستگاه بر روی ریل‌هایی نصب و به راحتی قابل جابجایی از مکانی به مکان دیگر است. برای تعیین عمق و طول گرداب از خطکش‌های مدرج که بر روی دیواره شیشه‌ای کانال نصب شده بود، استفاده شده است. عمق گرداب در پایین دست دیوار قائم شیب‌شکن، در محل برخورد اولین جت نزولی با سطح استخر، در پای شیب‌شکن و همچنین در میانه فاصله اولین نقطه برخورد جت تا پای شیب‌شکن اندازه‌گیری شده است. به علت نوسانات عمق به ازای هر دبی مقادیر حداقل، حداکثر عمق آب در هر نقطه قرائت و با متوسط‌گیری از این اعماق، عمق متوسط در سه نقطه ذکر شده محاسبه شده است. برای اندازه‌گیری طول حوضچه، فاصله محل برخورد اولین جت تا پای شیب‌شکن در مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای ملاک عمل بوده است. در مستهلک‌کننده‌های شیاری فاصله اولین نقطه برخورد جت با سطح حوضچه تا دیواره قائم شیب‌شکن ملاک اندازه‌گیری قرار گرفته است. به منظور محاسبه نیروی عکس‌العمل وارد بر کف در راستای قائم در پایین دست شیب‌شکن، پیزومترهایی در کف نصب شدند.

در کانال شماره ۱، ۶ عدد پیزومتر به فواصل ۵ سانتی‌متر از هم و پیزومتر اولی به فاصله ۵ سانتی‌متر از لبه شیب‌شکن نصب شدند. در کانال شماره ۲، ۱۵ عدد پیزومتر به فواصل ۱۵ سانتی‌متر از هم بر روی کف کانال نصب شدند. پیزومتر اولی به فاصله ۲ سانتی‌متر از پای شیب‌شکن نصب شد. در تمام آزمایش‌ها، لوله‌های پیزومتر از نظر ورود حباب‌های هوا کنترل می‌شدند. بر اثر اغتشاشات شدید به خصوص در نواحی برخورد جت نزولی به کف نوسانات فشار در کف حوضچه بوجود می‌آید. برای بررسی مقادیر فشار اعمالی به کف حوضچه، با توجه به نوسانات شدید فشار و عدم دقت مناسب استفاده از پیزومتر در این شرایط، برای کاهش خطای

در این آزمایش‌ها از پنج عدد مستهلک‌کننده شبکه‌ای با ابعاد شبکه‌های متفاوت و سه عدد مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیارهای متفاوت استفاده شده است. برای ساخت تمامی مستهلک‌کننده‌ها از قوطی 2×2 استفاده شده است. ابعاد شبکه‌های مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای (2×6) ، (4×6) ، (6×6) ، (4×4) و (4×8) ، (a) بعد طولی شبکه در راستای جریان به سانتی‌متر $b \times$ بعد عرضی شبکه عمود بر راستای جریان به سانتی‌متر) و طول مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای (L) در کانال‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب 0.7 و $1/2$ متر بوده است (جدول ۱).

مستهلک‌کننده‌های شیاری در کانال‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب به طول 0.45 و 0.7 متر و عرض شیارهای (W) ، ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند (جدول ۲). در کانال شماره ۱ و در سری آزمایش‌های اولیه، ۸ عدد مستهلک‌کننده شیاری و شبکه‌ای ذکر شده به طور جداگانه در هر آزمایش بر روی لبه شیب‌شکن به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر نصب شدند و در هر آزمایش به ازای پنج دبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از ارزیابی کارایی مستهلک‌کننده‌ها از نظر استهلاک انرژی در سری اولیه آزمایش‌ها، سه عدد مستهلک‌کننده شبکه‌ای و دو عدد مستهلک‌کننده شیاری که تأمین کننده اهداف تحقیق بودند، به طور جداگانه در هر آزمایش بر روی لبه شیب‌شکن به ارتفاع ۲۱ سانتی‌متر نصب و در هر آزمایش به ازای پنج دبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۳).

در کانال شماره ۲، آزمایش‌های نهایی انجام شده است. سه عدد مستهلک‌کننده شبکه‌ای و دو عدد مستهلک‌کننده شیاری انتخاب شده و بر اساس نتایج آزمایش‌های قبلی بر روی لبه شیب‌شکن به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر نصب و در هر آزمایش به ازای هفت دبی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۴). عمق آب توسط عمق‌سنج قرائت شده است. برای تعیین پروفیل سرعت از سرعت سنج صوتی

اندازه‌گیری در طول آزمایش‌ها در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه (۴ بار در هر آزمایش) مقادیر حداکثر و حداقل ارتفاع پیزومتری قرائت شد و با میانگین‌گیری از این مقادیر ارتفاع پیزومتری نهایی محاسبه شد.

ارائه روشی نیمه تحلیلی به منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر جریان پرداخته می‌شود. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، در مستهلک‌کننده‌های شیاری جریان پس از عبور از روی شیارها، به جت‌هایی نواری تبدیل شده و بر روی سطح پرش، سقوط می‌کرد. با کاهش دبی، طول جت‌های نواری و میزان ریزش آنها بر سر پرش کاهش می‌یافت.

۴- تحلیل نتایج

در این بخش، به تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و

جدول ۱ اطلاعات مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای ارزیابی شده

N2x6		N6x6		N4x6		N4x8		N4x4	
a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)
۶	۲	۶	۶	۶	۴	۸	۴	۴	۴

جدول ۲ اطلاعات مستهلک‌کننده‌های شیاری ارزیابی شده

G ₂	G ₄	G ₆
w(cm)	w(cm)	w(cm)
۲	۴	۶

جدول ۳ اطلاعات آزمایش‌های اولیه انجام شده بر روی کانال شماره ۱

دبی (Q, lit/s)	۶-۱۲
عدد فرود بالادست (Fr _u)	۰/۶-۰/۸۵
عمق ثانویه پرش (y ₂ , cm)	۵-۱۱
عمق بحرانی (y _c , cm)	۳/۴-۵/۲
عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری (Fr)	۱/۳-۲/۹
عمق استخر ایجاد شده در پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری (y _p cm)	۵/۸-۱۲
عمق استخر ایجاد شده در پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای (y _p cm)	۵/۲-۸/۵

جدول ۴ اطلاعات آزمایش‌های نهایی انجام شده بر روی کانال شماره ۲

دبی (Q, lit/s)	۲۰-۵۰
عدد فرود بالادست (Fr _u)	۰/۷۵۸-۰/۹۴
عمق ثانویه پرش (y ₂ , cm)	۶-۲۲
عمق بحرانی (y _c , cm)	۶/۳-۱۱/۵
عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری (Fr)	۱/۵-۵/۷
عمق استخر ایجاد شده در پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شیاری (y _p cm)	۸/۱-۱۶/۷
عمق استخر ایجاد شده در پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای (y _p cm)	۱۰-۱۹

افزایش بعد طولی شبکه در راستای جریان تعداد نقاط حداکثر و حداقل و دامنه نوسانات کاهش یافته است. ضمناً تعداد نوسانات در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری نسبت به شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای کمتر است.

با توجه به شکل ۱۰- الف که مربوط به شیب‌شکن شبکه‌ای 4×4 و ارتفاع شیب شکن ثابت (برابر با ۴۰ سانتی‌متر) است، به‌ازای $Q=50 \text{ lit/s}$ حداکثر فشار در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از پای شیب‌شکن رخ می‌دهد. در حالی که این فاصله به ازای $Q=20 \text{ lit/s}$ از پای شیب‌شکن برابر ۳۵ سانتی‌متر است. همچنین در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای 6×4 با توجه به شکل ۱۰- ب به‌ازای $Q=50 \text{ lit/s}$ حداکثر فشار در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از پای شیب‌شکن اتفاق افتاده است، در حالی که این فاصله به ازای $Q=20 \text{ lit/s}$ برابر با ۳۰ سانتی‌متر است. لذا تأثیر تغییرات دبی در فاصله مذکور ناچیز است. با توجه به شکل ۱۱- الف مربوط به شیب‌شکن شیاری با عرض شیارهای ۲ سانتی‌متر و ارتفاع شیب‌شکن ۴۰ سانتی‌متر، به ازای $Q=50 \text{ lit/s}$ حداکثر فشار در فاصله ۴۶ سانتی‌متری از پای شیب‌شکن رخ داده است. در حالی که این فاصله به ازای $Q=20 \text{ lit/s}$ حدوداً برابر با ۴۰ سانتی‌متر است. در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیارهای ۴ سانتی‌متر (شکل ۱۱- ب) تأثیر تغییرات دبی محسوس‌تر است. به‌طوری‌که به ازای $Q=50 \text{ lit/s}$ حداکثر فشار در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از پای شیب‌شکن اتفاق می‌افتد. در حالی که این فاصله به ازای $Q=20 \text{ lit/s}$ برابر با ۳۶ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر تغییرات دبی ناچیز است و مشخصات فیزیکی مستهلک‌کننده‌ها عامل تأثیرگذارتری بوده است؛ به طوری‌که در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری هرچه عرض شیارها کمتر باشد، تأثیر تغییرات دبی در محل ایجاد حداکثر فشار کمتر است.

در اثر برخورد جت ریزشی با سطح پرش اغتشاش شدیدی در سطح جریان مشاهده می‌شد. اغتشاش شدید جریان سبب ورود حباب‌های هوا به جریان می‌شد. در این نوع مستهلک‌کننده‌ها پرش به وضوح قابل مشاهده بوده است. در مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای جریان پس از عبور از روی شبکه‌ها به صورت جت‌های متعددی درآمده و بر روی سطح پرش سقوط می‌کرد. به علت تعدد جت‌های ریزشی و برخورد آنها با سطح جریان اغتشاش شدیدی در سطح جریان مشاهده شد. این امر سبب می‌شد در این نوع مستهلک‌کننده‌ها محل شروع پرش به خصوص در کانال شماره ۲ که دبی جریان و تعداد جت‌ها بیشتر بوده است، به وضوح قابل مشاهده نباشد. مستهلک‌کننده شبکه‌ای سبب پخش شدن جریان و ریزش آن در طول بیشتری بر روی جریان پایین‌دست می‌شود.

۴-۱- ارزیابی فشار و نیروی عکس‌العمل سطح در پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده

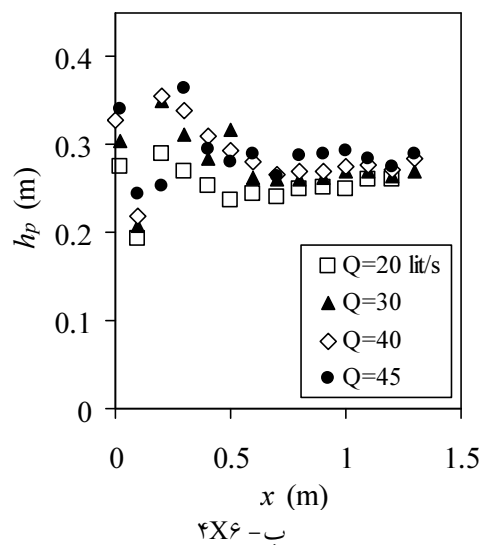
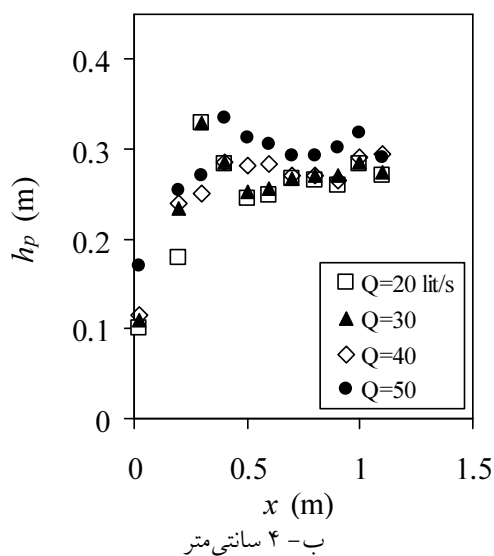
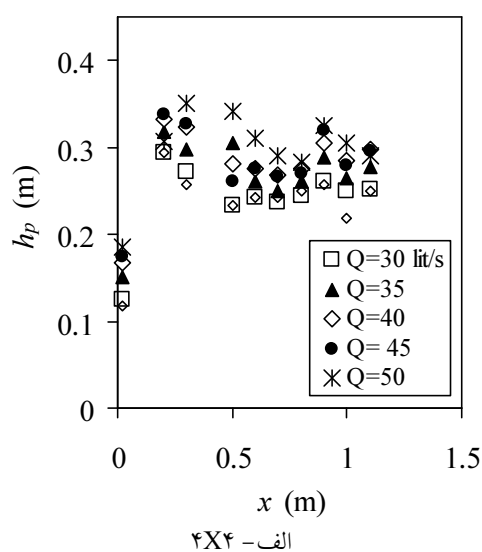
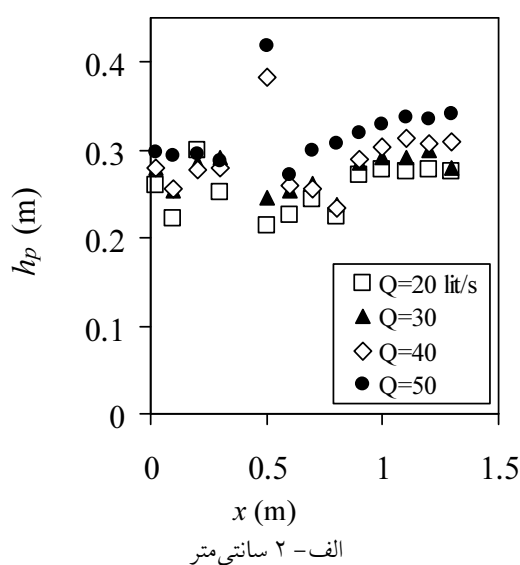
شکل‌های ۱۰- الف و ب به ترتیب مربوط به شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیار ۴ سانتی‌متر و شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیار ۲ سانتی‌متر هستند. با دقت در این اشکال می‌توان دریافت که دامنه نوسانات در حالت مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیار کوچکتر، بیشتر ولی نوسانات در مستهلک‌کننده شیاری با عرض بزرگتر، بیشتر بوده است. شکل‌های ۱۱- الف و ب ۱۱ به ترتیب توزیع فشار در بستر پایین-دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای 4×4 و 6×4 را نشان می‌دهند. با توجه به این اشکال، تغییرات فشار به صورت نوسانی است و با حرکت به سمت جلو، دامنه نوسانات کاهش یافته است. با افزایش دبی، تعداد نقاط حداکثر و حداقل افزایش یافته است. در دبی‌های بالا دامنه نوسانات شدیدتر و همچنین در دبی‌های پایین اختلاف فشار بین نقاط حداکثر و حداقل کمتر است. با

$$R_y = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(P_i + P_{i+1}) \cdot (L_{i+1} - L_i)] \quad (20)$$

در این رابطه R_y نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم در واحد عرض، P_i و P_{i+1} به ترتیب فشار در نقاط i و $i+1$ ، L_i و L_{i+1} به ترتیب فاصله پیزومتر i ام و $i+1$ ام از پای شیب‌شکن هستند. در تحقیق حاضر از اعداد برداشت شده توسط پیزومترهایی در حد فاصل بین پای شیب‌شکن تا انتهای پرش به منظور محاسبه R_y استفاده شده است.

با توجه به نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی نوسانات فشار در نقاطی که پیزومتر در محل برخورد جت‌های ریزشی با کف کانال قرار داشته، دامنه بیشتری نسبت به سایر نقاط داشته است. با افزایش دبی، فاصله محل تشکیل حداکثر فشار از پای شیب‌شکن در هر دو مستهلک‌کننده شیاری و شبکه‌ای افزایش یافته است.

برای محاسبه نیروی عکس‌العمل سطح از رابطه (20) (مینگ هانگ و همکاران 2010)، استفاده شد.



شکل ۱۱ توزیع فشار در بستر پایین دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری با عرض شیاری متفاوت

شکل ۱۰ توزیع فشار در بستر پایین دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای

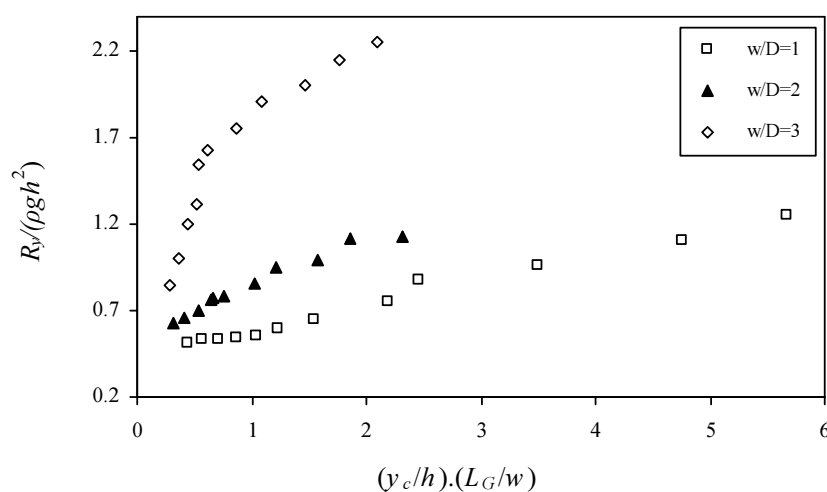
در شکل ۱۲ تغییرات $R_y/(\rho gh^2)$ در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری به ازای تغییرات $(y_c/h).(L_G/w)$ بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. با توجه به شکل در شیب‌شکن‌های شیاری به ازای عرض شیار ثابت با افزایش دبی، R_y افزایش می‌یابد. ضمناً به ازای دبی ثابت با کاهش عرض شیارها، $R_y/(\rho gh^2)$ کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت، هرچه تعداد شیارها بیشتر باشد، نیروی عکس‌العمل سطح کمتر است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از تأثیر کاهش عرض شیارها در کاهش طول پرش باشد. زیرا نیروی عکس‌العمل سطح در حد فاصل بین پای شیب‌شکن تا انتهای پرش در واحد عرض محاسبه شده است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴، تغییرات $R_y/(\rho gh^2)$ در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای را به ترتیب به ازای تغییرات $(q/(gh^3))^{0.5}$ و $n(b/B)$ نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۱۵ در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای با ابعاد شبکه ثابت، با افزایش دبی R_y افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۶ با ثابت نگه داشتن a/B و با افزایش $n(b/B)$ R_y افزایش می‌یابد و با ثابت نگه‌داشتن $n(b/B)$ و کاهش a ، R_y کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی پارامتر نیروی عکس‌العمل سطح در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی متغیرهای تأثیرگذار بر این عامل بررسی شده است. در نهایت متغیرهای؛ ارتفاع شیب‌شکن (h) ، دبی در واحد عرض (q) ، L_G ، w ، دانسیته آب (ρ) و شتاب ثقل (g) به عنوان پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شدند. به این ترتیب با استفاده از آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام چهار پارامتر بی‌بعد به دست می‌آید که رابطه بین آنها به صورت زیر تعریف شده است:

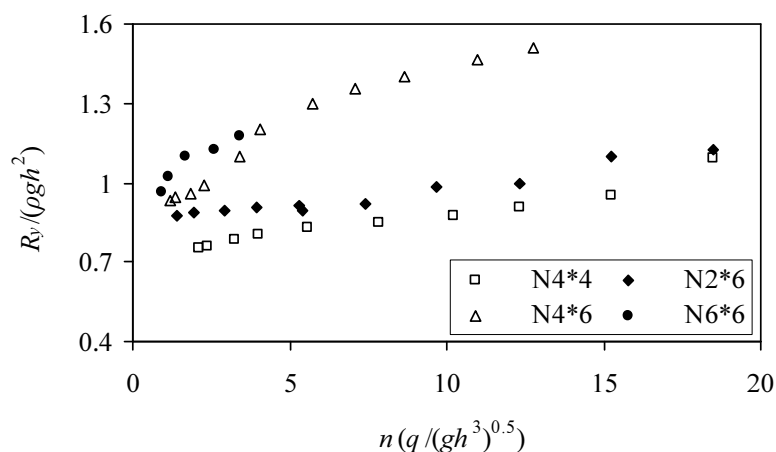
$$\frac{R_y}{(\rho gh^2)} = f\left(\frac{q^2}{(gh^3)}, \frac{L_G}{w}, \frac{w}{D}\right) \quad (21)$$

در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای متغیرهای؛ ارتفاع شیب‌شکن (h) ، دبی در واحد عرض (q) ، a/B ، b/B ، n (تعداد کل شبکه‌هایی که جریان از روی آن عبور می‌نماید)، ρ و g به عنوان پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شدند. با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام، رابطه بین پارامترهای بی‌بعد مؤثر به صورت زیر تعریف شده است:

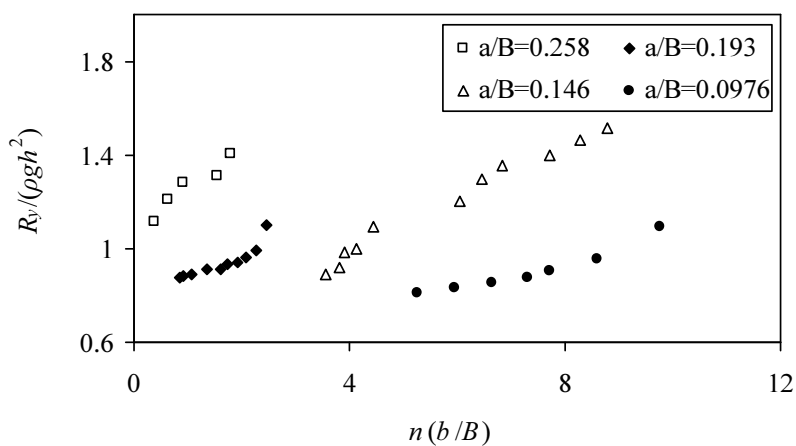
$$\frac{R_y}{(\rho gh^2)} = f\left(\frac{q^2}{(gh^3)}, \frac{b}{B}, \frac{a}{B}, n\right) \quad (22)$$



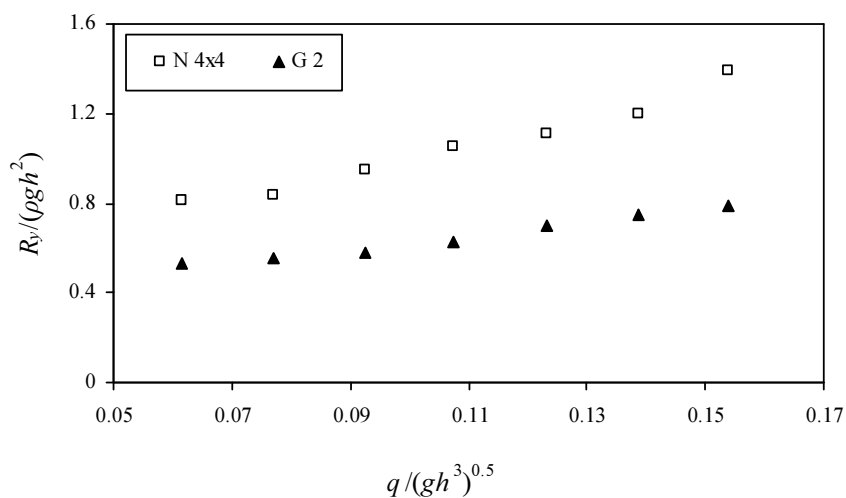
شکل ۱۲ نمودار تغییرات $R_y/\rho gh^2$ نسبت به تغییرات $(y_c/h).(L_G/w)$ در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری



شکل ۱۳ نمودار تغییرات $R_y / \rho g h^2$ نسبت به تغییرات $n \cdot q / (g h^3)^{0.5} \cdot (L_G/w)$ در مستهلک‌کننده شبکه‌ای



شکل ۱۴ نمودار تغییرات $R_y / \rho g h^2$ نسبت به تغییرات $n \cdot b/B$ در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای



شکل ۱۵ مقایسه نیروی عکس‌العمل سطح در مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای و شیاری

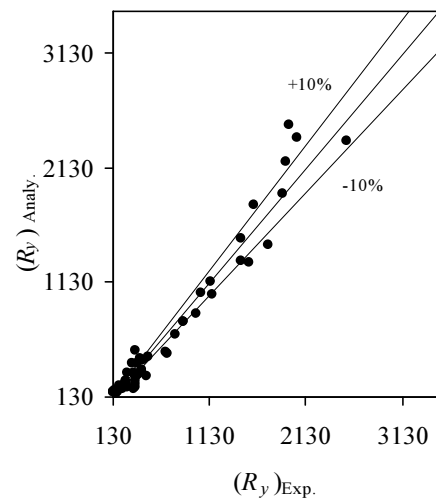
مستهلك‌کننده شیاری به صورت نوارهایی جریان می‌یابد. بنابراین فشار در حالتی که از مستهلك‌کننده شبکه‌ای استفاده می‌شود، به صورت بهینه‌تری در سطح نسبت به مستهلك‌کننده شیاری توزیع می‌شود. از آنجا که پیژومترها فشار نقطه‌ای را نشان می‌دهند، طبیعی است که اعداد قرائت شده در شیب‌شکن با مستهلك‌کننده‌ی شبکه‌ای کمتر از شیب‌شکن با مستهلك‌کننده‌ی شیاری باشد. نیروی ذکر شده در حد فاصل پای شیب‌شکن تا انتهای پرش (که عبارت است از فاصله طولی پرش به اضافه طول استخر L_d) محاسبه شده است. از آنجا که تأثیر مستهلك‌کننده‌های شبکه‌ای در کاهش طول پرش بیشتر است، با توجه به رابطه (۲۰) مقدار نیروی محاسبه شده در مستهلك‌کننده شبکه‌ای کمتر به دست آمده است. ضمناً در مستهلك‌کننده شبکه‌ای، هرچه جریان از روی تعداد شبکه‌های بیشتری عبور نماید، نیروی عکس‌العمل سطح کمتر است.

۴-۲- روابط تجربی به منظور تخمین نیروی عکس‌العمل سطح

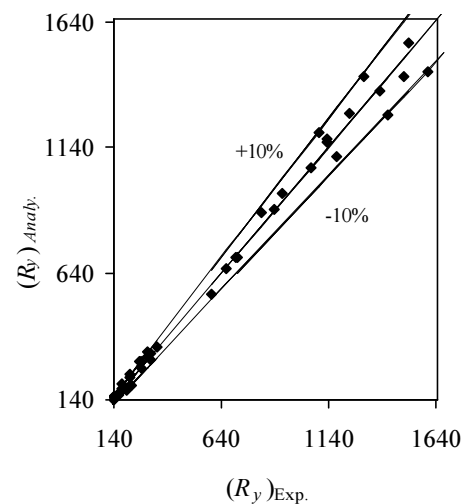
در این قسمت به ارائه‌ی روابط تجربی بر اساس نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. برای تعیین میزان خطای روابط تجربی بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از توابع خطای $NRMSE$ و WQD استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS رابطه (۲۳) برای تخمین نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم در حد فاصل پای شیب‌شکن با مستهلك‌کننده شیاری تا انتهای پرش ارائه شده است.

$$\frac{R_y}{\rho g h^2} = \left(\frac{q}{(g h^3)^{0.5}} \cdot \frac{L_G}{w} \right)^{-0.989} (w / D)^{-0.990} \quad (23)$$

مقدار ضریب همبستگی این رابطه برابر با ۰/۹۲۱ و پارامترهای دیگر برای صحت‌سنجی رابطه به دست آمده



الف- مستهلك‌کننده شیاری



ب- مستهلك‌کننده شبکه‌ای

شکل ۱۶ مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۱۵ مقایسه بین نیروی عکس‌العمل سطح به ترتیب برای شیب‌شکن با مستهلك‌کننده شیاری و شیب‌شکن با مستهلك‌کننده شبکه‌ای بر حسب دبی ارائه شده است. مقدار نیروی محاسبه شده در مستهلك‌کننده شیاری بهینه با عرض شیارهای ۲ سانتی‌متر از مستهلك‌کننده شبکه‌ای $N4 \times 4$ کمتر است.

در مستهلك‌کننده‌های شبکه‌ای جریان پس از عبور از روی شبکه‌ها به صورت رشته‌هایی از جریان در آمده و بر سر جریان در استخر پاشیده می‌شود، در حالی که در

1. Normalized Root Mean Square
2. Weighted Quadratic Deviation

در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای، جریان پس از عبور از روی مستهلک‌کننده، بسته به این که از روی چه تعداد شبکه عبور نموده است، به صورت جت‌هایی از جریان در آمده و بر روی پرش هیدرولیکی تشکیل شده پاشیده شده و سبب به وجود آمدن چندین حوضچه در پای شیب‌شکن می‌شود. زاویه برخورد جت با سطح حوضچه در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری از شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای کمتر، اما از شیب‌شکن بدون مستهلک‌کننده بیشتر است.

در شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شبکه‌ای، پارامترهای ارتفاع مؤثر شیب‌شکن، دبی جریان در واحد عرض، نسبت بعد عرضی شبکه مستهلک‌کننده به عرض کل مستهلک‌کننده، نسبت بعد طولی شبکه به عرض کل مستهلک‌کننده و تعداد شبکه‌هایی که جریان از روی آن عبور می‌نماید، بر هیدرولیک جریان تأثیرگذار هستند. با ثابت نگه داشتن دبی، در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای هرچه جریان از روی تعداد شبکه‌های بیشتری عبور نماید، عمق حوضچه ایجاد شده در پای شیب‌شکن بیشتر است. توزیع فشار در بستر پایین‌دست شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای به صورت نوسانی است. با حرکت به سمت پایین‌دست، از دامنه نوسانات کاسته می‌شود. با ثابت نگه داشتن بعد عرضی شبکه‌ها با افزایش دبی و کاهش بعد طولی شبکه‌ها تعداد نقاط حداکثر و حداقل افزایش می‌یابد.

در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری هرچه عرض شیارها کمتر باشد، دامنه نوسانات فشار در بستر پایین‌دست بیشتر است. با افزایش دبی دامنه نوسانات افزایش می‌یابد و میزان نوسانات در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری نسبت به مستهلک‌کننده شبکه‌ای کمتر می‌شود. مدل تحلیلی ارائه شده برای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری برآورد دقیق‌تری از پارامترهای مؤثر بر جریان ارائه می‌دهد. در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای، به دلیل

$NRMSE = 0/0735$ و $WQD = 0/0169$ تعیین شدند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی رابطه (۲۴) برای تخمین نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم در حد فاصل پای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای تا انتهای پرش ارائه شده است.

$$\frac{R_y}{\rho gh^2} = 4.268.(n)^{-0.662} \left(\frac{q}{(gh^3)^{0.5}}\right)^{0.123} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.828} \left(\frac{a}{B}\right)^{0.365} \quad (24)$$

ضریب همبستگی این رابطه $0/902$ ، $0/082$ و $NRMSE = 0/016$ به دست آمده است.

۴-۳- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

در شکل‌های ۱۶- الف و ب مقادیر عکس‌العمل سطح به ترتیب مربوط به شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای و شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری ارائه شده است. محور افقی مقادیر نیروی عکس‌العمل سطح حاصل از نتایج آزمایشگاهی و محور قائم مقادیر حاصل از روش تحلیلی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌سازی تحلیلی شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است. با توجه به شکل ۱۶- الف نیروی محاسبه شده برای شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شبکه‌ای از روش تحلیلی در اکثر موارد کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

در شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیاری، جریان پس از عبور از روی مستهلک‌کننده به صورت نوارهایی از جریان تقسیم شده و با تنظیم ارتفاع بازشدگی دریاچه‌ی پایین‌دست بر روی پرش هیدرولیکی تشکیل شده پنخس می‌شود. در شیب‌شکن قائم با مستهلک‌کننده شیاری، پارامترهای ارتفاع مؤثر شیب‌شکن، دبی جریان در واحد عرض و نسبت عرض شیارهای مستهلک‌کننده به عرض تیغه‌های مستهلک‌کننده، بر هیدرولیک جریان مؤثر هستند.

y_2	عمق آب در پایین دست شیب‌شکن
y_c	عمق بحرانی
y_p	عمق استخر تشکیل شده در پای شیب‌شکن
y_u	عمق جریان در بالادست شیب‌شکن
α	ضریب
γ	وزن مخصوص آب
θ	زاویه برخورد جت با سطح آب نسبت به راستای افق
ρ	جرم مخصوص آب

۷- منابع

بخشیان، ا. (۱۳۹۰). هیدرولیک جریان در حوضچه‌های آرامش شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌های شیبی- شبکه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

بیرامی، م. ک.، (۱۳۸۴). *سازه‌های انتقال آب*، دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ نهم.

Bakmeteff, M.W., (1932). *Hydraulics of open channels*, McGraw-Hill: New York.

Moore, W.L., (1943). "Energy loss at the base of free overfall", *Transaction ASCE*, Vol. 108, pp. 1343-1360.

Rose, H., (1943). "Discussion of Moore", *Transaction ASCE*, Vol. 108, pp. 1383-1387.

Rand, W., (1955). "Flow geometry at straight drop spillways", *Transaction ASCE*, Vol. 81, pp. 1-13.

Rajaratnam N. and Chamani M.R., (1995). "Energy loss at drops", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 373-384.

Chamani, M.R. and Beirami, M.K., (2002). "Flow characteristic at drops", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 8, pp.788-791.

Lin, C., Hwung, 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*, Vol. 45, No. 1, pp. 33-42.

Ming Hong Y., Shin Huang H. and Wan S., (2010). "Drop characteristic of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 125-129.

Chanson H., (1999). "Energy dissipation and drop

آشفتگی شدید جریان در شرایط واقعی و عدم لحاظ نمودن ورود حباب‌های هوا به جریان در مدل تحلیلی، هم‌خوانی کمتری بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نسبت به مدل شیب‌شکن با مستهلک‌کننده شیبی حاصل می‌شود.

۶- فهرست علائم

a	بعد طولی شبکه در راستای جریان
B	عرض کانال
b	بعد عرضی شبکه عمود بر راستای جریان
g	شتاب ثقل
H_e	هد جریان در بالادست نقطه سقوط
h	ارتفاع شیب‌شکن
L_B	طول حوضچه آرامش
L_G	طول سازه
L_i	فاصله پی‌زومتر i ام از پای شیب‌شکن
L_{i+1}	فاصله پی‌زومتر $i+1$ ام از پای شیب‌شکن
L_p	طول حوضچه تشکیل شده در پای شیب‌شکن
n	تعداد شیارها
P_i	فشار در نقطه i
P_{i+1}	فشار در نقطه $i+1$
P_m	فشار در نقطه m واقع در میانه مقطع
q	دبی جریان در واحد عرض
R_y	نیروی عکس‌العمل سطح در راستای قائم در واحد عرض حجم کنترل
t	زمان حرکت ذره از لحظه پرتاب از لبه شیب‌شکن تا لحظه برخورد با سطح استخر
v	سرعت متوسط برخورد جت ریزشی با سطح پرش
v_2	سرعت متوسط جریان در مقطع ۲
v_c	سرعت متوسط جریان در مقطع c
v_u	سرعت جریان در بالادست شیب‌شکن
W	وزن حجم کنترل در واحد عرض
w	عرض شیارها

Petit, L., Blanpain, O., and Al-Hajjar, J. (1998). "Sensitivity analysis of Muskinghum model to the inaccuracy of data describing the urban drainage networks", *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydro-informatics*, 1137-1144, Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

structure in ancient time: the Roman dropshaft's", *Water 99 Joint Congress*, pp. 978-992.

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*, Vol. 29, No. 4, pp. 523-529.