مقایسه آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی در شیب شکن‌ها

عادل مرادی سبزکوهی[۱]، سید محمود کاشفی پور[۲*] و محمود بینا[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۱۱)

چکیده

شیب شکن‌ها از جمله مهم‌ترین و رایج‌ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی در شبکه‌های آبیاری و آبراهه‌های فرسایش‌پذیر هستند. اتلاف انرژی در عبور جریان از شیب شکن به دو صورت شامل تلفات ناشی از شکل هندسی ساختمان شیب شکن و تلفات ناشی از وقوع پدیده پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین دست، رخ می‌دهد. شناخت بهتر پارامترهای مؤثر در تخمین خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله استهلاک انرژی ناشی از ساختمان شیب شکن و میزان افت انرژی پرش، کاهش ابعاد ساختمانی این سازه هیدرولیکی و حوضچه پایین دست آن را موجب شده و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر شرایط هندسی و هیدرولیکی شیب شکن‌ها در میزان استهلاک انرژی ساختمان شیب شکن، پس از شناخت پارامترهای مؤثر در این خصوص، برای ۳ نوع رایج، شامل شیب شکن قائم، مایل مستطیلی و پلکانی با ساخت مدل‌های فیزیکی در ۲ ارتفاع، ۲ شیب مجرا و ۲ تعداد پله متفاوت و انجام آزمایش‌ها در ۹۰ دبی مختلف میزان استهلاک انرژی ساختمان شیب شکن، تعیین و مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده مشترک متغیرهای مورد بررسی بیشترین استهلاک انرژی مربوط به شیب شکن قائم است.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های هیدرولیکی، استهلاک انرژی، شیب شکن

۱. مربی آبیاری، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
۲. به ترتیب استاد و دانشیار سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kashefipour@excite.Com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]

مقدمه

شیب شکن‌ها (Drop structures) به سبب سادگی ساخت و بهره‌برداری از جمله رایج ترین ساختمان‌های آبی جهت کاهش انرژی جریان آب در شبکه‌های آبیاری، آبراهه‌های فرسایش‌پذیر، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه آب و فاضلاب هستند که معمولاً در ترکیب با انواع موانع(Baffle) و کف بند (Apron) در پایین دست می‌توانند حالت‌های متنوعی از سازه‌های هیدرولیکی مستهلک کننده انرژی (Energy dissipator) را شکل دهند.

به غیر از کاربرد اصلی فوق ممکن است از شیب شکن‌ها در موارد زیر نیز استفاده شود:

۱- تثبیت بستر آبراهه به دلیل تلف نمودن انرژی اضافی

۲- محدود کردن فرسایش جدار آبراهه‌ها

۳- افزایش هوادهی جریان در اثر پرش هیدرولیکی و ایجاد تلاطم بیشتر (کاربرد در سیستم‌های تصفیه فاضلاب و پروش‌آبزیان)

۴- استفاده از شیب شکن‌ها برای ایجاد تلاطم کنترل شده در آبراهه‌ها با اهداف تفریحی از جمله قایقرانی در آب‌های خروشان

۵- ایجاد عمق در اثر پس زدگی آب و ایجاد شرایط مساعد تغذیه آبخوان‌های زیرزمینی

اتلاف انرژی در عبور جریان از شیب‌شکن به دو صورت شامل تلفات ناشی از شکل هندسی ساختمان شیب‌شکن (جهت اختصار، به این بخش از تلفات استهلاک انرژی سازه اطلاق شده است) و تلفات ناشی از وقوع پدیده پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین دست، رخ می‌دهد. شناخت بهتر پارامترهای مؤثر در تخمین خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله استهلاک انرژی سازه و میزان افت انرژی پرش، کاهش ابعاد ساختمانی این سازه هیدرولیکی و حوضچه پایین دست آن را موجب شده و از این نظر با توجه به تعدد کاربرد چنین ابنیه‌هایی صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی را ایجاد می‌کند.

در این تحقیق تأثیر شرایط هیدرولیکی و هندسی فرم شیب‌شکن‌ها روی استهلاک انرژی سازه برای ۳ نوع رایج‌تر شامل قائم (Straight drop)، مایل(Inclined drop) و پلکانی(Stepped drop) بررسی شده است.

هیدرولیک جریان و پیشینه موضوع

در شکل ۱ شماتیکی از شیب شکن قائم و اجزاء مختلف هندسی و هیدرولیکی آن نشان داده شده است. در این شکل y_c، y_b، y_1، y_2 و y_p به ترتیب عمق بحرانی جریان قبل از شیب شکن، عمق روی لبه شیب شکن، عمق قبل از پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه پرش و عمق زیر جت ریزشی جریان می‌باشد. هم‌چنین H_0، ΔH، ΔH_j، ΔH_t، ΔZ و ϕ به ترتیب انرژی مخصوص جریان قبل از شیب شکن، استهلاک انرژی سازه، تلفات انرژی پرش، تلفات انرژی کل، ارتفاع هندسی شیب شکن و زاویه برخورد جت ریزشی به حوضچه زیرین است.

وایت (۱۷) رابطه زیر را برای تخمین عمق y_1 قبل از پرش در شیب شکن قائم ارائه نمود که در استاندارد USBR برای طراحی استفاده شده است (۱۵):

$$\frac{y_1}{y_c}=\frac{\sqrt{2}}{1.0461+\sqrt{1.5+\Delta Z/y_c}} \qquad [1]$$

با استفاده از رابطه فوق انرژی جریان در مقطع قبل از پرش، (H_1) از رابطه زیر قابل حصول است:

$$\frac{H_1}{y_c}=\frac{\sqrt{2}}{1.0461+\sqrt{1.5+\Delta Z/y_c}}+0.25\left(1.0461+\sqrt{\frac{\Delta Z}{y_c}+1.5}\right)^2 \qquad [2]$$

از طرفی کل انرژی جریان قبل از شیب شکن(H_t) را در رژیم زیر بحرانی بالادست می‌توان به صورت زیر نوشت:

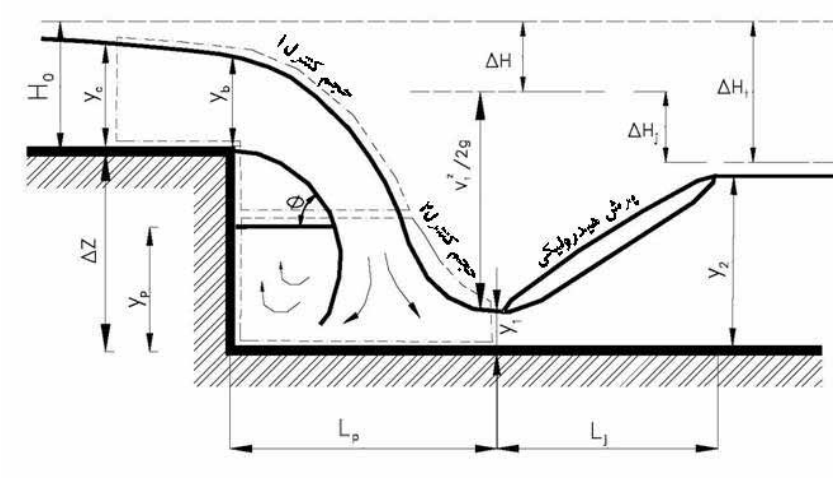
$$H_t=\Delta Z+1.5y_c \qquad [3]$$

نهایتا میزان نسبی استهلاک انرژی ساختمان شیب شکن از رابطه $\left(\frac{\Delta H}{H_t}=\frac{H_t-H_1}{H_t}\right)$ قابل محاسبه می‌باشد.

مطالعاتی نیز در خصوص شیب شکن‌های قائم توسط رند (۱۳) انجام شده که منجر به ارائه روابط زیر شد:

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل ۱. معرفی شیب شکن قائم و اجزا هندسی و هیدرولیکی آن

$$\frac{y_1}{y_c} = 0/54\left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0/275} \qquad [۴]$$

$$\frac{y_2}{\Delta Z} = 1/66\left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0/81} \qquad [۵]$$

$$\frac{y_p}{\Delta Z} = \left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0/66} \qquad [۶]$$

$$L_j = 6/9(y_2 - y_1) \qquad [۷]$$

$$\frac{L_p}{\Delta Z} = 4/3\left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0/81} \qquad [۸]$$

راجاراتنام و چمنی (۱۲) با صرف‌نظر کردن از پدیده دخول هوا و تنش برشی کف و کاربرد رابطه مقدار حرکت برای دو حجم کنترل ۱ و ۲ در شکل ۱ به ترتیب روابط زیر را به دست آوردند:

$$\frac{1}{2}\gamma y_c^2 + \rho q V_c = \rho q V \cos\phi \qquad [۹]$$

$$\rho q V \cos\phi + \frac{1}{2}\gamma y_p^2 = \rho q V_1 + \frac{1}{2}\gamma y_1^2 \qquad [۱۰]$$

که در این روابط q دبی در واحد عرض مجرا و V سرعت جریان در مرز بین دو حجم کنترل ۱ و ۲ می‌باشد. هم‌چنین با کاربرد رابطه انرژی رابطه زیر قابل استخراج است:

$$\Delta Z + 1/5 y_c = \frac{V^2}{2g} + y_p \qquad [۱۱]$$

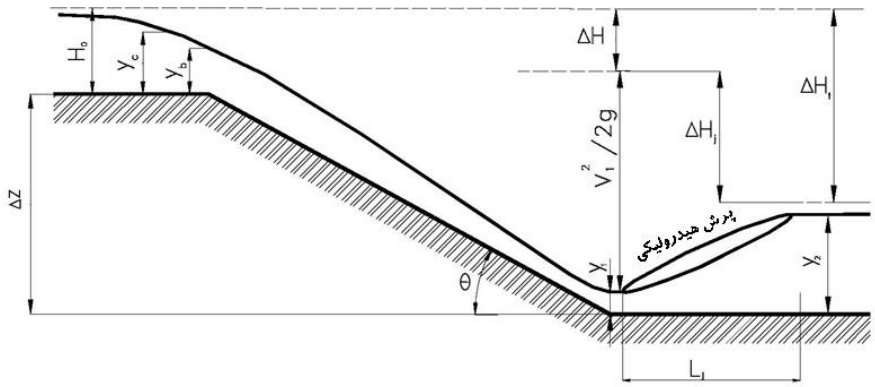
با استفاده از روابط بالا و رابطه تجربی زیر که توسط ایشان ارائه شده پارامترهای مجهول، V و y_1 و y_P به دست خواهند آمد:

$$y_p/\Delta Z = 1/107\ \left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0/719} \qquad [۱۲]$$

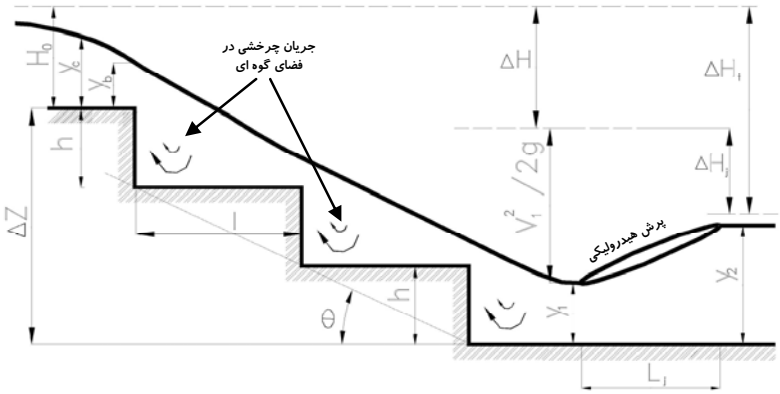
در شکل۲ تصویر شماتیکی از شیب شکن مایل(صاف) و اجزا هندسی و هیدرولیکی آن آورده شده است. پارامترهای مختلف این شکل مشابه شیب شکن قبل بوده و θ زاویه مجرا نسبت به افق است. در مقایسه با اینگونه سازه‌ها با مجرای صاف، با توجه به نقش پلکان‌ها در ایجاد زبری‌های بزرگ و تأثیر استهلاک انرژی سازه در کاهش ابعاد ساختمانی سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پایاب و نیز پیشرفت‌های ساخت و اجرای بتن غلطکی (RCC)، سازه‌های پلکانی از جمله شیب‌شکن‌های پلکانی و خصوصاً سرریزهای پلکانی (Stepped wiers) در سال‌های اخیر اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. در شکل ۳ شیب شکن پلکانی و اجزا مختلف هندسی و هیدرولیکی آن نمایش داده شده است. در این شکل h ارتفاع قائم و l طول افقی هر پلکان و ΔZ ارتفاع کل شیب شکن است. سایر پارامترها عیناً مشابه پارامترهای دو شیب شکن قبل تعریف می‌شود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل ۲. معرفی شیب شکن مایل و اجزای هندسی و هیدرولیکی آن



شکل۳. معرفی شیب شکن پلکانی و اجزا هندسی و هیدرولیکی آن

در حرکت جریان آب از روی پلکان‌ها دو نوع رژیم شامل رژیم ریزشی و رژیم رویه ای با خصوصیات مجزاء و یک رژیم تبدیلی حد واسط دو رژیم قبل شناخته شده است (۵). بیشتر تحقیقات صورت گرفته روی هیدرولیک مجاری پلکانی مربوط به مطالعات سرریزهای پلکانی است. علی‌رغم تبعیت کلی خصوصیات جریان در شیب شکن های پلکانی از ویژگی‌های جریان در سرریزهای پلکانی، برخی تفاوت‌ها که به نظر می‌رسد ناشی از ابعاد و اندازه‌های ساختمان شیب شکن نسبت به سرریزهای بزرگ است، باعث عدم حصول نتایج یکسان در موارد خاص بین دو سازه می‌شود.

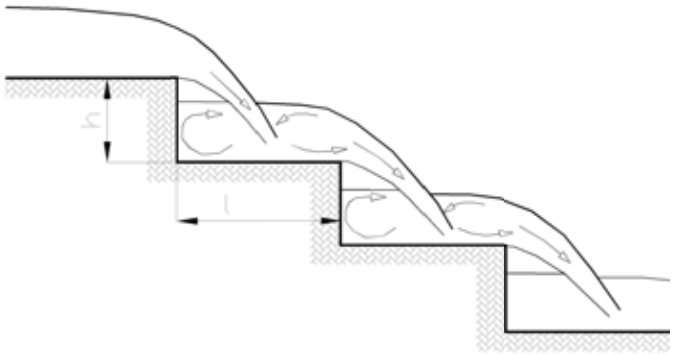
رژیم جریان ریزشی (Nappe Flow)

در رژیم جریان ریزشی پلکان‌ها به صورت یک سری شیب شکن قائم با استخر پایاب شکل گرفته در زیر آنها عمل می‌کنند (شکل۴). به طور کلی رژیم جریان ریزشی در دبی‌های کم و ارتفاع(نسبی) زیاد پلکان‌ها شکل می‌گیرد (۵). تحقیقات زیادی روی رژیم جریان ریزشی در گذشته صورت گرفته است (۴، ۵ و ۸). بر اساس تحقیقات چنسن (۵)، استهلاک نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان ریزشی دارای پرش هیدرولیکی کامل در حالت شوت‌های بدون دریچه با استفاده از اصول تئوریک و ادغام روابط پیشنهادی برای شیب شکن‌های قائم از رابطه زیر قابل استخراج است:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \left[\frac{0/54\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0/275} + \frac{3/43}{2}\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0/55}}{1/5 + \frac{H_t}{y_c}} \right] \qquad [13]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل۴. نحوه عبور جریان از روی پلکان‌ها در رژیم ریزشی

رژیم جریان رویه‌ای (Skimming flow)

در رژیم جریان رویه‌ای، جریان به صورت چسبیده به روی پله‌ها جریان می‌یابد. در این رژیم نوک پله‌ها به صورت نوعی کف کاذب عمل می‌نماید. در فضای گوه‌ای شکل بین پله‌ها قسمتی از جریان محصور شده و حالت چرخشی به خود می‌گیرد (شکل۳). قسمت عمده‌ای از استهلاک انرژی سازه در رژیم جریان رویه‌ای در نتیجه انتقال تنش برشی از جریان روی کف کاذب به جریان چرخشی محصور در فضای گوه‌ای بین پله‌ها وحفظ چرخش آن صورت می‌گیرد (۵). در جدول۱ خلاصه‌ای از نتایج چند تحقیق روی استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی گزارش شده در منابع برای رژیم جریان رویه‌ای آمده است. در روابط این جدول H_{res} کل انرژی باقیمانده در پنجه سرریز، H_{max} کل انرژی جریان در بالادست، H_{dam} ارتفاع سرریز و N تعداد پلکان است. در نتایج این تحقیقات که عمدتاً با فرض شکل گیری جریان یکنواخت آب- هوا روی مجرای پلکانی به دست آمده با افزایش تعداد پلکان‌ها میزان استهلاک انرژی نسبی $\Delta H/H_t$ افزایش می یابد. هم‌چنین سلماسی(۱) نشان داد که در رژیم رویه‌ای با فرض شکل‌گیری جریان یک‌نواخت آب و هوا روی مجرای پلکانی به ازای شرایط هندسی و هیدرولیکی یکسان، تأثیر افزایش تعداد پله‌ها در $\Delta H/H_t$ تا یک حدی مثبت و از آن به بعد منفی بوده که روشی نیز برای به دست آوردن آن ارائه نموده است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر هندسه شیب شکن و هیدرولیک جریان عبوری از آن در استهلاک انرژی سازه، پس از تعیین پارامترهای هندسی و هیدرولیکی تأثیرگذار، تعداد ۱۴ مدل فیزیکی از شیب‌شکن‌های قائم، مایل و پلکانی از جنس پلگسی گلاس به عرض ۲۵ سانتی‌متر در دو ارتفاع ۱۵/۵ و ۲۵/۵ سانتی‌متر، ۲ زاویه مجرا (زاویه θ در شکل‌های۲و۳) ۳۳/۷ و ۲۶/۶ درجه (که شیب‌های اجرایی هستند) و با تعداد ۳ و ۷ پلکان ساخته شده و با برقراری شرایط هیدرولیکی مختلف در ۹۰ دبی مختلف از ۱/۴ تا ۳۶/۹ لیتر در ثانیه، میزان اتلاف انرژی سازه مورد بررسی گرفت.

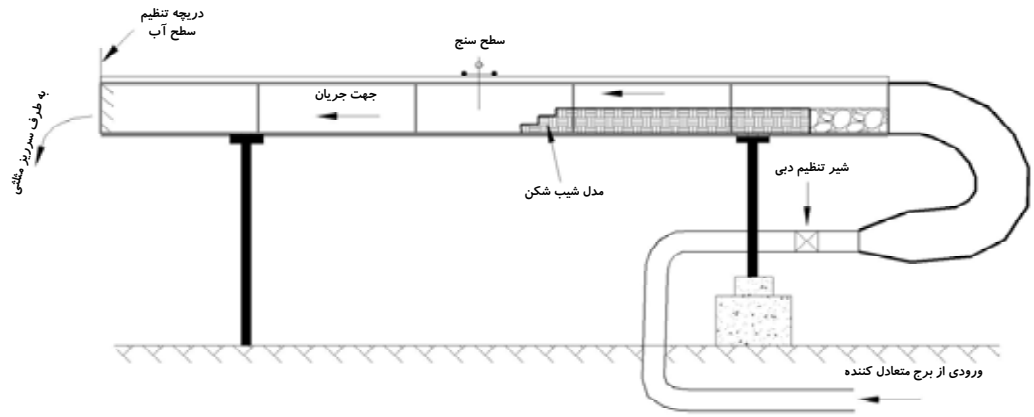
مراحل عملی و آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفت. در فلوم ۲۵ سانتی‌متری آزمایشگاه با طول ۱۰ متر و شیب طولی صفر، پس از نصب مدل‌های ساخته شده و برقراری شرایط ماندگار پارامترهای مختلف جریان اندازه‌گیری می‌شد. اندازه‌گیری عمق یا رقوم سطح جریان در هر مقطع با استفاده از سطح سنج با ورنیه با دقت۰/۱ میلی‌متر صورت می‌گرفت. برای اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از یک سرریز مثلثی ۵۳ درجه مجهز به سیستم سطح سنج الکتریکی و ورنیه با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده شده است. خلاصه‌ای از اطلاعات کلی آزمایش‌های صورت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]

جدول۱. نتایج برخی تحقیقات قبلی روی استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی با رژیم جریان رویه‌ای (۲، ۶، ۹، ۱۶)

ملاحظات	رابطه پیشنهادی	دبی مورد آزمایش	ارتفاع پلکان (mm)	تعداد پله	شیب مجرا (درجه)	عرض مدل (متر)	محقق
شیب اصطکاک در مقایسه با شوت صاف۲/۵ برابر شده است	$H_{res}/y_c = ۳/۵۷(y_c/h)^{-۰/۳۶}$	۰/۰۸تا۰/۱۶۴ متر مربع بر ثانیه	۱۴۳ و ۷۱	۱۸ و۱۰	۳/۴ و۵/۷	۰/۵	Chanson & Toombes(2002)
a = ۰/۵، b = ۱/۱۴ for Slope ۱۹deg a = ۳/۶، b = ۰/۸۱ for Slope ۳۰deg a = ۲/۱، b = ۰/۵۸ for Slope ۴۰،۵۰deg	$H_{res}/H_{max} = a(H_{dam}/y_c)^b$	۱۹۰تا۲۰ لیتر در ثانیه	۲۳/۱ و۹۳/۳	-	۳۰،۴۰ و۵۰	۰/۵	Valentin & et al.(2004)
$F = (f/8Sin\theta)\frac{1}{3}Cos\theta + \alpha/2$	$\frac{H_{res}}{H_{max}} = Exp\ [(-۰/۰۴۵\ (k/D_{h.w})^{۱/۱}(Sinq)^{-۱/۸})\frac{H_{dam}}{y_c}]$ for $\frac{H_{dam}}{y_c}$ ۱-۲۰ $\frac{H_{res}}{H_{max}} = F/(H_{dam}/y_c + F)$ for $\frac{H_{dam}}{y_c}$ ۱۵-۲۰	-	۲۳/۱ و۹۳/۳	-	۳۰،۴۰ و۵۰	۰/۵	Boes & Hager(2003)
متوسط ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ برای جریان آب – هوا ۰/۲۵ به دست آمده است	-	۱۸۱تا۴۳ لیتر در ثانیه	۵۰	۲۰	۲۱/۸	۱	Felder & Chanson(2009)



شکل ۵. تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق

گرفته روی مدل‌های مختلف تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به وقوع عمق بحرانی در فاصله کمی قبل از لبه شیب شکن در بالادست و اندازه‌گیری دبی جریان عبوری میزان انرژی جریان در بالادست مدل از رابطه ۳ به دست می‌آید، که در این رابطه H_t کل انرژی جریان در بالادست هر مدل، ΔZ ارتفاع دقیق هر مدل و y_c عمق بحرانی جریان عبوری از مدل‌هاست و از رابطه $y_c = \sqrt[۳]{(q^۲/g)}$ حاصل می‌شود. با اندازه‌گیری میزان انرژی در پایین دست سازه و اختلاف انرژی بالادست و پایین دست، افت انرژی سازه به دست می‌آید که نتیجه تأثیر توام شکل هندسی مدل و شرایط جریان در آن وجود دارد. برای تعیین میزان انرژی در پایاب مدل‌ها از دو روش

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]

جدول۲. خلاصه‌ای از اطلاعات آزمایش‌های انجام شده در تحقیق

تعداد آزمایشات	محدوده دبی (لیتر در ثانیه)	تعداد پله	زاویه مجرا (درجه)	نوع مدل شیب شکن
۱۲	۲/۴ – ۲۱/۸	۳	۳۳/۷	پلکانی
۱۰	۱/۷ – ۱۹/۸	۷	۳۳/۷	
۱۳	۲/۵ – ۲۴/۳	۳	۲۶/۶	
۱۴	۱/۴ – ۲۲/۹	۷	۲۶/۶	
۱۱	۳/۵ – ۳۱/۴	–	۳۳/۷	مایل صاف
۱۱	۲/۱ – ۳۶/۹	–	۲۶/۶	
۱۹	۲/۹ – ۲۹/۲	–	–	قائم

اندازه‌گیری مستقیم عمق قبل از پرش y_1، و اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش y_2 و محاسبه y_1 استفاده شد. نتایج اولیه و استفاده از تجارب محققین قبلی(۱۰ و ۱۴) نشان داد که اندازه‌گیری مستقیم عمق اولیه پرش با توجه به سرعت بالای جریان فوق بحرانی در این مقطع و خطای اندازه‌گیری بیشتر عمق به علت دخول جریان هوا، میزان استهلاک انرژی سازه را بیش از واقعیت نشان خواهد داد، لذا روش دوم یعنی اندازه‌گیری y_2 و محاسبه y_1 با توجه به کاهش پدیده دخول هوا در پایاب پرش به عنوان روش دقیق‌تری انتخاب و ملاک محاسبات انرژی در کلیه مدل‌ها قرار گرفت. رابطه اعماق مزدوج پرش به صورت زیر است:

$$y_1 = \frac{y_2}{2}(\sqrt{1+8Fr_2^2}-1) \qquad [۱۴]$$

با تعیین عمق y_1 و میزان دبی جریان سرعت متوسط مقطع قابل محاسبه بوده و انرژی جریان در مقطع پایاب شیب شکن(قبل از وقوع پرش) به کمک رابطه انرژی $\left(H_1 = y_1 + V_1^2/2g\right)$ قابل محاسبه خواهد بود و نهایتا" اختلاف انرژی کل (H_t) و میزان انرژی در پایاب شیب شکن، استهلاک انرژی سازه به واسطه شرایط هندسی مقطع و شرایط هیدرولیکی جریان را تعیین می‌نماید:

$$\Delta H = H_t - H_1 \qquad [۱۵]$$

نتایج و بحث

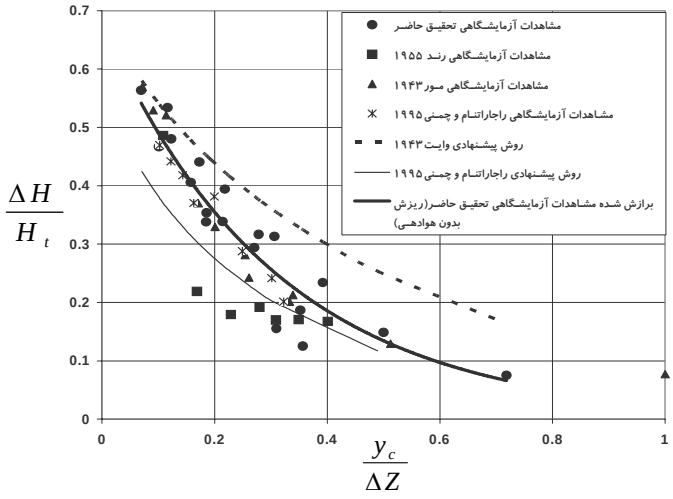
میزان نسبی استهلاک انرژی $\Delta H/H_t$ نسبت به $y_c/\Delta Z$ برای شیب شکن‌های قائم در تحقیق حاضر و مقایسه آن با نتایج سایر تحقیقات در شکل۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل به جز روش پیشنهادی وایت (۱۷) تقریبا در تمامی موارد میزان نسبی استهلاک انرژی $\Delta H/H_t$ تحقیق حاضر(حالت جت هوا دهی نشده) بیش از داده‌های تجربی یا پیش بینی محققین دیگر (حالت جت هوا دهی شده) است. البته این موضوع با توجه به تأثیر هوادهی زیر جت در کاهش زاویه برخورد جت به حوضچه (ϕ) از قبل قابل پیش‌بینی بود. چنانچه مقادیر $\Delta H/H_t$ در حالت غیر هوادهی با حالت هوادهی شده در روش پیشنهادی راجاراتنام و چمنی(۱۲) مقایسه شود، ملاحظه می‌شود که اختلاف مقادیر در $y_c/\Delta Z$ بیشتر از ۰/۶ تقریباً صفر و با کاهش $y_c/\Delta Z$ تا مقدار ۰/۰۷ به حدود ۱۲ درصد می‌رسد.

قابل ذکر است که استفاده از شیب شکن‌های قائم با جریان هوادهی نشده به دلیل احتمال ایجاد ناپایداری در اثر ورود و خروج جریان ناماندگار هوا خصوصاً در کاربردهایی که تغییرات سطح آب بالا دست اهمیت دارد، ممکن است توجیه‌ناپذیر باشد.

گستردگی دامنه پارامترهای پیش‌بینی‌کننده نوع رژیم (ریزشی، رویه‌ای یا تبدیلی) غالب در سازه‌های پلکانی در اظهار نظرات محققین مختلف (۲، ۳، ۵، ۱۱و ۱۸) حاکی از آن است که اعلام نظر واحد در خصوص تعیین رژیم جریان عبوری خصوصاً در محدوده‌های تبدیل رژیم‌ها به یکدیگر تقریباً غیر ممکن بوده و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



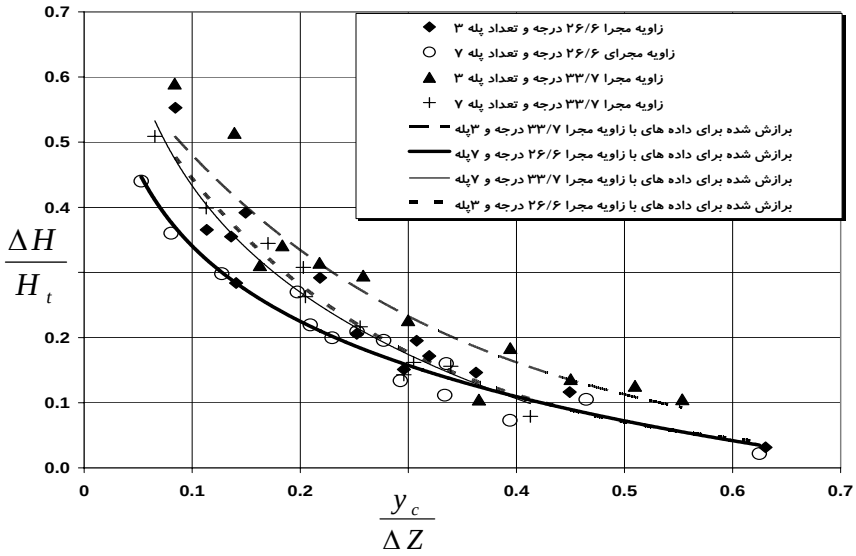
شکل ۶. مقایسه تغییرات $\Delta H/H_t$ نسبت به $y_c/\Delta Z$ در شیب شکن مستقیم

خطای ناشی از قضاوت‌های شخصی را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. بر این اساس و با توجه به وجود رژیم جریان تبدیلی و پیوسته بودن دو رژیم دیگر با آن به نظر می‌رسد، بررسی تفکیک شده خصوصیات استهلاک انرژی نسبی برای هر رژیم چندان مناسب نبوده و نتایج مطلوبی به دست ندهد. با توجه به این موضوع در بررسی پارامترهای مؤثر در استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن‌های پلکانی از تأثیر رژیم جریان صرف‌نظر گردیده و کلیه رژیم‌ها به صورت یک جا مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۷ نسبت $\frac{\Delta H}{H_t}$ در برابر $\frac{y_c}{\Delta Z}$ برای مدل‌های پلکانی این تحقیق نمایش داده شده است. با توجه به این شکل افزایش نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ (افزایش دبی در ارتفاع ثابت)، باعث کاهش میزان نسبی استهلاک انرژی جریان شده است. هم‌چنین زاویه مجرای بیشتر و تعداد پلکان کمتر در محدوده مورد بررسی متغیرها، افت نسبی انرژی بیشتری را نتیجه داده است. این نتیجه خلاف نتیجه‌ای است که بر مبنای رابطه ۱۳ از نتایج تحقیقات چنسن (۵) برای رژیم جریان ریزشی با زاویه مجرای کم در خصوص تأثیر تعداد پله به دست آمده است. از آنجایی که رابطه ۱۳ با فرض وقوع پرش هیدرولیکی کامل روی هر پلکان تحلیل و نتیجه شده است، به نظر می‌آید علت اختلاف اساسی مذکور نیز در همین مورد باشد، چرا که زاویه مجرای تند انتخاب شده برای مدل‌های تحقیق حاضر و در نتیجه طول کم پلکان‌ها شرایط لازم برای وقوع پرش هیدرولیکی روی هر پلکان را در هیچ یک از آزمایش‌های رژیم جریان ریزشی فراهم نساخت به طوری که حتی در بعضی از آزمایش‌ها شرایط هندسی و هیدرولیکی به گونه‌ای ترکیب می‌شود که جریان عبوری از مجرای پلکانی در شرایط رژیم ریزشی بدون برخورد با کف برخی از پلکان‌ها از روی آنها عبور می‌نمود.

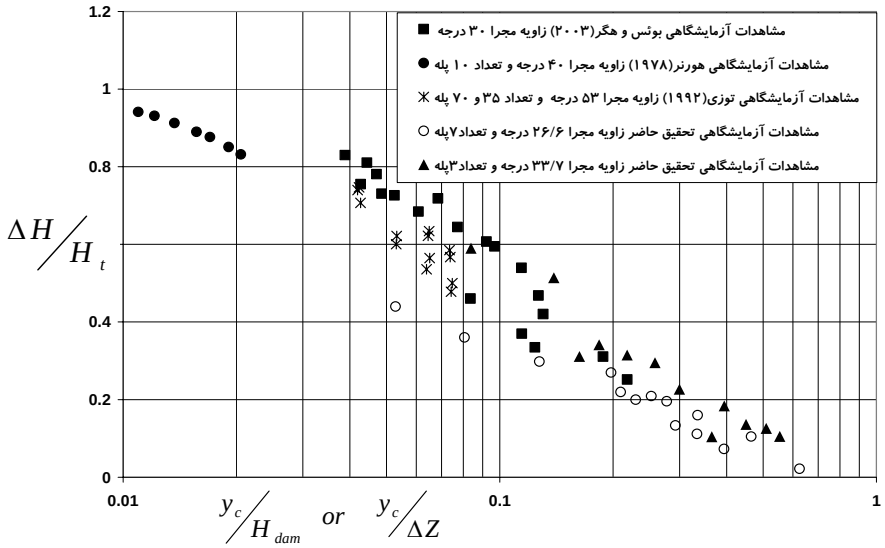
با توجه به نزدیکی زیاد منحنی متوسط برای مدل‌های ۳ پله با زاویه مجرا ۲۶/۶ درجه و منحنی متوسط برای مدل‌های ۷ پله با زاویه مجرا ۳۳/۷ درجه در شکل ۷ به نظر می‌رسد در خصوص نحوه تأثیر تغییر توام تعداد پلکان‌ها و زاویه مجرا با توجه به محدوده متغیرها در این تحقیق نتوان با اطمینان کافی اظهار نظر نمود.

در شکل ۸ داده‌های مشاهده‌ای برای مدل‌های ۳ پله با زاویه مجرا ۳۳/۷ درجه و مدل‌های ۷ پله با زاویه مجرا ۲۶/۶ درجه تحقیق حاضر با برخی از داده‌های مشاهده‌ای محققین دیگر که روی مدل‌های سرریز پلکانی به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج تحقیقات قبلی (۶ و ۷) در رژیم جریان رویه‌ای سرریزهای پلکانی، افزایش تعداد پلکان‌ها

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل ۷. تأثیر $y_c/\Delta Z$ ، شیب مجرا و تعداد پلکان‌ها در میزان $\Delta H/H_t$ برای مدل‌های شیب شکن پلکانی



شکل۸. مقایسه $\Delta H/H_t$نسبت به $y_c/\Delta Z$ یا y_c/H_{dam} برای برخی شیب شکن‌ها و سرریزهای پلکانی

باعث افزایش استهلاک انرژی نسبی می‌شود که نتایج تحقیق حاضر در این مورد نیز متفاوت است که علت اصلی آن به نظر می رسد تعداد کم پلکان‌ها در مقایسه با تحقیقات فوق الذکر و یا به عبارتی ارتفاع کم شیب شکن پلکانی در مقایسه با سرریز پلکانی باشد. در هر حال در تحقیقات مختلف متغیرهای زاویه مجرا و تعداد پلکان، متفاوت از یکدیگر بوده و ممکن است درجه اهمیت هر متغیر در محدوده خاصی نیز تغییر نماید. نکته مهم دیگری که با توجه به شکل ۷ مقایسه نتایج تحقیقات مشابه روی شیب شکن‌ها و سرریزهای پلکانی را نامناسب نشان می‌دهد، ارتفاع نسبی $\Delta Z/y_c$ کم سازه شیب شکن در مقایسه با

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]

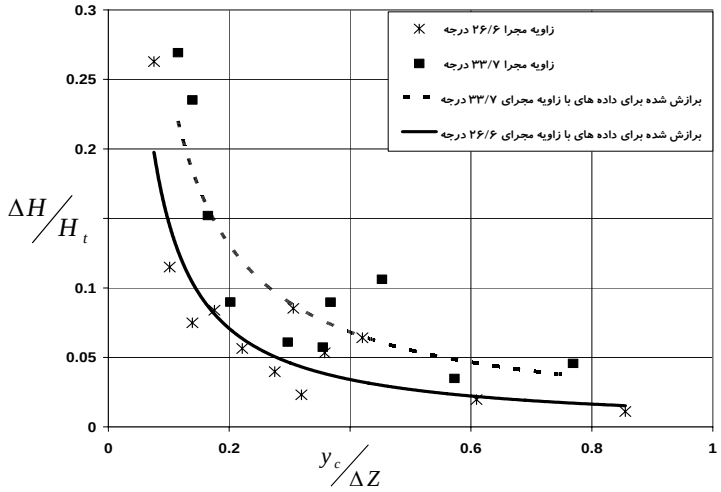
($\frac{H_{dam}}{y_c}$) در سرریزهای پلکانی است. همانطوری که در این شکل ملاحظه می‌شود محدوده تغییرات نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ در شیب شکن ها و نسبت $\frac{y_c}{H_{dam}}$ در سرریزهای پلکانی متفاوت است. با توجه به این‌که جریان یک‌نواخت آب – هوا در طول مجرای سرریزهای پلکانی بسته به شرایط هندسی پلکان‌ها و دبی جریان با فاصله مشخصی از ابتدای سرریز شکل می‌گیرد (۵)، ممکن است در دبی، ارتفاع پله و زاویه مجرا یکسان در هر دو سازه با وجود شرایط رژیم جریان رویه‌ای، جریان یک‌نواخت آب – هوا در شیب شکن پلکانی به علت ارتفاع نسبی کمتر، شکل نگرفته و میزان استهلاک انرژی نسبی در این دو متفاوت شود که عدم شکل‌گیری جریان یک‌نواخت آب– هوا در کلیه آزمایش‌های تحقیق حاضر نشان‌دهنده این مطلب است. با توجه به این مهم که بیشتر روابط پیشنهادی محققین برای محاسبه استهلاک انرژی در رژیم جریان رویه‌ای سرریزهای پلکانی (خصوصاً آنهایی که مبنای تئوریک دارند)، با فرض شکل‌گیری جریان یک‌نواخت تحلیل شده‌اند (۲، ۶ و ۱۸)، به نظر می‌رسد در انتخاب روابط ارائه شده برای تعیین استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی جهت کاربرد در شیب شکن‌های پلکانی باید جانب احتیاط را رعایت نمود.

در شکل ۹ مقادیر $\frac{y_c}{\Delta Z}$ در مقابل $\frac{\Delta H}{H_t}$ برای مدل‌های شیب شکن مایل ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل نتیجه می‌شود افزایش نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ تأثیر کاهشی در تغییرات میزان نسبی استهلاک انرژی سازه $\frac{\Delta H}{H_t}$ داشته و به طور متوسط برای زاویه مجرا ۲۶/۶ درجه از حدود ۲۰ درصد برای $\frac{y_c}{\Delta Z}$ معادل ۰/۰۷ تا حدود ۱/۵ درصد برای نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ برابر ۰/۸۶ متغیر است. هم‌چنین به ازای $\frac{y_c}{\Delta Z}$ ثابت با افزایش زاویه مجرا شیب شکن مایل استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد.

خلاصه نتایج آنالیز داده‌ها برای پیش‌بینی میزان نسبی استهلاک انرژی بر مبنای تحلیل رگرسیون غیر خطی مقادیر مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در جدول ۳ آورده شده است. آنالیز خطی داده‌ها نتایج معنی داری در این خصوص نشان نداد. هم‌چنین در جدول ۴ نتایج تحلیل حساسیت متغیر وابسته $\frac{\Delta H}{H_t}$ نسبت به متغیرهای مستقل روابط جدول ۳، درج شده است. به عنوان نمونه در رابطه پیشنهادی ۱۷ مربوط به شیب شکن قائم، تغییرات افزایشی ۱۰ درصدی در متغیر مستقل $\frac{y_c}{\Delta Z}$ بین ۱۳/۵ تا ۲/۱ و به طور متوسط ۷/۸۸ درصد در $\frac{\Delta H}{H_t}$ اثر کاهشی داشته و این میزان در $\frac{y_c}{\Delta Z}$های کوچک، بیش از $\frac{y_c}{\Delta Z}$های بزرگ است. این موضوع با توجه به شکل ۶، از شیب بیشتر منحنی برازش شده برای داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر در نقاط با $\frac{y_c}{\Delta Z}$ کمتر نیز مشهود است. علاوه بر این در شیب شکن مایل اثر تغییرات نسبی شیب مجرا روی تغییرات نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ در مقایسه با تغییرات نسبی $\frac{y_c}{\Delta Z}$ به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. در شیب شکن پلکانی، تأثیر تغییرات نسبی تعداد پلکان روی تغییرات نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$در مقایسه با دو متغیر مستقل دیگر کمتر بوده و به طور متوسط ۱/۵۶ درصد اثر کاهشی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که اثر تغییرات نسبی متغیرهای مستقل با توجه به دامنه تغییرات نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ ذکر شده در جدول ۴ در برخی بازه‌ها کم بوده و در برخی بازه‌های دیگر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. اضافه می‌نماید که روابط جدول ۳ در محدوده متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق شامل نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ مورد آزمایش برای مدل‌های مختلف، زاویه مجرا ۲۶/۶ تا ۳۳/۷ درجه و تعداد پلکان ۳ تا ۷ به دست آمده‌اند و برای دامنه‌هایی غیر از این بازه‌ها قابل کاربرد نیست. در شکل ۱۰ پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی بر مبنای رابطه ۱۷ برای شیب شکن قائم، رابطه ۱۸ برای شیب شکن مایل با زاویه مجرا ۳۳/۷ درجه و رابطه ۱۹ برای شیب شکن پلکانی با زاویه مجرا ۲۶/۶ درجه(با ۷ پله)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل ۹. تغییرات $\Delta H/H_t$ نسبت به $y_c/\Delta Z$ برای شیب شکن‌های مایل

جدول۳. روابط به دست آمده برای پیش بینی استهلاک نسبی انرژی در شیب شکن‌ها

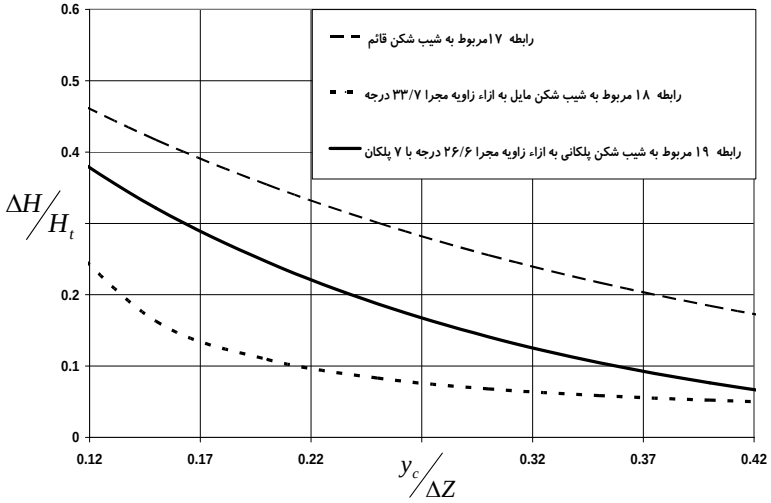
ضریب تعیین	تعداد داده ها	رابطه تعیین استهلاک نسبی انرژی	شماره رابطه	نوع شیب‌شکن
۰/۸۷	۱۹	$\frac{\Delta H}{H_t} = ۰/۶۷ \ e^{-۳/۲۶ \ (y_c/\Delta Z)}$	۱۷	قائم
۰/۸۱	۲۲	$\frac{\Delta H}{H_t} = ۰/۰۰۰۲ \ (\frac{y_c}{\Delta Z})^{-۱/۷۵} \ e^{(۴/۷۹\tan\theta)} + ۰/۰۲۸$	۱۸	مایل
۰/۸۷	۴۹	$\frac{\Delta H}{H_t} = ۰/۷۲۳ \ e^{-۴.۸۸ \ y_c/\Delta Z} + ۰/۱۸۱۸ \ \ln(\tan\theta) + ۰/۲۰۴ \ N^{-۰/۳۶۷}$	۱۹	پلکانی

جدول۴. آنالیز حساسیت روابط به دست آمده برای پیش‌بینی استهلاک نسبی انرژی در شیب شکن‌ها

متغیرهای مستقل			تغییرات نسبی متغیر وابسته $\Delta H/H_t$ به ازاء گام‌های ۱۰ درصدی در تغییرات افزایشی پارامترهای مستقل		رابطه پیشنهادی
تعداد پله (N)	tanθ	$y_c/\Delta Z$	متوسط تغییرات (درصد)	حدود تغییرات (درصد)	
-	-	متغیر	-۷/۸۸	از ۱۳/۵- تا ۲/۰۹-	رابطه ۱۷
-	ثابت	متغیر	-۷/۹۰	از ۱۳/۵- تا ۲/۱۱-	رابطه ۱۸
-	متغیر	ثابت	۱۴/۳۶	از ۳/۰۴ تا ۲۸/۲۸	
ثابت	ثابت	متغیر	-۹/۱۵	از ۴/۱۷- تا ۲۲-	رابطه ۱۹
ثابت	متغیر	ثابت	۱۰/۸۵	از ۲۵/۸۷ تا ۳/۵۵	
متغیر	ثابت	ثابت	-۱/۵۶	از ۲/۹۹- تا ۰/۷۵-	

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]



شکل۱۰. مقایسه استهلاک انرژی نسبی بر اساس روابط پیشنهادی جدول ۲ در ۳ تیپ مختلف شیب شکن

برای محدوده مشترک نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ در کنار یکدیگر ترسیم شده‌اند. همان‌طور که از این شکل نتیجه می‌شود در شرایط یکسان دبی و اختلاف ارتفاع (نسبت $\frac{y_c}{\Delta Z}$ ثابت) بیشترین میزان $\frac{\Delta H}{H_t}$ متعلق به شیب‌شکن قائم و کمترین $\frac{\Delta H}{H_t}$ مربوط به شیب‌شکن مایل است. بدیهی است که علی‌رغم استهلاک انرژی نسبی بیشتر شیب‌شکن قائم در مقایسه با دو نوع دیگر، در انتخاب نوع شیب شکن در پروژه‌های اجرایی، فشار هیدرودینامیک وارده به کف بند، هم‌چنین خاکبرداری بیشتر در مواضع اجرای شیب شکن قائم و هزینه‌های آن نیز می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت بررسی پارامترهای مؤثر در استهلاک انرژی نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ جریان عبوری از سه نوع رایجتر شیب شکن (قائم، پلکانی و مایل) و مقایسه آن در این سه نوع، ۱۴ مدل فیزیکی از شیب شکن‌های فوق ساخته شده و با برقراری شرایط مختلف هیدرولیکی در ۹۰ دبی متفاوت نتایج زیر به دست آمد:

- افزایش $y_c/\Delta Z$ (در کلیه مدل‌ها)، افزایش تعداد پلکان(در مدل‌های پلکانی) و کاهش زاویه مجرا (در دو نوع پلکانی و مایل) در محدوده متغیرهای مورد بررسی تحقیق حاضر باعث کاهش میزان نسبی استهلاک انرژی شد. در این بین تأثیر $y_c/\Delta Z$ بیش از سایر پارامترها است. هم‌چنین اثر تغییرات تعداد پلکان روی افت انرژی نسبی در مدل‌های شیب شکن پلکانی تحقیق حاضر در مقایسه با پژوهش‌های قبلی روی سریزهای پلکانی نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد در سرریزهای پلکانی به علت ارتفاع بیشتر سازه در مقایسه با شیب شکن که سازه کم ارتفاعی است، طول لازم برای ایجاد جریان یک‌نواخت آب – هوا وجود داشته در حال که در سازه شیب شکن پلکانی ارتفاع کم، باعث عدم شکل‌گیری جریان یک‌نواخت مذکور می‌شود. بر مبنای تحلیل رگرسیون غیر خطی مقادیر مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر روابطی براساس پارامترهای بی بعد برای تخمین استهلاک انرژی نسبی جریان پیشنهاد شد.
- مقایسه استهلاک انرژی نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ در محدوده مورد بررسی متغیرهای این تحقیق نشان داد که در شرایط هندسی(ΔZ و شیب مجرا) و هیدرولیکی(y_c) یکسان،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]

بیشترین استهلاک انرژی نسبی مربوط به شیب شکن قائم بوده و شیب شکن پلکانی و مایل به ترتیب در رتبه بندی بعدی قرار می‌گیرند. علی‌رغم استهلاک انرژی نسبی بیشتر شیب شکن قائم در مقایسه با دو نوع دیگر، در انتخاب نوع شیب شکن در پروژه‌های اجرایی، فشار هیدرودینامیک وارده به کف بند، هم‌چنین خاک‌برداری بیشتر در مواضع اجرای شیب شکن قائم و هزینه‌های آن باید مورد توجه قرار گیرد.

- در مقایسه با ارتفاع نسبی $(\frac{H_{dam}}{y_c})$ زیاد سرریزهای پلکانی، ارتفاع نسبی $\Delta Z/y_c$ کم شیب شکن‌های پلکانی غالباً باعث می‌شود که جریان یک‌نواخت آب- هوا روی مجرای پلکانی شیب شکن شکل نگیرد. از این رو با توجه به این‌که عمده روابط پیشنهادی برای محاسبه استهلاک انرژی نسبی در جریان رویه‌ای سرریزهای پلکانی با فرض شکل‌گیری جریان یک‌نواخت آب- هوا تحلیل و ارائه شده‌اند، به نظر می‌رسد در کاربرد این روابط برای تخمین $\frac{\Delta H}{H_t}$ در خصوص شیب شکن‌های پلکانی باید احتیاط نمود.

سپاسگزاری

نویسندگان برخود لازم می‌دانند، از همکاری بی دریغ مسئولین محترم دانشکده مهندسی علوم آب برای در اختیار گذاردن امکانات آزمایشگاهی و معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز، صمیمانه تشکر نمایند.

منابع مورد استفاده

۱. . سلماسی، ف. ۱۳۸۸. اثر تعداد پله‌ها بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای بر اساس روش جدید طراحی. مجله دانش آب و خاک ۱۹(۱): ۲۷-۳۸.

2. Boes, R.M. and W.H. Hager. 2003. Hydraulic design of stepped spillways. ASCE. J. Hydraul. Eng. 129(9): 671-629.
3. Chamani, M.R., & N. Rajaratnam. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. ASCE. J. Hyd. Eng. 125(4): 361-368
4. Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. IAHR. J. Hyd. Res. 32(2): 213-218
5. Chanson, H. 2002. The Hydraulics of Stepped Chutes & Spillways. Balkema Pub., Steenwijk, The Netherlands.
6. Chanson, H. & L. Toombes. 2002. Energy dissipation and air entrainment in stepped storm waterway. J. Irrg. and Drain. Eng. 128(5): 305-315.
7. Christodoulou, C. 1993. energy dissipation on stepped spillways. J. Hyd. Eng. 119(5): 644-650.
8. Essery, I.T.S. and M.W. Horner. 1978. The hydraulic design of stepped spillways. CIRIA Roport, 2nd ed., No. 33.
9. Felder, S. and H. Chanson. 2009. Energy dissipation and residual energy on embankment dam stepped spillways. 33rd IAHR Congress. Water engineering for a sustainable environment.
10. Pegram, G.G.S., A.K. Officer and S.R. Mottram. 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. J. Hyd. Eng. 125(5): 500–509.
11. Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillways. ASCE. J. Hyd. Eng. 116(4): 587-591.
12. Rajaratnam, N. and M.R. Chamani. 1995. Energy loss at drops. J. Hyd. Res. 7(2): 373–384.
13. Rand, W. 1955. Flow geometery at straight drop spillways. ASCE. Proc. 81(791): 1-13.
14. Stephenson, D. 1991. Energy dissipation down stepped spillways. Intl. Water Power and Dam Construc. 43(9): 27-30.
15. US department of the interior. 1965. Design of small canal structures. Bureau of Reclamation. Denver, Colorado. Reprint 1978. 435 p.
16. Valentin, G., P.U. Volkart and H.E. Minor. 2004. Energy dissipation along stepped spillways. Hydraul. of dams and river structures. Taylor and Francis group., London.
17. White, M.P. 1943. Energy loss at the base of free overfall. Discussion. Trans. ASCE. 108: 1361-1364.
18. Yasuda, Y. and I.O. Ohtsu. 1997. Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Proc. 28 IAHR, Cong. Graz. Austria.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6]