

## بررسی عوامل اثرگذار بر استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی

سعید رزم ارا<sup>۱</sup>، عباس منصوری<sup>۲</sup>.

۱- سعید رزم ارا، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران، razmarasaeed@Chmail.Ir

۲- عباس منصوری. استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران، abbas\_mansoori2000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

### چکیده

در دهه های اخیر سرریزهای پلکانی نقش مهمی در مورد مستهلک کردن انرژی حاصل از جریان سرریز داشته اند. در این پروژه با مشخص شدن پارامترهای مؤثر بر استهلاك انرژی و انجام آنالیز ابعادی و بررسی مدل های اغتشاش و روش های انفصال، آنالیز برای 16 مدل با هندسه گوناگون برای دو دبی 3/6 lit/s (جریان ریزشی) و 25 litr/s (جریان رویه ای) یعنی جمعاً 32 مدل توسط نرم افزارهای Gambit و Fluent با انتخاب مدل اغتشاش  $K-\epsilon$  و روش حل VOF صورت گرفت. نتایج بدست آمده در حالت بدون لبه با نتایج آزمایشگاهی و رابطه چمنی و راجاراتنام و چانسون مقایسه گردید. نتایج چنین برمی آید که وجود لبه در انتهای پله ها میزان استهلاك انرژی جریان در طول شوت پله ای را افزایش می دهد البته میزان این تأثیر در رژیم های ریزشی و رویه ای تفاوت دارد و با افزایش دبی این اثرات کمتر می شود.

واژه های کلیدی: سرریز پلکانی، شوت پله ای، رژیم جریان، ضریب اصطکاک، روش عددی فلوئنت

### مقدمه

و...نسبت به تعیین میزان انرژی مستهلک شده اقدام

می گردد.

استفاده از سرریز پلکانی ضمن اینکه موجبات کاهش سرعت و افت انرژی بیشتر جریان از طریق ایجاد تلاطم در طول سازه را فراهم می نماید، باعث افزایش قدرت خود پالایی رودخانه بواسطه هوادهی مناسب در ناحیه پلکانهای سرریز نیز می گردد. میزان افت انرژی قابل توجه در این سازه سبب می گردد تا عمق حفاری حوضچه آرامش پایین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره های جانبی آن کاهش یابد. در سال های اخیر تلاش گسترده ای توسط محققان به منظور بررسی افت انرژی انجام شده است که در این قسمت به طور خلاصه سورنسن (۱۹۸۵)، بر روی سه مدل از سرریز پلکانی سد مونسکسویل در ایالت نیوجرسی آمریکا انجام داد. نسبت سرعت جریان در پاشنه سرریز صاف (مدل) به مقدار نظیر آن در سرریز پلکانی بین ۲٫۸ تا ۳ بود. نتایج نشان داد که سرعت در

طرح و استفاده از سرریزهای پلکانی حدود ۳۰۰۰ سال قدمت دارد. اولین سرریز پلکانی در سده در کشور یونان استفاده شد. امروزه نیز با توجه به اهمیت بهینه سازی انرژی در تمامی فعالیت های انسانی و به لحاظ کارایی مناسب در استهلاك انرژی سرریزهای پلکانی مورد استفاده واقع می گردند. که استهلاك انرژی جریان آب در این سازه توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف نموده است. صرفه اقتصادی و کاهش هزینه ها، استفاده از سرریزهای پلکانی را در پروژه های عمرانی چشمگیر کرده است. مستهلک سازی انرژی توسط عوامل مختلفی در سرریزهای پلکانی اتفاق می افتد. پارامترهای هندسی همچون تعداد، عرض و ارتفاع پله ها در مدل های مختلف با استفاده از نرم افزار فلوئنت مورد تجزیه و تحلیل واقع می گردند و با تغییرات در زبری (نوع مصالح)، لبه دار نمودن انتهای پله ها

تحقیق با استفاده از یک مدل عددی حجم محدود سه بعدی، میدان جریان بر روی این سرریز محاسبه می شود. بدین منظور در ابتدا صحت سنجی مدل عددی با شبیه سازی تعدادی از مدل‌های فیزیکی موجود انجام می گردد.

بیگی هرچگانی و منتصری (۱۳۹۶)، به بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی Fluent پرداختند. در این پژوهش شبیه سازی عددی جریان بر روی مدل سرریز پلکانی سد ژاوه، با استفاده از روش حجم محدود در محیط نرم افزار فلوئنت صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش دبی جریان از میزان افت انرژی نسبی در طول سرریز کاسته می شود. همچنین با افزایش تعداد پله ها میزان افت انرژی افزایش می یابد، البته افزایش بیش از حد تعداد پله ها میزان افت انرژی نسبی را کاهش می دهد.

### روش تحقیق

استفاده از مدل های عددی و بکار گیری الگوریتم آنها با توجه به شرایط آسانتر آنها در مقایسه با روش های آزمایشگاهی از یک سو و تطابق نزدیک آنها با نتایج آزمایشگاهی از سوی دیگر، سبب شده است تا در سالهای اخیر توجه مخصوصی را به خود معطوف نمایند. روش کار در این تحقیق بدین صورت است که سرریز پلکانی با پله هایی با ابعاد مختلف از نظر تعداد، عرض، ارتفاع و لبه دار بودن در انتهای پله تعبیه و جایگذاری می گردند. نوع مصالح مصرفی در بدنه پله ها (زبری) دستخوش تغییر واقع می گردد. تعداد پلکان ها و سایر عوامل دیگر که ممکن است بر استهلاک انرژی تاثیر گذار شوند، در نظر گرفته می شوند. متفاوت بودن عرض، ارتفاع، تعداد پله ها و زبری بدنه باعث می گردد که اثرات هر کدام از این پارامترها در میزان انرژی مستهلک شده مشخص گردد. مساله دیگری که در اینجا مورد توجه قرار می گیرد این است که جری آن عبور ی از روی سرریز پلکانی، جریانی با

پاشنه سرریز پلکانی سد ۹،۲ و برای سرریز صاف ۲۲،۹ متر بر ثانیه می باشد.

James (۲۰۱۴)، مدل جدیدی برای پله های سرریزهای پلکانی ارائه داد و لبه های پله ها را به صورت V شکل طراحی و نسبت به تجزیه و تحلیل داده ها اقدام نمود. این تغییر حالت باعث افزایش استهلاک انرژی در سرریزها گردید.

Pagliara و Chiavaccini (۲۰۱۶)، با ساخت مدل هایی در شیب های مختلف و استفاده از مصالح سنگی با اندازه های متفاوت به بررسی افت انرژی بر روی سرریز های پلکانی پرداختند. نتایج آنها حاکی از آن است که با افزایش اندازه زبری مقاومت جریان زیاد شده و متعاقباً افت انرژی افزایش می یابد و همچنین با افزایش شیب در آزمایشهای آنها مقدار افت انرژی کاهش یافت.

تابارا و همکاران (۲۰۱۵)، برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریز پلکانی و سرریز اوجی از شرایط مرزی سرعت ورودی استفاده کرده اند. برای شرایط انرژی مرزی اولیه از یک پروفیل جریان بر روی سرریز پلکانی یا سرریز اوجی استفاده کرده اند به اعتقاد تابارا و همکاران در سال ۲۰۱۵ این شرایط مرزی اولیه که به صورت پروفیل جریان روی سرریز پلکانی و اوجی استفاده می شود و زمان اجرای برنامه را کاهش می دهد و به حل میدان جریان در زمان کمتر کمک می کند. که در تحقیقات مذکور از نرم افزار ADINA و از روش اجزای محدود کمتر استفاده شده است.

منصوری و همکاران (۱۳۹۴)، نیز جریان روی سرریز های پلکانی آستانه دار را با نرم افزار FLUENT و با استفاده از روش حجم محدود و مدل آشفتگی k-ε شبیه سازی نمودند و نتایج بدست آمده جهت افت انرژی از روش عددی همخوانی مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

حکمت زاده و پاپاری (۲۰۱۵)، بررسی کاویتاسیون و استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با شیب کم به کمک روش عددی حجم محدود پرداختند. در این

خروجی جریان از شرط فشار خروجی استفاده شده است.

### تحلیل و آنالیز

#### مشخصات مدل مورد مطالعه

مدل مورد مطالعه مربوط به سررسز سد هرات یزد می باشد که مدل مطالعات مشابه آن در موسسه تحقیقات آب ساخته شده است. سرریز دارای ۲۳ پله با ارتفاع، طول و عرض به ترتیب ۳، ۱۷ و ۵۵ سانتیمتر می باشد. ارتفاع تاج سرریز از کف پله اول نیز ۳ سانتیمتر می باشد. آزمایشات برای ۲ دبی ۳/۶ لیتر بر ثانیه (جریان ریزشی) و ۲۵ لیتر بر ثانیه (رژیم رویه ای) انجام شده است. روش کار به این صورت است که در ابتدا لبه هایی با ابعاد مختلف از نظر ارتفاع، عرض و شیب بالادست لبه، در انتهای پله ها مدل شده و استهلاک انرژی جریان در رژیم های ریزشی و رویه ای بر روی این پله های لبه دار محاسبه می شود. متفاوت بودن ارتفاع، عرض و شیب لبه ها باعث می شود که اثرات هر کدام از این پارامترها در میزان انرژی مستهلک شده مشخص گردد. بنابراین در این پروژه با در نظر گرفتن ۱۶ هندسه گوناگون برای لبه ها اقدام به آنالیز در دو نوع جریان صورت گرفته است یعنی جمعاً ۳۲ مدل آنالیز و نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه به آن ها خواهیم پرداخت.

سطح آزاد می باشد و این سطح بایستی در دامنه مورد نظر تعیین گردد. با توجه به ماهیت سرریزهای پلکانی جریانی دو فازه شامل آب و هوا به وجود خواهد آمد. با استفاده از مدل VOF در نرم افزار Fluent می توان نحوه تشکیل سطح آزاد را مشاهده نمود.

به طور کلی یکی از مهمترین مراحل در تحلیل عددی میدان جریان، تعیین شرایط مرزی مناسب و منطبق بر شرایط فیزیکی مساله به منظور حل دقیق معادلات می باشد. با توجه به آنکه معادله حاکم بر جریان سیال، بسته به نوع سیال به لحاظ تراکم پذیری ثابت می باشد، اکثر تفاوت در مسائلی که در دینامیک سیالات محاسباتی مطرح می شود، ناشی از تفاوت در هندسه مسئله و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای آنهاست. اصولاً لحاظ نمودن شرایط مرزی در مسائل گوناگون نتایج را به مقادیر واقعی نزدیک تر می نماید.

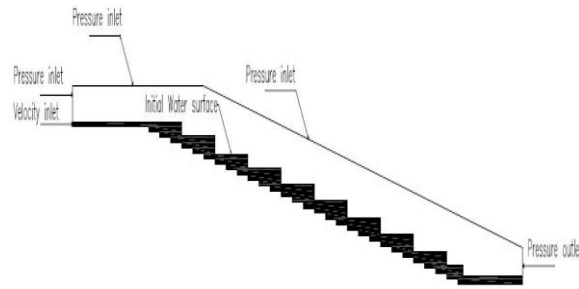
شرایط مرزی Velocity inlet , Pressure inlet & outlet , Mass flow inlet , out flow , Symmetry , Wall برای مسائل مربوط به هیدرولیک سرریزها و جریان با سطح آزاد به کار می روند. شرایط مرزی به نوع و شرایط مسئله مورد نظر بستگی دارد. در این پژوهش برای دیواره های کانال و سرریز شرط مرزی دیواره، برای ارتفاع آب ورودی و ارتفاع آزاد کانال شرط سرعت ورودی و برای صفحه

جدول ۱- مشخصات لبه های جاگذاری شده در انتهای پله ها

میلیمتر (s-x)		میلیمتر (s-x-z)		
۶-۵	۶-۱۰	۶-۵-۱۰	۶-۵-۱۵	۶-۵-۲۰
۸-۵	۸-۱۰	۸-۵-۱۰	۸-۵-۱۵	۸-۵-۲۰
۱۰-۵	۱۰-۱۰	۱۰-۵-۱۰	۱۰-۵-۱۵	۱۰-۵-۲۰

شرایط مرزی بسته به نوع و شرایط مسئله موردنظر بستگی دارد.

برای انجام این تحقیق و مدل سازی عددی سرریز پلکانی از شرایط مرزی که در شکل (1) ارائه شده است استفاده گردیده است.



شکل ۱- شرایط مرزی لحاظ شده در این پروژه

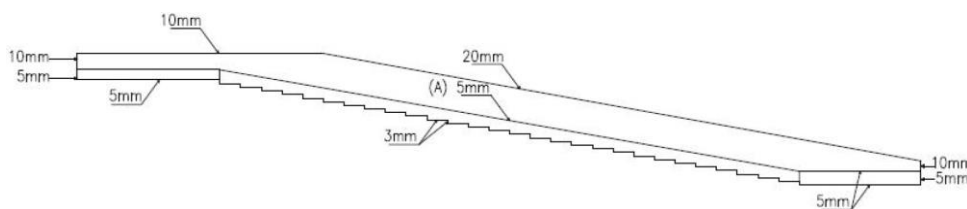
نتایج آنالیز عددی سرریزهای پلکانی

در شکل های (۲) ، (۳) ، (۴) ، می توان میدان محاسباتی و مش بندی را در مدل سرریز پلکانی ساده و لبه دار مشاهده نمود. در همه مدلها نوع مش بندی از نوع سه گوش می باشد. در این تحقیق مش نامنظم به کار گرفته شد که به نسبت مش منظم نتایج مناسب

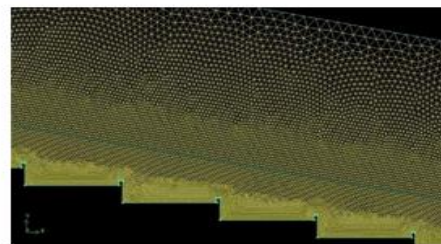
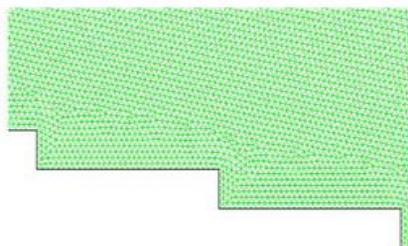
تری در توانایی نمایش وضعیت واقعی جریانهای گردابی در پله ها را داشت به همین دلیل در این تحقیق از مشبندی نامنظم استفاده شده است. آنالیز حساسیت مش بندی در نزدیکی پله ها در جدول (۲) مشاهده می شود.

جدول ۲- حساسیت مش بندی

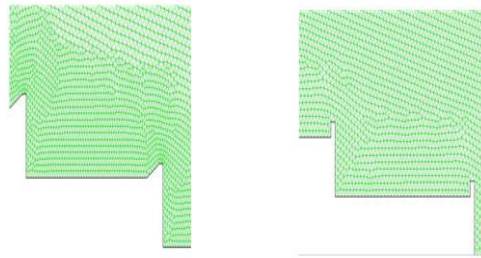
mesh	y(m)	v(m)
0.01	0.00701048	0.933668
0.005	0.00711115	0.920449
0.004	0.0071393	0.91682
0.003	0.00725268	0.902488
0.002	0.00725297	0.902452
0.001	0.00725267	0.902489



شکل ۲- اندازه مش بندی در نواحی مختلف مدل



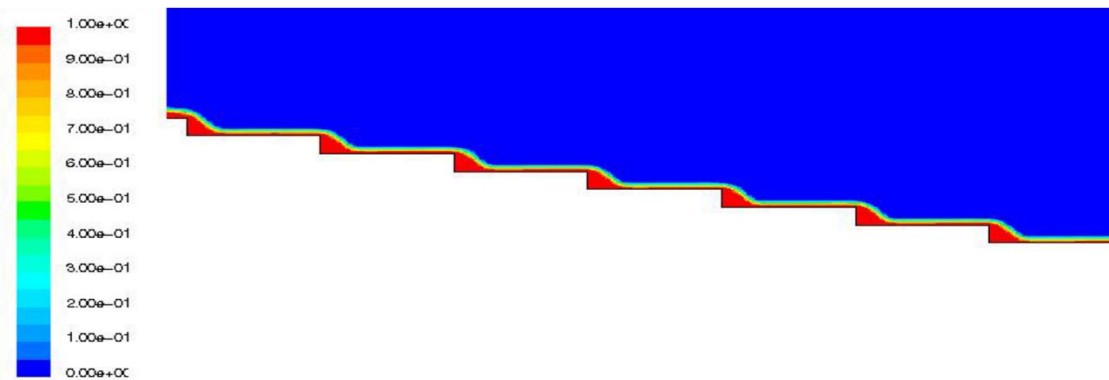
شکل ۳- نمایش مش بندی و توزیع اندازه آن در مدل



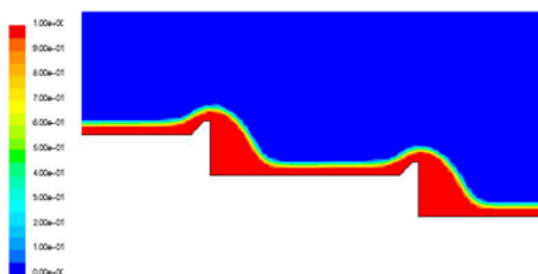
شکل ۴- مش بندی در پله های بدون لبه

ای نامیده شده اند و جریان هایی که دارای حالت ریزشی از روی پله هستند جریان های ریزشی نامگذاری شده اند.

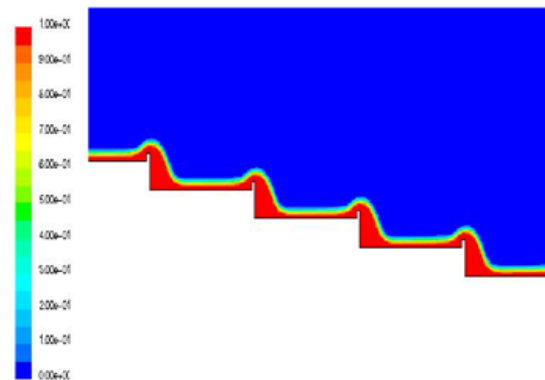
در شکل های (۵) تا (۹) پروفیل جریان شکل گرفته شده در مدل ها را می توان مشاهده نمود پروفیل های سطح جریان بدست آمده از آنالیزهای عددی که دارای سطحی صاف و پله ها در آنها غرق باشند جریان رویه



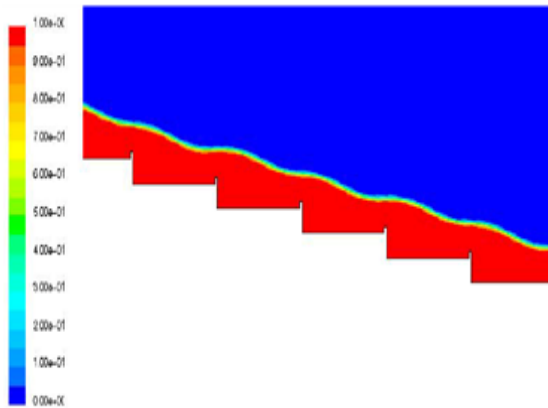
شکل ۵- پروفیل آب در حالت ریزشی



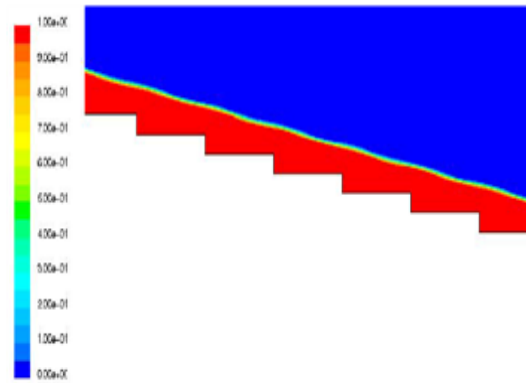
شکل ۷- پروفیل آب در حالت ریزشی در پله های لبه دار زاویه دار



شکل ۶- پروفیل آب در حالت ریزشی در پله های لبه دار قائم



شکل ۹- پروفیل آب در حالت رویه ای در پله های لبه دار قائم



شکل ۸- پروفیل آب در حالت رویه ای در پله های بدون لبه

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 93.24\%$$

(عدد بدست آمده از آنالیز عددی)

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 93.76\%$$

(عدد بدست آمده از مطالعه مشابه)

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 93.75\%$$

(عدد بدست آمده از رابطه چانسون)

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 93.80\%$$

(عدد بدست آمده از چمنی و راجاراتنام)

### آنالیز رژیم جریان ریزشی

در ابتدا آنالیز برای پله های معمولی و بدون لبه انجام شده و با اعداد بدست آمده از روابط چانسون، چمنی و راجاراتنام مقایسه می شود.

جدول (۳) - استهلاك انرژی بدست آمده از آنالیز عددی در حالت ریزشی

ردیف	مشخصات لبه (s- x- z)	v	y	Hres	Hres%	H/Hmax%
1	-	0.902608	0.007252	0.048666	6.759103	93.2409
2	6_5	0.738765	0.00886	0.036543	5.075358	94.92464
3	6_10	0.73396	0.008918	0.036239	5.033201	94.9668
4	6_5_10	0.740352	0.008841	0.036644	5.089383	94.91062
5	6_5_15	0.764638	0.00856	0.03823	5.30971	94.69029
6	6_5_20	0.765819	0.008547	0.038309	5.320699	94.6793
7	8_5	0.736272	0.00889	0.036385	5.05343	94.94657
8	8_10	0.727372	0.008999	0.035828	4.976101	95.0239
9	8_5_10	0.736603	0.008886	0.036406	5.056339	94.94366
10	8_5_15	0.738653	0.008861	0.036535	5.07437	94.92563
11	8_5_20	0.739121	0.008856	0.036565	5.078501	94.9215
12	10_5	0.709075	0.009231	0.034717	4.821804	95.1782
13	10_10	0.701476	0.009331	0.034269	4.759603	95.2404
14	10_5_10	0.727377	0.008999	0.035828	4.976146	95.02385
15	10_5_15	0.735446	0.0089	0.036333	5.046195	94.95381
16	10_5_20	0.735554	0.008899	0.036339	5.047142	94.95286

به دست می آید که ارتفاع، عرض و شیب لبه ها در میزان انرژی مستهلك شده تأثیرگذار هستند و تغییرات آنها استهلاك انرژی را تغییر می دهد.

در جدول (۳) میزان استهلاك انرژی به ازای لبه های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این که روابط چانسون، چمنی و راجارتنام برای پله های معمولی بوده و اثر لبه در آنها دیده نشده است، پس نیاز به رابطه ای می باشد که در آن استهلاك انرژی حاصل از لبه نیز قابل محاسبه باشد. با توجه به این که در رابطه چمنی و راجارتنام ضریب افت انرژی به طور مشخص به کار رفته، پس این رابطه به عنوان مرجع انتخاب و اثرات عرض، بلندی و شکل لبه در رابطه ضریب افت انرژی وارد می شود.

این نتایج نشان می دهد که عدد بدست آمده از آنالیز عددی با اعداد روابط ذکر شده در آزمایش بر روی همین مدل و همچنین با روابط چمنی و چانسون همخوانی داشته و بسیار به آنها نزدیک است. اکنون آنالیزها برای پله های لبه دار انجام می شود، به این صورتی که استهلاك انرژی جریان به ازای هر لبه جاگذاری شده در انتهای پله ها محاسبه می شود. آنچه از نتایج بدست می آید این است که تفاوت میزان انرژی در هر پله نسبت به پله دیگر همان ترم انرژی پتانسیل (Z) می باشد که این اختلاف برای دو پله متوالی به اندازه ارتفاع پله (hs) می باشد. به این ترتیب در صورتی که خط مبنا را پنجه شوت در نظر بگیریم ترم انرژی پتانسیل در این مکان صفر می باشد. با محاسبه استهلاك انرژی به ازای لبه های مختلف این نتیجه

جدول ۴- استهلاک انرژی بدست آمده از آنالیز و مقایسه آن با نتایج مطالعات مشابه در حالت ریزشی

ردیف	مشخصات لبه (s- x- z)	H/Hmax% نتایج آنالیز عددی	H/Hmax% نتایج مطالعات مشابه
1	-	93.2409	93.76
2	6_5	94.9246	94.94
3	6_10	94.9668	95.17
4	6_5_10	94.9106	94.94
5	6_5_15	94.6903	94.82
6	6_5_20	94.6793	94.82
7	8_5	94.9466	95.17
8	8_10	95.0239	95.4
9	8_5_10	94.9437	95.17
10	8_5_15	94.9256	95.17
11	8_5_20	94.9215	95.05
12	10_5	95.1782	95.4
13	10_10	95.2404	95.61
14	10_5_10	95.0239	95.4
15	10_5_15	94.9538	95.28
16	10_5_20	94.9529	95.28

که در آن  $x =$  عرض لبه،  $s =$  ارتفاع لبه و  $\beta =$  زاویه بالادست لبه می باشد. C از دو قسمت تشکیل شده است. 1- اثر لبه قائم 2- ضریب کاهنده برای زوایای مختلف

با توجه به این که کاهش زاویه بالادست لبه موجب کاهش استهلاک انرژی جریان می شود این ضریب به صورت کاهنده به کار می رود. به این ترتیب رابطه چمنی و راجاراتنام را می توان به صورت زیر برای پله های مجهز به لبه به کار برد. (الف، پدرام)

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left\{ (1-\alpha)^N \left[ 1 + 1.5 \left( \frac{h_c}{h_s} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i \right\}}{N + 1.5 \left( \frac{h_c}{h_s} \right)}$$

$$a = a - b \log \left( \frac{h_c}{h_s} \right) + c$$

$$a = 0.3 - 0.35 \left( \frac{h_c}{h_s} \right) \quad b = 0.54 + 0.27 \left( \frac{h_c}{h_s} \right) \quad c = \left( 1 - \frac{0.025}{tg^2 \beta} \right) \left[ 0.35 \log \left( 1 + \frac{0.4(x+2s)}{h_c} \right) \right]$$

آنچه مشخص می باشد این است که ارتفاع سقوط جت یا همان ارتفاع پله تغییر نکرده است، در واقع جهت به جای کف پله به استخر آب تشکیل شده برخورد می کند. همچنین طول پله نیز تغییری نکرده است. به این جهت یکی از عوامل استهلاک انرژی برخورد جت با استخر آب و عامل دیگر برخورد آب با عرض لبه است. به این ترتیب با ثابت بودن  $ls, hs$  باید عبارتی که حاصل اثرات لبه بر استهلاک انرژی جریان می باشد را به رابطه a وارد کرد. با توجه به نتایج و مقایسه آنها با یکدیگر رابطه ای بدست می آید که در آن اثرات لبه هم دیده شود به این صورت درصد استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی لبه دار نیز همچون پله های معمولی قابل دستیابی است.

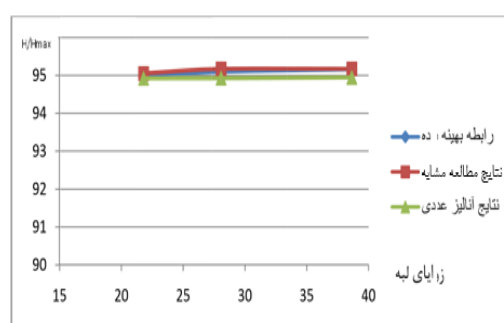
رابطه اضافه شده به ضریب افت انرژی که شامل اثرات لبه می شود به صورت زیر است: (الف، پدرام)

$$c = \left( 1 - \frac{0.025}{tg^2 \beta} \right) \left[ 0.35 \log \left( 1 + \frac{0.4(x+2s)}{h_c} \right) \right]$$

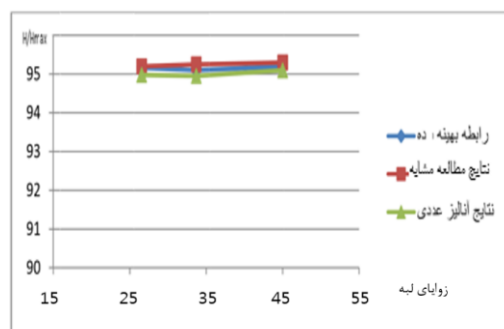


جدول ۵- مقایسه نتایج عددی و مطالعات مشابه و رابطه بهینه شده (پدرام) در حالت ریزشی

ردیف	مشخصات لبه (s- x- z)	H/Hmax% نتایج آنالیز عددی	H/Hmax% نتایج مطالعات مشابه	H/Hmax% رابطه بهینه شده (الف، پدرام)
1	-	93.2409	93.76	93.8
2	6_5	94.9246	94.94	95.08
3	6_10	94.9668	95.17	95.26
4	6_5_10	94.9106	94.94	94.94
5	6_5_15	94.6903	94.82	94.84
6	6_5_20	94.6793	94.82	94.71
7	8_5	94.9466	95.17	95.21
8	8_10	95.0239	95.4	95.43
9	8_5_10	94.9437	95.17	95.16
10	8_5_15	94.9256	95.17	95.1
11	8_5_20	94.9215	95.05	95.01
12	10_5	95.1782	95.4	95.39
13	10_10	95.2404	95.61	95.59
14	10_5_10	95.0239	95.4	95.36
15	10_5_15	94.9538	95.28	95.32
16	10_5_20	94.9529	95.28	95.26



نمودار ۱- مقایسه درصد استهلاك انرژی بین لبه های قائم با عرض ۱۰ میلیمتر در حالت ریزشی



نمودار ۲- مقایسه درصد استهلاك انرژی بین لبه با زوایای مختلف و با ارتفاع ۱۰ میلیمتر در حالت ریزشی

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 79.78\% \quad (\text{عدد بدست آمده از آنالیز عددی})$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 82.06\% \quad (\text{عدد بدست آمده از مطالعه مشابه})$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 81.49\% \quad (\text{عدد بدست آمده از رابطه چانسون})$$

رژیم جریان رویه ای

با توجه به آن که در آنالیز عددی امکان محاسبه ضریب اصطکاک (f) در ابتدا وجود ندارد باید از رابطه عمق مخلوط استفاده کرد. در ابتدا آزمایش برای پله های معمولی انجام می شود و با رابطه چانسون مقایسه می شود.

جدول ۶- استهلاک انرژی بدست آمده از آنالیز عددی در حالت رویه ای

ردیف	مشخصات لبه (s- x- z)	v	y	Hres	Hres%	H/Hax%
1	-	1.634889	0.027803	0.163612	0.202164	79.78355
2	6_5	1.363814	0.033329	0.127623	0.157696	84.23044
3	6_10	1.342201	0.033866	0.125171	0.154665	84.53347
4	6_5_10	1.350877	0.033648	0.126147	0.155872	84.41277
5	6_5_15	1.37285	0.03311	0.128667	0.158986	84.10139
6	6-5_20	1.376284	0.033027	0.129067	0.15948	84.05199
7	8_5	1.339657	0.03393	0.124886	0.154314	84.56861
8	8_10	1.322989	0.034357	0.123045	0.152039	84.7961
9	8_5_10	1.346801	0.03375	0.125687	0.155304	84.46963
10	8_5_15	1.356852	0.0335	0.126826	0.156711	84.32892
11	8_5_20	1.356812	0.033501	0.126821	0.156705	84.32949
12	10_5	1.306879	0.034781	0.121303	0.149886	85.01138
13	10_10	1.297515	0.035032	0.120307	0.148656	85.13442
14	10_5_10	1.312653	0.034628	0.121923	0.150653	84.93474
15	10_5_15	1.334269	0.034067	0.124287	0.153573	84.64267
16	10_5_20	1.306165	0.0348	0.121227	0.149792	85.02081

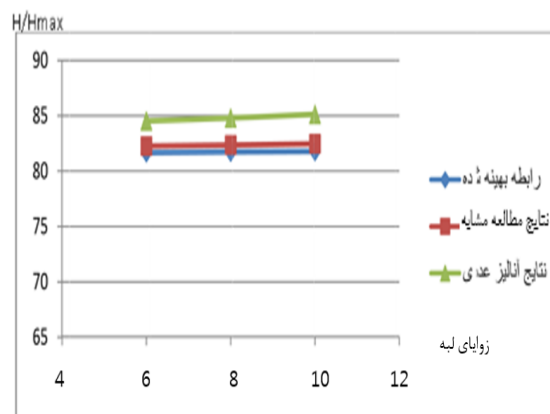
شود و در این صورت رابطه f به صورت زیر تکمیل می شود: (الف، پدرام)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.43 - 0.2676 \ln \left( \frac{h \cos \theta}{D_H} \right) - e \quad e = 0.125 \ln \left[ 1 + 1.75 \left( \frac{s}{h_i} \right) \right]$$

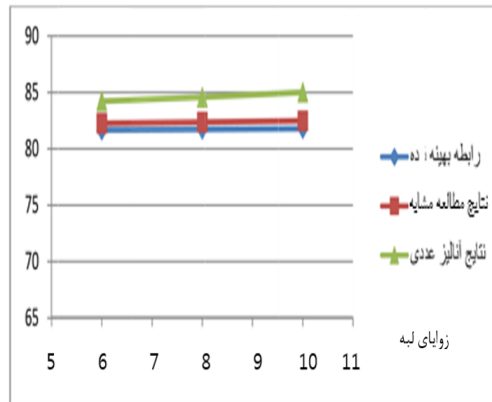
با توجه به آنکه این نتایج نشان از مؤثر بودن بلندی لبه در میزان استهلاک انرژی جریان دارد باید به نوعی اثرات لبه را هم در رابطه f وارد کرد. با بررسی نتایج مطالعات مشابه و مشخص شدن میزان اثرات لبه ها، عبارت زیر برای پوشش این اثر پیشنهاد می

جدول ۷- مقایسه نتایج عددی و مطالعات مشابه و رابطه بهینه شده (پدram) در حالت رویه ای

ردیف	مشخصات x-کلیه ( $z$ - )	H/Hres% نتایج آنالیز عددی	H/Hres% نتایج مطالعات مشابه	H/Hres% رابطه بهینه شده (الف، پدram)
1	-	79.78355	82.06	82.06
2	6_5	84.23044	82.27	81.67
3	6_10	84.53347	82.27	81.67
4	6_5_10	84.41277	82.27	81.67
5	6_5_15	84.10139	82.27	81.67
6	6-5_20	84.05199	82.27	81.67
7	8_5	84.56861	82.37	81.73
8	8_10	84.7961	82.37	81.73
9	8_5_10	84.46963	82.37	81.73
10	8_5_15	84.32892	82.37	81.73
11	8_5_20	84.32949	82.37	81.73
12	10_5	85.01138	82.48	81.79
13	10_10	85.13442	82.48	81.79
14	10_5_10	84.93474	82.48	81.79
15	10_5_15	84.64267	82.48	81.79
16	10_5_20	85.02081	82.48	81.79

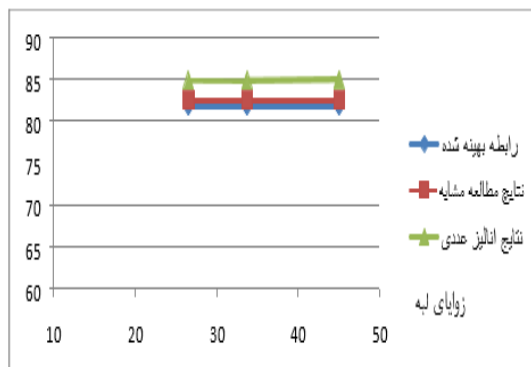


نمودار ۳- مقایسه درصد استهلاک انرژی بین لبه های قائم با عرض ۱۰ میلیمتر در حالت رویه ای

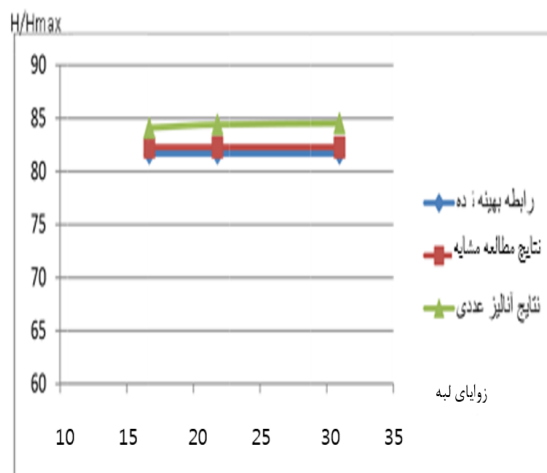


نمودار ۴- مقایسه درصد استهلاک انرژی بین لبه های قائم با عرض ۵ میلیمتر در حالت

رویه ای



نمودار ۵- مقایسه درصد استهلاک انرژی بین لبه با زوایای مختلف و با ارتفاع ۸ میلیمتر در حالت رویه ای



نمودار ۶- مقایسه درصد استهلاک انرژی بین لبه با زوایای مختلف و با ارتفاع ۶ میلیمتر در حالت رویه ای

### نتیجه گیری

نتایج بررسی آنالیز جریان ریزشی نشان میدهد که عرض، ارتفاع و زاویه بالادست لبه در میزان استهلاک انرژی تأثیر دارند.

وجود لبه در انتهای پله ها میزان استهلاک انرژی جریان در طول شوت پله ای را افزایش می دهد.

- نتایج بررسی آنالیز جریان رویه ای نشان میدهد که لبه ها تأثیر ناچیزی بر میزان استهلاک انرژی دارند.
- با افزایش عرض و ارتفاع لبه، میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد.
- همچنین لبه قائم نسبت به لبه زاویه دار انرژی بیشتری را مستهلک می کند هر چه زاویه بالادست لبه کاهش یابد استهلاک انرژی هم کاهش می یابد.
- تغییرات عرض لبه ها و همچنین زاویه بالادست آن تأثیری در میزان استهلاک انرژی ندارند و فقط ارتفاع لبه بر میزان استهلاک انرژی تأثیر می گذارد و باعث افزایش آن می گردد

### منابع

۱. بیگی هرچگانی، ص. و منتصری، م. (۱۳۹۶)، بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی فلوینت، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد.
۲. دادرس، ا. و نژادنادری، م. (۱۳۹۶)، شبیه سازی عددی جریان برای بررسی تغییرات افت انرژی در پایین سرریز پلکانی در حوضچه های آرامش، ماهنامه پایا شهر ۱ بیرامی، م. ک. (۱۳۹۴). سازه های انتقال آب، چاپ سیزدهم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
۳. ورجاوند، پ و خسروی نیا، پ و سلماسی، ف. (۱۳۸۷)، "بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل عددی Fluent"، چهارمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
۴. حکمت زاده، ع. پاپاری، س. (۲۰۱۵)، بررسی کاویتاسیون و استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با شیب کم به کمک روش عددی حجم محدود، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب، مرکز همایش های بین المللی شهید بهشتی.
۵. دادرس، ا. و نژادنادری، م. (۱۳۹۶)، شبیه سازی عددی جریان برای بررسی تغییرات افت انرژی در پایین سرریز پلکانی در حوضچه های آرامش، ماهنامه پایا شهر ۱ (۳).
۶. رجبی، م. و منصور، ع. (۱۳۹۴)، بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی لبه دار شیبدار با استفاده از نرم افزار فلوینت، سومین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دائمی کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی.
7. Chanson, H., & Gonzalez, C. A., "Physical modeling and scale effects of air-water flows on stepped spillway hydraulic", Journal of Zhejiang University Science, Vol. 6A, No. 3, 243-250, 2015.
8. Tabbara, M., Chatila, J., and Awwad, R., (2015). "Computational simulation of flow over stepped spillways." Journal of computers and Structures. No. 83, 2215-2224.
9. Boes, R. M., Hager, H. W., "Hydraulic design of stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 9, 67
10. 1-679, 2013
11. Chamani, M. R., & Rajaratnam, N., "Jet flow on stepped spillways", Journal of hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 2, 254-259, 2014.
12. Chinnarasi, C., & Wongwisess, S., "Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 1, 70-76, 2016.

13. Chanson, H., "The Hydraulics of stepped chutes and spillway", Balkema Publisher, Tokyo, 2011.
14. Tabbara, M., Chatila, j., and Awwad, R., (۲۰۱۵). :computational simulation of flow over stepped spillways." Journal of computers and Structures. No. ۸۳, ۲۲۱۵-۲۲۲۴.
15. Mansoori A, Hamedi AM, 2011. Scrutinization of energy loss in stepped