

بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در 3 مدل سرریز فیوزگیت (WLH، خطی و خطی با نیمرخ مایل) با افزایش شیب کانال

زکيه غلامی¹، رامین فضل‌اولی^{2*}

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* ساری، صندوق پستی 48177-36781

raminfazl@yahoo.com

چکیده - فیوزگیت یکی از انواع سرریزها است که با توجه به نمای از بالا، به دو مدل تاج مستقیم و تاج کنگره‌ای تقسیم می‌شود. فیوزگیت‌های تاج کنگره‌ای با افزایش طول تاج، ظرفیت تخلیه و ذخیره آب در مخزن، می‌تواند در زمان سیلابی با کاهش ارتفاع آب بالای سازه، از آب‌گرفتگی زمین‌های بالادست جلوگیری کند که شامل سه نوع: دریچه باریک با بار کم (NLH)، دریچه عریض با بار کم (WLH) و دریچه عریض با بار زیاد (WHH) است. در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزایش شیب کانال بر روند ضریب دبی در 3 مدل فیوزگیت WLH، خطی و خطی با نیمرخ مایل پرداخته شد. این مدل‌ها از جنس پلکسی گلاس با ارتفاع جام 16/7 سانتی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی شیب‌پذیر به طول 12 متر، عرض 0/5 متر و ارتفاع 0/8 متر انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب دبی سرریز فیوزگیت به پارامتر h/H بستگی دارد. در فیوزگیت کنگره‌ای با افزایش دبی، ضریب دبی به‌صورت سهمی کاهش می‌یابد و در فیوزگیت‌های با تاج مستقیم، ضریب دبی به‌صورت خطی در شیب‌های مختلف حالت افزایشی، تقریباً ثابت و کاهشی دارد. در هر 3 مدل با افزایش شیب، عمق آب پایین‌دست سرریز کم و مقدار ضریب دبی افزوده می‌شود. مقایسه مدل‌ها نشان داد که در یک h/H ثابت، سرریز خطی با نیمرخ مایل ضریب دبی بالاتری دارد و بیشترین حجم آب را در مخزن ذخیره می‌کند. هم‌چنین مشخص شد، در یک دبی ثابت مدل WLH از ارتفاع آب بالادست پایین‌تری برخوردار است. در نهایت، معادله ضریب دبی فیوزگیت‌های کنگره‌ای و مستقیم به‌ترتیب به‌صورت توانی و خطی استخراج شد که پارامترهای آماری محاسبه شده حاکی از دقت بالای معادلات است.

کلیدواژگان: سرریز، شیب، ضریب دبی، فیوزگیت.

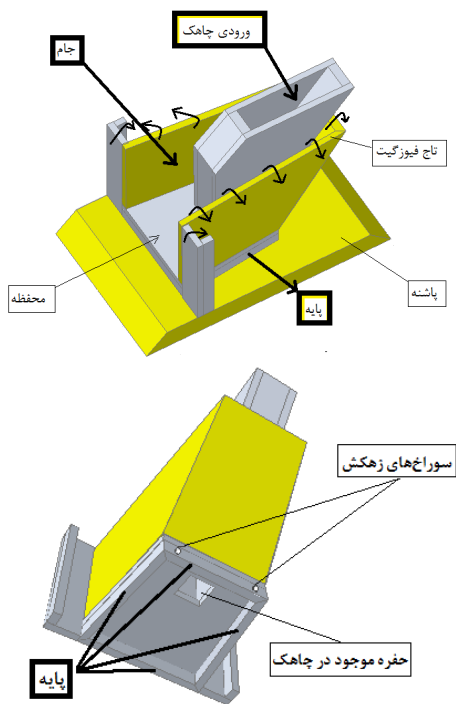
1- مقدمه

(بیرامی، 1387). سرریزها به‌صورت‌های مختلفی ساخته می‌شوند. متداول‌ترین آن‌ها سرریزهای آزاد¹ و یا سرریزهای سطحی (روگذر)² هستند (نیک‌صفت، 1380).

برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها، از سازه‌های هیدرولیکی به‌نام سرریز استفاده می‌شود که یکی از سازه‌های مهم تشکیل‌دهنده هر سد است

1. Overfall Spillways
2. Overflow Spillways

با توجه به محدوده سرریز شدن آن، که دارای هد کم (LH) باشد و یا هد زیاد (HH)، به سه مدل استاندارد: دریچه باریک با بار کم⁶ (NLH)، دریچه عریض با بار کم⁷ (WLH) و دریچه عریض با بار زیاد⁸ (WHH) تقسیم می‌شوند که معیارهای طراحی آن‌ها مطابق جدول 1 می‌باشد (Falvey and Trielle, 1995).



شکل 1 نمای سه‌بعدی سرریز فیوزگیت

جدول 1 معیارهای طراحی برای سه مدل استاندارد فیوزگیت (Falvey and Trielle, 1995)

NLH	$W=1.0H$	$L_c=3.76H$	$L_a=1.0H$
WLH	$W=1.5H$	$L_c=4.09H$	$L_a=1.0H$
WHH	$W=1.8H$	$L_c=5.22H$	$L_a=1.2H$

W عرض، H ارتفاع، L_c طول تاج سرریز و L_a طول کف فیوزگیت است.

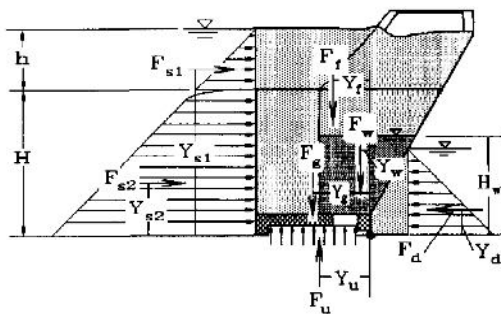
سرریزهای ریزشی کنترل نشده یا آزاد، از معتبرترین سرریزها برای ایمنی سد هستند. از آنجا که این سرریزها هزینه ساخت بالاتری دارند و باعث اتلاف قابل ملاحظه آب از مخزن می‌شوند، به‌کارگیری فیوزگیت‌ها می‌تواند راه‌حلی برای تطبیق ایمنی سد با حداکثر ظرفیت ذخیره باشد (Afshar et al., 2003). فیوزگیت‌ها بر اساس نمای از بالا، به دو مدل تقسیم می‌شوند: تاج مستقیم و تاج کنگره‌ای. هر کدام از انواع آن دارای مزایایی می‌باشد، از جمله این‌که: (1) فیوزگیت‌های تاج مستقیم، پایداری سرریزها را فراهم می‌کنند (بیشتر از سه برابر وزنشان)؛ و (2) فیوزگیت‌های تاج کنگره‌ای جریان بیشتری را برای یک عمق معین از خود عبور می‌دهند (Barcouda et al., 2001).

سرریز فیوزگیت، نوع خاصی از سرریز کنگره‌ای است (Falvey, 2003). از جمله مزایای این سازه نسبت به سرریز کنگره‌ای، عملکرد مؤثرتر آن در برابر سیل‌های بزرگتر است، در صورتی‌که سرریز کنگره‌ای برای سیل‌های متوسط با هد نسبتاً پایین قابل استفاده است (Khatsuria, 2000). هم‌چنین، فیوزگیت شبیه سرریز کنگره‌ای هوادهی شده عمل می‌کند (Hite et al., 2000). فیوزگیت‌ها در سال 1989 به‌وسیله فرانسیس لمرپیر¹، به عنوان یک سیستم ساده و ایمن برای افزایش ذخیره مخزن، افزایش ظرفیت تخلیه سرریز و در نتیجه افزایش ایمنی سد اختراع شد (Falvey and Trielle, 1995). سرریز مذکور شامل 3 جزء اصلی: جام²، پایه³ و چاهک ورودی⁴ متصل به محفظه⁵ که در شکل 1 نشان داده شده، می‌باشد (Chevalier et al., 1996).

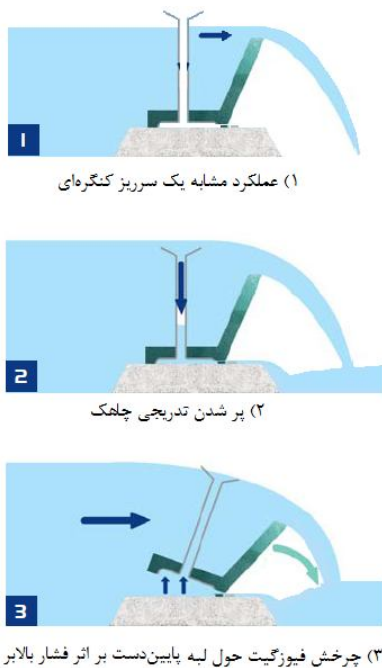
فیوزگیت‌های تاج کنگره‌ای از نظر نسبت عرض دریچه به ارتفاع آن، به دو گروه عریض (W) و یا باریک (N)، و

1. François Lempérière
2. Bucket
3. Base
4. Inlet Well
5. Chamber

6. Narrow, Low Head
7. Wide, Low Head
8. Wide, High Head



شکل 2 نیروهای وارد بر مدل فیوزگیت



(1) عملکرد مشابه یک سرریز کنتره‌ای

(2) پر شدن تدریجی چلک

(3) چرخش فیوزگیت حول لبه پایین دست بر اثر فشار بالابر

شکل 3 مراحل عملکرد فیوزگیت

(Falvey and Trielle, 1995) عوامل مؤثر بر ضریب دبی را بررسی و به طراحی هیدرولیکی فیوزگیت‌ها پرداختند. آن‌ها ضریب دبی برای هر سه مدل فیوزگیت را تعیین و آن را تابعی از طول تاج فیوزگیت و h/H دانستند و نشان دادند که با افزایش هد روی فیوزگیت، مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد. معادله مناسب ضریب دبی، از رابطه توانی (2) تبعیت می‌کند:

$$C_d = C_1 \left(\left(\frac{h}{H} \right) - C_2 \right) C_3 \quad (2)$$

h ارتفاع فیوزگیت، اختلاف ارتفاع تاج و تراز آب در مخزن، ضرایب C_1 ، C_2 و C_3 برای مقادیر $h/H > 0.1$

واژگونی یک فیوزگیت بستگی به گشتاور نیروهای مقاوم و محرک آن حول لبه پایین دست دارد. نیروهای محرک (لغزشی) شامل نیروی هیدرواستاتیک بالادست مدل و نیروی بالابر در محفظه است. گشتاور نیروهای مقاوم نیز به وسیله جرم سازه، جرم آب در مدل و نیروی هیدرواستاتیک پایین دست به وجود می‌آید. در شکل 2 نیروهای وارد شده به این مدل نشان داده شده است.

برای دبی‌های بزرگ‌تر از دبی طراحی، آب از طریق چاهک به محفظه‌ای که در پایه فیوزگیت قرار دارد، می‌ریزد و تراز آب در داخل چاه افزایش پیدا می‌کند که نتیجه آن افزایش فشار در محفظه پایین است که نیروی بالابر¹ را به فیوزگیت اعمال می‌کند. نیروی بالابر درجه را ناپایدار کرده و در یک تراز از پیش تعیین شده آب در چاه، فیوزگیت حول لبه پایین دست خود چرخش می‌کند. این فرایند زمانی اتفاق می‌افتد که مجموع گشتاورهای محرک از مجموع گشتاورهای مقاوم بیشتر شود (Falvey and Trielle, 1995). شکل 3 مراحل عملکرد فیوزگیت را نشان می‌دهد.

تحقیقات در مورد مشخصات تخلیه فیوزگیت‌ها به وسیله آزمایشگاه ملی هیدرولیک در فرانسه² و آزمایشگاه ایالت تنسی آمریکا (TVA³) انجام شده است. تمام فیوزگیت‌ها به وسیله NHL آزمایش شدند، در صورتی که فقط درجه عریض با بار کم توسط TVA مورد آزمایش قرار گرفت. براساس یافته‌های Rose (1960) مشخصات دبی با استفاده از ضریب دبی (C_d)، طبق معادله زیر بیان می‌شود:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right) \sqrt{2g} C_d L_c h^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

که در آن Q دبی، L_c طول تاج فیوزگیت، h اختلاف ارتفاع تاج و تراز آب در مخزن است (Falvey and Trielle, 1995).

1. Uplift Force
2. National Hydraulic Laboratory-NHL (France)
3. Tennessee Valley Authority-TVA (USA)

عملکرد ناقص دریچه‌های مکانیکی سنتی وجود نداشت، فیوزگیت‌ها توانستند با ایجاد مانعی نفوذناپذیر، سطح مخزن دائمی را به بالاتر از تراز تاج سرریز برسانند. کریمیان علی آبادی و همکاران (1390)، به مقایسه عملکرد فیوزگیت‌ها و دریچه‌های قطاعی از نظر فنی پرداختند و با بررسی هیدروگراف‌های ورودی و خروجی، به این نتیجه رسیدند که استفاده از فیوزگیت‌ها نسبت به دریچه‌های قطاعی بهینه‌تر و اقتصادی‌تر است. Afshar and Takbiri (2012) روش شبیه‌ساز - بهینه‌ساز را با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی (GA) برای گزینش عملی، نصب و عملکرد فیوزگیت‌ها توسعه دادند. مدل محاسباتی، رفتار پیچیده هیدرولیکی فیوزگیت‌ها را با مشخصات طراحی متغیر و فرایند غیرعادی روندیابی در مواقع سیلابی شبیه‌سازی می‌کند. مدل پیشنهاد شده، مورد تأیید قرار گرفت و برای یک مطالعه موردی پروژه نصب فیوزگیت‌های سد طالقان در ایران به کار گرفته شد.

سرریز فیوزگیت کنگره‌ای می‌تواند با افزایش ذخیره آب در مخازن، نیاز به آب شرب و کشاورزی را برطرف کند. لذا، فیوزگیت‌های تاج کنگره‌ای در یک عرض ثابت با افزایش طول تاج می‌توانند در زمان سیلابی با کاهش ارتفاع آب بالای سازه (نسبت به سرریزهای خطی)، از آب‌گرفتگی زمین‌های بالادست جلوگیری کنند. طراحی این سرریزها نیاز به شناخت رفتار هیدرولیکی آن‌ها دارد. مرور کارهای پیشین نشان می‌دهد بیشتر محققان به تئوری عملکرد سرریز فیوزگیت پرداخته‌اند و تنها در یک مورد بررسی هیدرولیکی سرریزهای فیوزگیت کنگره‌ای صورت گرفته است. لذا در این پژوهش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر تغییرات شیب کانال بر مشخصات هیدرولیکی جریان از جمله ضریب دبی در سرریز فیوزگیت کنگره‌ای و خطی بررسی می‌شود و رابطه‌ای برای دبی عبوری از سرریز استخراج می‌شود.

ثابت است. ضریب C_2 مربوط به کشش سطحی است. این ضرایب برای انواع مختلف فیوزگیت‌ها در جدول 2 نشان داده شده است (Falvey and Trielle, 1995).

جدول 2 ضرایب دبی تجربی برای فیوزگیت‌ها

(Falvey and Trielle, 1995)

نوع فیوزگیت	C_1	C_2	C_3	R^*
WLH (NHL)	0/320±0/004	0/0010	-0/292±0/006	۱/۰۰
WLH (TVA)	0/306±0/009	0/0010	-0/306±0/013	۰/۹۸
NLH	0/254±0/012	0/0005	-0/319±0/018	۰/۹۴
WHH	0/315±0/009	0/0375	-0/258±0/005	۰/۹۹

R^* ضریب همبستگی است.

Rehbock (1929) فرمول ضریب دبی سرریز لبه تیز را به صورت رابطه (3) ارائه داد که برای سیستم متریک تعریف شده است. در این فرمول، h عمق بالای سرریز لبه تیز و P ارتفاع سازه می‌باشد. عبارت h/P اثر کشش سطحی است (Falvey, 2003).

$$C_d = 0.605 + 0.08 \frac{h}{P} + \frac{1}{h \text{ (mm)}} \quad (3)$$

Afshar and Takbiri (2009) به طراحی بهینه فیوزگیت‌ها با توجه به اتلاف آب در اثر سرازیر شدن آن‌ها پرداختند. آنها از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای کمینه‌سازی کل هزینه‌ها که شامل هزینه مورد انتظار اتلاف آب، جایگزینی و هزینه نصب اولیه فیوزگیت‌ها می‌شود، به‌عنوان تابع هدف استفاده کردند. نتایج نشان داد که، روندیابی سیلاب اثر مهمی روی طراحی بهینه فیوزگیت‌ها دارد. کریمیان علی آبادی و همکاران (1388)، به مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سرریز مجهز به فیوزگیت پرداختند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که عملکرد این سرریز در مقایسه با روش‌های مرسوم افزایش ارتفاع سد، اقتصادی‌تر است.

De Simone et al., (2012) به مطالعه سرریز فیوزگیت به‌عنوان سیستم کنترل سرریز، برای سد مخزنی ساروق در آذربایجان غربی پرداختند. از آنجا که با بررسی آب‌های سطحی، زمان کافی بین شروع سیل و حداکثر آن، برای

2- مواد و روش‌ها

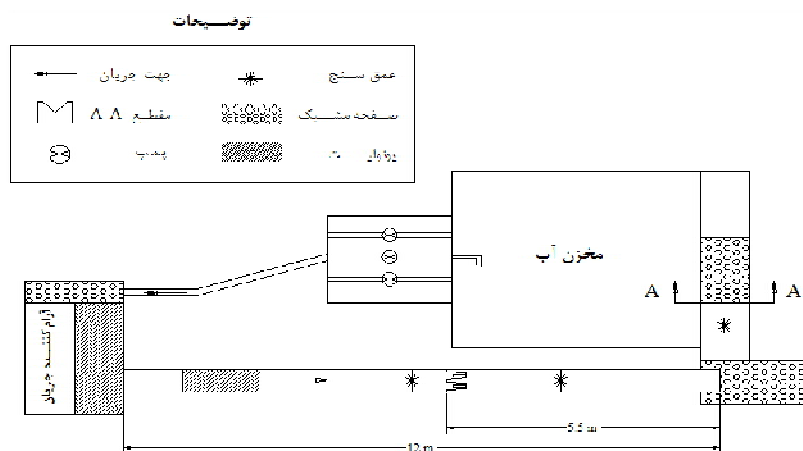
1-2- معرفی فلوم و سیستم بسته جریان

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در فلومی شیب‌پذیر که دارای سطح مقطع مستطیل شکل با اسکلت فلزی است، انجام شد. ابعاد این فلوم به ترتیب طول، عرض و ارتفاع برابر با 12، 0/5 و 0/8 متر است که دیواره‌ها از جنس شیشه شفاف به منظور مشاهده جریان از دو طرف می‌باشد. در قسمت ورودی این فلوم مخزنی وجود دارد که آشفتگی جریان آبی که از پمپ‌های گریز از مرکز وارد می‌شود، را می‌گیرد و جریان آرامی را وارد فلوم می‌کند. دبی فلوم از سه پمپ تأمین و با سرریز مثلی در خروجی اندازه‌گیری می‌شود. صفحه‌های یونولیت برای کاهش موج‌های سطحی در 6 متری بالادست مدل قرار داده شده است. در انتهای فلوم نیز، جریان بر روی صفحه‌های مشبک که برای کاهش انرژی جنبشی آب در بالادست سرریز مثلی قرار دارد، به صورت آبشار آزاد ریزش می‌کند. سپس، آب وارد یک مخزن می‌شود و از قسمت کف پمپاژ می‌شود و در ادامه وارد لوله شده و سیستم آب مجدداً به گردش در می‌آید (شکل 4).

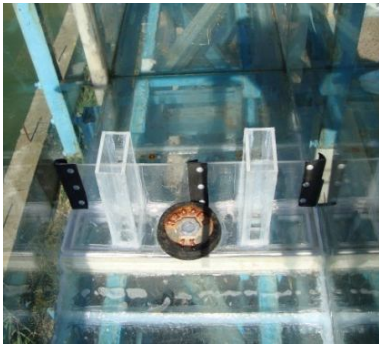
2-2- مدل مورد استفاده

در این تحقیق، از سه مدل فیوزگیت شامل: WLH، خطی و خطی با نیمرخ مایل که از جنس پلکسی گلاس بوده و دارای ارتفاع جام برابر 16/7 می‌باشد، استفاده شد و آزمایش‌ها در شرایط یکسانی اجرا شد. معیار طراحی فیوزگیت کنگره‌ای بر اساس جدول 2 است. مدل خطی، از پلان دارای تاجی مستقیم به اندازه عرض فلوم بوده و از نیمرخ به صورت قائم است. سرریز خطی با نیمرخ مایل نیز همانند مدل خطی دارای تاجی مستقیم است، با این تفاوت که از نیمرخ دارای یک ضلع مایل نسبت به افق بوده که شیب آن با شیب مدل WLH برابر است. برای تعادل این مدل‌ها، وزنه‌هایی از جنس آهن به کار برده شد که بر روی کف محفظه قرار می‌گیرند. معیار انتخاب این وزنه‌ها، سعی و خطا بوده است. بدین صورت که، برای هر مدل فیوزگیت جرم وزنه‌ها را تغییر داده تا سازه به درستی عمل کند.

قطعات پلکسی‌گلاس که دارای ضخامت یک سانتی‌متر بوده، به وسیله لیزر برش داده شد و با ماده شیمیایی کلروفورم که حلال آن است به هم چسبانده شده و برای آب‌بندی مدل از چسب آکواریوم استفاده گردید.



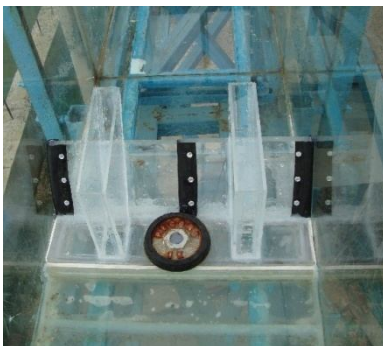
شکل 4 سیستم گردش آب در فلوم مورد استفاده در آزمایش‌ها (نما از بالا)



الف) نحوه قرارگیری فیوزگیت



ب) نیمرخ جریان عبوری از فیوزگیت
شکل 6 مدل فیوزگیت خطی



الف) نحوه قرارگیری فیوزگیت



ب) نیمرخ جریان عبوری از مدل فیوزگیت
شکل 7 مدل فیوزگیت خطی با نیمرخ مایل

در مطالعات انجام شده سرریز فیوزگیت با دو سیکل ساخته شد. هر فیوزگیت به وسیله یک لولا بر روی پاشنه، قلاویز و سپس پاشنه با چسب سیلیکون در فلوم نصب گردید. محفظه هر مدل، دارای دو روزنه مربعی به ابعاد 1 سانتی متر در قسمت پایین دست است. محل قرارگیری این سازه به دلیل کاهش تلاطم جریان ورودی برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع آب در 5/5 متری انتهای پایین دست کانال می‌باشد. شکل‌های 5 تا 7 نحوه قرارگیری مدل‌های مورد استفاده در فلوم را به همراه نیمرخ جریان عبوری از آن نشان می‌دهد.

2-3- نحوه انجام آزمایش‌ها

با روشن کردن پمپ و تنظیم دبی ورودی به وسیله شیر فلکه، از ثابت شدن دبی اطمینان حاصل شد. سپس، عمق آب بالادست سرریز مثلی و سرریز فیوزگیت قرائت و این روند برای دبی‌های مختلف انجام شد.



الف) نحوه قرارگیری مدل در فلوم



ب) نیمرخ جریان عبوری از مدل
شکل 5 مدل WLH

آب در کانال، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، w وزن وزنه و H ارتفاع جام است. پس از انجام آنالیز ابعادی به روش ماتریسی، رابطه (5) که همان رابطه دبی-اشل است، به دست می‌آید. این رابطه با معادله (1)، که معادله Rose (1960) برای محاسبه دبی عبوری از سرریز لبه تیز می‌باشد، مطابقت دارد. رابطه عمومی برآورد ضریب دبی سرریز فیوزگیت مطابق رابطه (6) می‌باشد و همان‌طور که نشان داده شده ضریب دبی تابعی از 3 پارامتر بدون بعد We ، Re و h/H می‌باشد.

$$Q = f_2 \left(\frac{1}{We}, \frac{1}{Re}, \frac{h}{H} \right) * \sqrt{g} * L_c * h^{3/2} \quad (5)$$

$$= C_d * \sqrt{g} * L_c * h^{3/2}$$

$$C_d = \frac{Q}{\sqrt{g} * L_c * h^{3/2}} = f_3 \left(\frac{1}{We}, \frac{1}{Re}, \frac{h}{H} \right) \quad (6)$$

معیار ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش، پارامتر $RMSE^I$ می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (C_{calc.} - C_{obsr.})^2} \quad (7)$$

که $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا، n تعداد داده‌ها، $C_{calc.}$ و $C_{obsr.}$ به ترتیب ضریب دبی مشاهده شده و محاسبه شده می‌باشد.

لازم به ذکر است که برای رسیدن به نقطه واژگونی، دبی از کم به زیاد تنظیم شد و ارتفاع آب بالادست سازه برای عمق‌های بیشتر از 3 سانتی‌متر قرائت شد. سپس، شیب را افزایش داده و همین روند با شیب‌های متفاوت انجام شد. در مجموع 175 داده در 9 مرحله اجرای مدل قرائت شد. پارامترهای ثابت و متغیر برای هر مدل به همراه محدوده اندازه‌گیری آن‌ها در جدول 3 مشخص شده است.

2-4- آنالیز ابعادی

آنالیز ابعادی عبارت است از کاهش تعداد متغیرهای مؤثر در یک پدیده فیزیکی و تبدیل آن‌ها به تعداد کمتری از گروه‌های بی‌بعد از همان متغیرها. با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان به انتخاب پارامترهای مورد مطالعه پرداخت. به منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر ضریب دبی سرریز فیوزگیت، تحلیل ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شده است. ضریب دبی سرریز را می‌توان وابسته به متغیرهای هندسی، سینماتیکی و دینامیکی زیر نوشت:

$$C_d = f_1(h, \rho, v, \sigma, \mu, w, H) \quad (4)$$

h ارتفاع آب بالای سازه، ρ جرم مخصوص آب، v سرعت

جدول 3 محدوده پارامترهای ثابت و متغیر

پارامترهای متغیر			پارامترهای ثابت						پارامترها مدل
ارتفاع بالای سازه (mm)	دبی (Lit/s)	شیب	جرم وزنه	ارتفاع جام (cm)	ارتفاع چاهک‌ها (cm)	طول تاج (cm)	ارتفاع پاشنه (cm)	عرض هر فیوزگیت (cm)	
30-140	10-63	0/02، 0/01، 0	دو عدد وزنه نیم کیلویی	16/7	21	127/6	1	25	WLH
39-120	7-37	0/02، 0/01، 0	یک عدد وزنه یک کیلویی	16/7	21	40/1	1	25	خطی
30-101	7-30	0/02، 0/01، 0	یک عدد وزنه یک کیلویی	16/7	21	40/1	1	25	خطی با نیمرخ مایل

3- نتایج و بحث

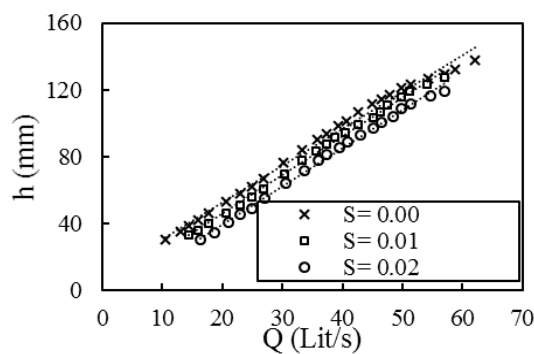
بر اساس نظریه Kobus (1980)، برای عمق آب کمتر از 3 سانتی‌متر عامل کشش سطحی افزایش می‌یابد (Novak et al., 2010). به بیان دیگر، برای مدل‌هایی با عدد ویر بزرگتر از 11 می‌توان از تأثیر کشش سطحی اجتناب کرد (Novak et al., 2007 & 2010). با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته، از عدد بدون بعد ویر به دلیل قرائت ارتفاع آب بیشتر از 3 سانتی‌متر در بالادست سازه، صرف‌نظر شد. همچنین، پارامتر بدون بعد رینولدز نیز حذف گردید، زیرا این پارامتر در محدوده 8000 تا 89000 قرار دارد و جریان آشفته است. در نهایت، تأثیر پارامتر بدون بعد h/H بر روی ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت.

3-1- تغییرات پارامترها با افزایش شیب در سرریز

فیوزگیت مدل WLH

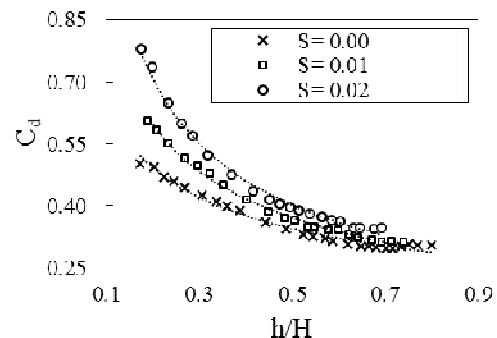
شکل 8 پارامتر h/H را در برابر ضریب دبی در 3 شیب نشان می‌دهد که مطابق آن، محدوده ضریب دبی در همه حالت‌ها از 0/3 تا 0/8 و محدوده h/H از 0/15 تا 0/82 متغیر است.

کاهش می‌یابد. محدوده ضریب دبی برای شیب صفر از 0/25-0/55 و محدوده h/H از 0/15-0/8 متغیر است. ضریب دبی برای نتایج Falvey and Trielle (1995) بر روی سرریز فیوزگیت WLH، در محدوده 0/28-0/62 و محدوده h/H معادل 0/15-0/9 در شیب صفر می‌باشد، که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. در h/H ‌های بزرگتر، این خطوط به همدیگر نزدیک‌تر شده و تأثیر شیب بر ضریب دبی از بین می‌رود که علت آن را می‌توان افزایش استغراق پایین‌دست و کاهش اثر طول تاج دانست. با کمی دقت در نمودار می‌توان دریافت که در یک h/H ثابت، با افزایش شیب، به علت کاهش ارتفاع آب بالای سازه و پایین‌دست سرریز، میزان هوادهی به مدل افزایش یافته و در نتیجه ضریب دبی زیاد می‌شود. مقدار افزایش ضریب دبی طبق نمودار، به ازای افزایش هر 0/01 در میزان شیب، به طور میانگین 10 در صد (21-3) در صد می‌باشد. شکل 9 رابطه دبی-اشل را در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل 9 رابطه دبی-اشل در 3 شیب در مدل WLH

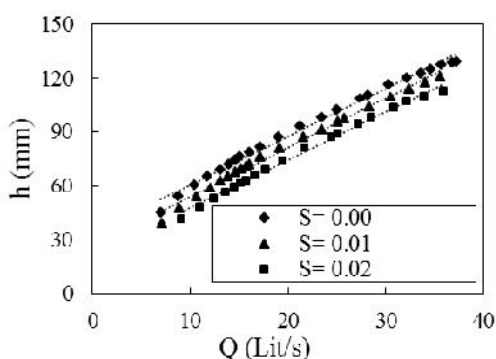
مطابق نمودار، با افزایش ارتفاع آب بالادست، دبی افزایش می‌یابد. در یک h ثابت با افزایش هر 0/01 در میزان شیب، ظرفیت تخلیه 9/5 در صد افزایش و در یک دبی ثابت، ارتفاع آب بالای سازه 7 در صد کاهش می‌یابد. رضایی (1391)، آزمایش‌های خود را در شیب افقی و پنج شیب دیگر بر روی سرریز کنگره‌ای مستطیلی انجام داد و



شکل 8 رابطه C_d با h/H در 3 شیب در مدل WLH

با افزایش h/H مقدار ضریب دبی و در نتیجه راندمان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. از آنجا که H مقداری ثابت است، h زیاد می‌شود که افزایش آن استغراق پایین‌دست و کاهش هوادهی را در پی دارد، در نتیجه ضریب دبی

بنابراین در سرریز خطی نیز همانند فیوزگیت کنگره‌ای در یک h/H ثابت، ضریب دبی با افزایش شیب افزایش می‌یابد که مقدار آن طبق نمودار، به ازای هر $0/01$ افزایش در میزان شیب، معادل $11-22$ در صد می‌باشد. شکل 11 رابطه دبی-اشل با شیب‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش هر $0/01$ در مقدار شیب، در یک h ثابت، ظرفیت تخلیه $27/5$ در صد افزایش و در یک دبی ثابت، ارتفاع آب بالای سازه 7 در صد کاهش می‌یابد.



شکل 11 رابطه دبی-اشل در 3 شیب در مدل خطی

3-3- تغییرات پارامترها با افزایش شیب در سرریز

فیوزگیت خطی با نیمرخ مایل

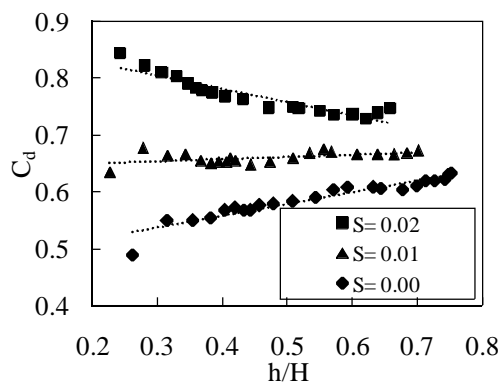
در این مدل که در 3 شیب ($0/00$ ، $0/01$ و $0/02$) اجرا شد، محدوده ضریب دبی آن مطابق شکل 12 از $0/5-1/1$ و محدوده h/H از $0/6-0/15$ متغیر است. با توجه به شکل 12، روند تغییرات ضریب دبی در این مدل با افزایش h/H همانند مدل خطی برای شیب صفر، صعودی، شیب $0/01$ تقریباً صفر و برای شیب $0/02$ نزولی است. در یک h/H ثابت، با افزایش هر $0/01$ در مقدار شیب، ضریب دبی $10-40$ درصد افزایش می‌یابد. شکل 13 رابطه دبی-اشل را برای شیب‌های مختلف نشان می‌دهد که به ازای افزایش هر $0/01$ در مقدار شیب، در یک h ثابت، ظرفیت تخلیه $14/5$ در صد افزایش و در یک دبی ثابت، عمق آب 9 در صد کاهش می‌یابد.

ضریب دبی را برای تمامی این حالات محاسبه کرد. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد با افزایش شیب، مقدار ضریب دبی افزایش و ارتفاع آب بالادست سرریز کاهش می‌یابد که با نتایج این پژوهش در رابطه با سرریز فیوزگیت کنگره‌ای مطابقت دارد.

3-2- تغییرات پارامترها با افزایش شیب در سرریز

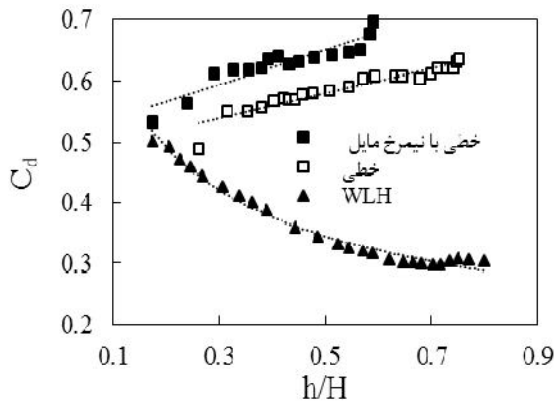
فیوزگیت خطی

شکل 10 ضریب دبی را در برابر پارامتر h/H در 3 شیب مختلف نشان می‌دهد. محدوده ضریب دبی در همه این حالات از $0/5$ تا $0/85$ و محدوده h/H از $0/25$ تا $0/75$ متغیر است. با افزایش h/H روند ضریب دبی برای شیب صفر، صعودی، شیب $0/01$ تقریباً صفر و برای شیب $0/02$ نزولی است. همچنین این روند با مطالعات Rehbock (1929) در رابطه با سرریز لبه تیز در شیب صفر، مطابقت نشان می‌دهد. در سرریز لبه تیز، با کاهش فشار هوا در زیر حجم جریان، انحنای جت در حال عبور از روی سرریز افزایش یافته و مقدار ضریب شدت جریان افزایش می‌یابد (حسینی و ابریشمی، 1388). با افزایش شیب، پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست فلوم می‌رود و در نتیجه ارتفاع آب در آن ناحیه کاهش و میزان هوادهی افزایش می‌یابد.



شکل 10 رابطه C_d با h/H در 3 شیب در مدل خطی

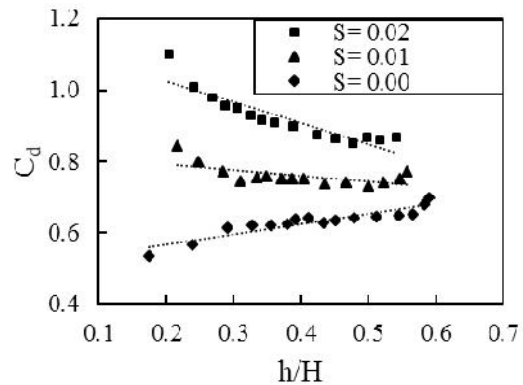
خطی به دلیل اینکه شکل تاج سرریز به صورت مستقیم است، ضریب دبی دارای روندی خطی است. در این سرریز، جریان آب عمود بر این ضلع می‌باشد و با افزایش دبی اثر طول تاج کاسته نمی‌شود و جت‌های آب به همدیگر برخورد نمی‌کنند، در نتیجه C_d افزایش می‌یابد.



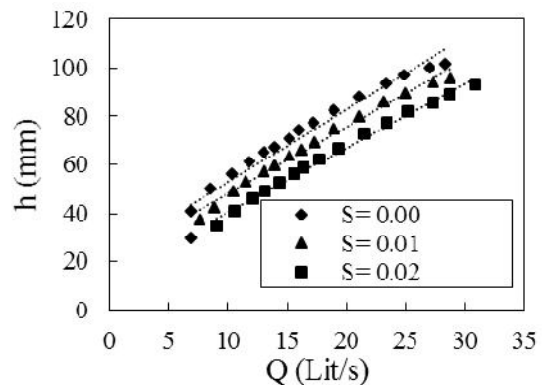
شکل 14 مقایسه تغییرات C_d نسبت به h/H در سه مدل خطی، خطی با نیمرخ مایل و WLH در شیب صفر

در یک h/H ثابت، ضریب دبی سرریز خطی مایل از سرریز خطی، و سرریز خطی از WLH بیشتر است. افزایش 14/5 درصدی ضریب دبی سرریز خطی مایل نسبت به خطی را می‌توان به علت افزایش هوادهی ناشی از ضلع شیب‌دار پایین دست سازه دانست. ضریب دبی سرریز خطی نسبت به WLH نیز، افزایش 57 درصدی داشته است، چون طول عمود بر جریان بیشتری نسبت به مدل WLH دارد و مقاومت بالاتری در برابر عبور جریان تولید می‌کند. برای h/H کم‌تر از 0/3، مقدار ضریب دبی سرریز WLH تقریباً برابر با ضریب دبی سرریز مستقیم است، چون در این محدوده حداکثر هوادهی و کم‌ترین تداخل امواج وجود دارند.

یکی از مزایایی که مدل خطی با نیمرخ مایل نسبت به فیوزگیت خطی دارد، کاهش خطر کاویتاسیون است. ضلع شیب‌دار این مدل موجب افزایش هوادهی می‌شود و از ایجاد خلأ و حباب در پایین دست جلوگیری می‌کند. مدل



شکل 12 رابطه C_d با h/H در مدل خطی با نیمرخ مایل در 3 شیب



شکل 13 رابطه دبی-اشل در مدل خطی با نیمرخ مایل در 3 شیب

3-4- مقایسه مدل‌های WLH، خطی و خطی با نیمرخ مایل

شکل 14 تغییرات روند ضریب دبی نسبت به h/H را در شیب صفر برای سه مدل خطی، خطی با نیمرخ مایل و WLH نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در سرریز WLH این روند به صورت سهمی کاهش و در سرریزهای خطی به صورت خطی افزایش می‌یابد. علت سهمی بودن روند داده‌ها در فیوزگیت مدل WLH را می‌توان چند ضلعی بودن شکل تاج دانست و چون جریان آب از جهت‌های مختلف از روی سرریز عبور می‌کند، باعث شده در دبی‌های زیاد، اثر طول تاج در این سازه به دلیل تداخل جت‌های جریان کم شده، لذا C_d کاهش می‌یابد و شیب نمودار به مقدار ثابتی می‌رسد. در مدل

فیوزگیت مدل خطی نسبت به خطی مایل (که دارای طول تاج برابر هستند) به دلیل کاهش هوادهی، 8 در صد افزایش و در یک ارتفاع ثابت، ظرفیت تخلیه آن 25 در صد کاهش می‌یابد.

3-5- تعیین ضریب دبی سرریز فیوزگیت برای 3 مدل

برای استخراج معادله ضریب دبی از نرم‌افزار اکسل استفاده شد و رابطه توانی (8) بین ضریب دبی و پارامتر بدون بعد h/H در مدل WLH ایجاد شد. در این رابطه مقادیر C_1 و C_2 ضرایب ثابت معادله می‌باشند. شکل کلی این رابطه با معادله (2) که حاصل نتایج آزمایش‌های (Falvey and Trielle 1995) می‌باشد، مطابقت دارد. برای تعیین ضریب دبی در مدل‌های خطی نیز، مطابق با معادله (Rehbock 1929) که همان معادله (3) در سرریز لبه تیز می‌باشد، رابطه خطی (9) ارائه شد.

- معادله ضریب دبی برای مدل WLH:

$$C_d = C_1 \left(\frac{h}{H}\right)^{C_2} \quad (8)$$

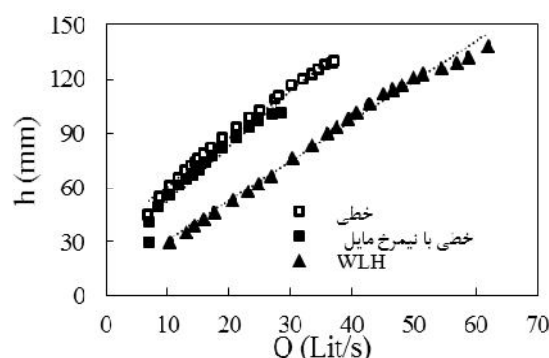
- معادله ضریب دبی برای فیوزگیت‌های خطی:

$$C_d = a\left(\frac{h}{H}\right) + b \quad (9)$$

در این رابطه مقادیر a و b ضرایب ثابت معادله هستند. در جدول 4، مقدار ضرایب ثابت برای فیوزگیت WLH و در جدول 5 برای فیوزگیت‌های خطی آورده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد، ضریب تبیین برای کل رابطه‌های ارائه شده در جدول با تقریب خوبی نزدیک به عدد یک است، چون رابطه‌ها از پارامتر مؤثر بر ضریب دبی یعنی h/H تشکیل شده است.

خطی مایل نسبت به خطی، 30 در صد و مدل WLH نسبت به خطی، 12 در صد حجم آب بیشتری را در خود ذخیره می‌کنند. از آنجا که حجم آب ذخیره شده بر روی ضلع پایین‌دست سرریز خطی مایل سبب ایجاد نیروی محرک در مدل می‌شود، در نتیجه این مدل نسبت به مدل خطی در h کوچک‌تری واژگون می‌شود. مدل WLH نیز به علت بیشتر بودن طول محفظه در مسیر جریان (بیشتر بودن طول بازو) و مقاومت بالای آن در برابر نیروی محرک و همچنین کمتر بودن عمق آب بالای سازه که به طول تاج آن برمی‌گردد، نسبت به مدل خطی با تأخیر بیشتری واژگون می‌شود.

شکل 15 رابطه دبی-اشل را در شیب صفر برای سه مدل خطی، خطی با نیمرخ مایل و WLH نشان می‌دهد.



شکل 15 رابطه دبی-اشل در سه مدل خطی، خطی با نیمرخ مایل و WLH در شیب صفر

از آنجا طول تاج سرریز WLH نسبت به خطی، $3/2$ برابر می‌باشد، در یک دبی ثابت ارتفاع آب بالادست آن، 44 درصد کاهش یافته و در یک ارتفاع ثابت، ظرفیت تخلیه آن $2/28$ برابر می‌شود. در یک دبی ثابت ارتفاع آب بالای

جدول 4 مقادیر ضرایب ثابت معادله ضریب دبی به همراه پارامترهای ارزیابی آن در مدل WLH

مدل	شیب	تعداد داده‌های قرائت شده	C_2	C_1	R^2	RMSE
WLH	0/00	25	-0/389	0/2634	0/9793	0/0087
	0/01	21	-0/522	0/2586	0/9952	0/0058
	0/02	20	-0/621	0/2615	0/9930	0/0097

جدول 5 مقادیر ضرایب ثابت معادله ضریب دبی به همراه پارامترهای ارزیابی آن در فیوزگیت‌های خطی

مدل	شیب	تعداد داده‌های قرائت شده	a	b	R^2	RMSE
خطی	0/00	23	0/2083	0/4753	0/8991	0/0104
	0/01	21	0/0380	0/6439	0/2675	0/0084
	0/02	19	-0/2326	0/8748	0/8547	0/0121
خطی با نیمرخ مایل	0/00	16	0/2837	0/5093	0/8448	0/0146
	0/01	15	-0/1675	0/8262	0/4031	0/0212
	0/02	15	-0/5889	1/1417	0/8224	0/0280

نسبت به خطی، 30 در صد و مدل WLH نسبت به خطی، 12 در صد حجم آب بیشتری را در خود ذخیره می‌کند. در یک دبی ثابت، ارتفاع آب بالادست فیوزگیت خطی نسبت به WLH به دلیل داشتن طول تاج کمتر و نسبت به مدل خطی با نیمرخ مایل (که دارای طول تاج برابر هستند) به دلیل کاهش هوادهی، افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشخص شد، مدل خطی با نیمرخ مایل نسبت به مدل خطی به دلیل حجم آب ذخیره شده بر روی ضلع پایین- دست سرریز، در h کوچکتری واژگون می‌شود. مدل WLH به علت بیشتر بودن طول محفظه در مسیر جریان، نسبت به دو مدل دیگر با تأخیر بیشتری واژگون می‌شود. در نهایت نیز، رابطه ضریب دبی برای هر 3 مدل در هر شیب استخراج گردید که مقادیر پایین RMSE حاکی از دقت بالای معادلات می‌باشد.

5- فهرست علائم

C_1, C_2, C_3	ثابت
C_d	ضریب دبی
C_{calc}	ضریب دبی محاسبه شده
C_{obsr}	ضریب دبی مشاهده شده
F_d	نیروی هیدرواستاتیک پایین دست
F_g	نیروی جرم سازه
FS_1	نیروی هیدرواستاتیک بالادست وارد بر چاهک
FS_2	نیروی هیدرواستاتیک بالادست وارد بر جام
F_u	نیروی بالابر

اگر نتوان براساس ضریب تبیین، رابطه‌ها را با هم مقایسه کرد، با استفاده از RMSE می‌توان آن‌ها را مورد مقایسه قرار داد که مقادیر پایین این پارامتر، بیان‌گر پیش‌بینی دقیق ضرایب برای محاسبه ضریب دبی است.

4- نتیجه‌گیری

تحقیقات نشان داد پارامتر بدون بعد h/H روی ضریب دبی مؤثر است، به طوری که در مدل WLH با افزایش این پارامتر، ضریب دبی به علت افزایش استغراق پایین دست و کاهش هوادهی، کم می‌شود که نتایج Falvey and Trielle (1995) را تأیید می‌کند. در فیوزگیت مدل خطی و خطی با نیمرخ مایل با افزایش h/H روند تغییرات ضریب دبی برای شیب صفر، صعودی، شیب 0/01 تقریباً صفر و برای شیب 0/02 نزولی است. تحلیل نمودارها نشان می‌دهد که روند تغییرات ضریب دبی در سرریز خطی، به صورت خطی و در سرریز WLH به صورت سهمی است که علت آن در فیوزگیت WLH، چند ضلعی بودن شکل تاج و عبور جریان آب از جهت‌های مختلف و در مدل خطی، وجود یک ضلع مستقیم است که جریان آب عمود بر آن می‌باشد. در هر 3 مدل با افزایش شیب، ضریب دبی به علت افزایش هوادهی پایین دست، بیشتر و ظرفیت تخلیه افزایش می‌یابد. مقایسه سرریزها نشان می‌دهد که در یک h/H ثابت، ضریب دبی سرریز خطی با نیمرخ مایل از سرریز خطی، و سرریز خطی از WLH بیشتر است. مدل خطی با نیمرخ مایل

دریچه‌های قطاعی به منظور افزایش ارتفاع سدها". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
 نیک‌صفت، غ.ر. (1380). "تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیک در طراحی سازه‌های آبی". انتشارات وزارت نیرو، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریه شماره 41، ص. 403.

Afshar, A., Marino, M.A., and Jalali, M.R. (2003). "Optimum design of Fusegates; reconciling dam safety and increasing storage capacity", *International Journal of Civil Engineering*, 1(1), pp. 28-32.

Afshar A. and Takbiri, Z. (2009). "Optimal design and operation of Fuse-Gates considering water loss due to gates tilting", *Environmental and Water Resources*, ASCE, pp. 3053-3060.

Afshar, A. and Takbiri, Z. (2012). "Fusegates selection and operation: simulation- optimization approach", *Journal of Hydro Informatics*, 14(2), pp. 464-477.

Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C., and Vigny, J.P. (2006). Cost effective increasing in storage and safety of most dams using Fusegates or P.K. weirs, *Commission International Des Grands Barrages*.

Chevalier, S., Culshaw, S.T., and Fauquez, S.T. (1996). *The hydroplus Fusegate system - four years on, the réservoir as an asset*. Thomas Telford, London, pp. 32-40.

De Simone, C., Jafari, N., Dasi, B., and Abdolahi, M. (2012). "Study on Fusegate as a phenomenon gates Sarough water reservoir dam in west Azarbaijan- Iran", *The First International Conference on Dams & Hydropower*, Tehran, Iran.

Falvey, H.T., and Treille, P. (1995). "Hydraulics and design of Fusegates", *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(7), pp. 512-518.

Falvey, H.T. (2003). *Hydraulic design of labyrinth weirs*, ASCE press, Reston, Virginia, USA. P. 162.

John Hite, Jr. and Mifkovic, Ch. (2000). Increasing reservoir storage or spillway capacity using Fusegate, *US Army Corps of Engineers*.

Khatsuria, R.M. (2000). "The changing contexts in the design of spillways An Overview", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 6(2), pp. 26-39.

Kobus, H. (1980). *Hydraulic modelling*, German Association for Water Resources and Land Improvement, Bonn. Bulletin No. 7.

F_w	نیروی جرم آب در جام
g	شتاب ثقل
h	ارتفاع آب بالای سازه
H	ارتفاع جام
H_w	ارتفاع آب داخل چاهک
L_a	طول کف فیوزگیت
L_c	طول تاج سرریز
n	تعداد داده‌های قرائت شده
P	ارتفاع سازه
Q	دبی
R	ضریب همبستگی
$RMSE$	ریشه میانگین مربعات خطا
S	شیب
v	سرعت آب در کانال
w	وزن وزنه
W	عرض فیوزگیت
ρ	جرم مخصوص آب
σ	کشش سطحی
μ	لزجت دینامیکی

6- منابع

بیرامی، م.ک. (1387). *سازه‌های انتقال آب*. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ هفتم، ص. 462.

حسینی، م. و ابریشمی، ج. 1388. *هیدرولیک کانال‌های باز*. انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ بیستم، ص. 613.

رضایی، م. (1391). *رابطه دبی-اشل در سرریز کنگره‌ای مستطیلی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ص. 60.

کریمیان علی آبادی، ح، محمودیان شوشتری، م، و کریمیان علی آبادی، ا. (1388). "مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سرریز مجهز به فیوز گیت". دومین همایش ملی سدسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

کریمیان علی آبادی، ح، ملکی‌پور، ب، و غفاری، م. (1390). "طراحی و شبیه‌سازی سیستم فیوزگیت و مقایسه عملکرد آن با

Spon Press, an Imprint of Taylor & Francis, London and New York, p. 599.

Rehbock, T., (1929). "Water measurement with sharp edge strength about falling resist (in German)", Journal of the Association of German Engineers, pp. 73- 343.

Rouse. H. (1960). *Elementary fluid mechanics*. John Wylie & Sons. New York. N.Y.

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., and Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures*, Published in the USA and Canada by Taylor & Francis, London and New York, p. 700.

Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., and Reeve, D.E. (2010). *Hydraulic modelling- an introduction*,