

## تأثیر ایجاد ناهمواری در پایین دست سرریز اوجی در کنترل پرش هیدرولیکی

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۲</sup> و وحید ساعی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار؛ و استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۶

### چکیده

در این پژوهش، ناهمواری‌ها در پایین دست سرریز اوجی برای جریان‌های مختلف شبیه‌سازی عددی شده و اثر ناهمواری در تغییر رژیم جریان، پروفیل سطح آب و افت انرژی بررسی شده است. بر این اساس پس از ایجاد دامنه حل، مش بندی و مشخص کردن شرایط مرزی، شبیه‌سازی عددی با استفاده مدل آشفتگی k-ε استاندارد اجرا و برای صحت‌سنجی نتایج عددی از مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی چاتیل و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004) استفاده شده است. در ادامه نیز به تاثیر سه نوع ناهمواری در پایین دست سرریز و مقایسه آن با حالت شاهد و بر مشخصات جریان پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع ناهمواری‌ها میزان افت انرژی تا ۸۰ درصد نیز افزایش می‌یابد. به طور متوسط نیز ناهمواری‌های ۳ و ۴ که باعث تغییر رژیم جریان شده‌اند و بین ۵۰ تا ۷۰ درصد افت انرژی ایجاد کرده‌اند. افزایش دبی جریان بر پروفیل سطح آب و افت انرژی تاثیر مستقیم دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، اگر طراحی حوضچه آرامش مد نظر باشد، ناهمواری‌ها با ارتفاع  $0.7H_d$  قادر به تغییر رژیم جریان هستند و به عنوان موفق ترین طرح پیشنهاد می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

افت انرژی، پروفیل سطح آب، رژیم جریان

### مقدمه

انرژی جنبشی مخرب را مستهلک می‌کند، مقداری از این انرژی به واسطه موانع گرفته می‌شود (Sadjadi & Saadi, 2017).

پژوهشگران زیادی به مطالعه سرریزهای اوجی و پرش هیدرولیکی پرداخته‌اند. بیشتر این تحقیقات با ساخت مدل فیزیکی همراه بوده است. با تولید نسل جدید کامپیوترهای دارای پردازنده بسیار قوی، دانشمندان به دلیل صرفه جویی در وقت و هزینه و نیز به دلیل بالا بودن دقت کار، علاقه مند به حل معادلات پیچیده ریاضی با استفاده از کامپیوتر شدند و از مدل‌های عددی استفاده کردند. هندرسون و همکاران (Henderson et al., 1991)، یلدیز و کاس (Yildiz & Kas, 1998)، سانگ و ژو (Song

از پدیده‌های مهم در پایین دست سرریزهای اوجی شکل، پرش هیدرولیکی است. پرش هیدرولیکی سبب کاهش انرژی آب در جریان می‌شود که نهایتاً به محافظت پایین دست می‌انجامد. پرش هیدرولیکی می‌تواند روی کف‌های نسبتاً افقی یا کف‌های شیب‌دار، با مانع یا بدون مانع به وجود آید و بدیهی است بسته به اینکه در کدام یک از موقعیت‌های مذکور پرش حاصل گردد، خصوصیات d کاملاً متفاوت خواهد داشت. مستهلک کردن انرژی در پنجه سرریز، برای جلوگیری از فرسایش بستر رودخانه در پایین دست، بسیار لازم است. ایجاد ناهمواری‌ها در پایین دست سرریز اوجی بخشی از این

عددی روی سرریز به نتیجه پروفیل فشار مدل فیزیکی روی سرریز نزدیک است.

هو و همکاران (Ho *et al.*, 2003) با بررسی اثرهای حداکثر سیلاب محتمل بر سرریز اوجی دریافتند که تولید فشار منفی زیاد روی تاج سرریز ممکن است به ناپایداری و کویتاسیون در سرریز بینجامد. این محققان با توصیف مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی و سه بعدی رفتار سرریز در اثر افزایش ارتفاع سیلاب دریافتند که نتایج به دست آمده با اطلاعات آزمایشگاهی موجود تطابق خوبی دارد و از این روش برای بررسی رفتار سازه چندین سرریز در استرالیا استفاده کردند. چاتیل و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004) با مدل‌سازی عددی جریان روی سرریز اوجی، پروفیل جریان در این سرریز را بررسی کردند. این محققان در بررسی‌های خود برای پیشگویی سطح آزاد روی سرریز اوجی و مدل کردن میدان جریان با استفاده از مدل جریان  $k-\epsilon$  از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی آدینا به روش المان محدود بهره گرفتند. نتایج مطالعات آنان نشان داد که نرم‌افزار آدینا برای حالت‌های مختلف توصیف شده روی سرریزها سازگار است و تطابق خوبی با داده‌های عملی دارد.

جانسون و سویچ (Johnson & Savage, 2006) با مقایسه عددی و فیزیکی جریان روی سرریز با در نظر گرفتن عمق پایاب نشان دادند که بین مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی سرعت جریان و توزیع فشاری روی سرریز تطابق خوبی وجود دارد. دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz *et al.*, 2014) با بررسی روش‌های المان محدود و حجم محدود در شبیه‌سازی سرریزهای اوجی و پلکانی مشاهده کردند که هر دو روش تطابق خوبی با داده‌های عملی ارائه می‌دهند. این محققان دریافتند که خطای روش حجم محدود، در مقایسه با روش المان محدود، کمتر است. در تحقیقات آنان برای شبیه‌سازی حجم محدود، از نرم‌افزار فلونت و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$

(Zhou, 1999), چمنی و راجاراتنام (Chamani & Rajaratnam, 1999), پگرام و همکاران (Pegram *et al.*, 1999) و سانچز و همکاران (Sanchez *et al.*, 2000) با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی سعی کرده‌اند مشکلات جریان روی سرریز اوجی را مرتفع کنند. تاسی و یوی (Tsai & Yue, 1996) و رحمان و چادری (Rahman & Chaudry, 1997) درباره مزایا و معایب روش‌های محاسباتی جریان با سطح آزاد بحث کرده‌اند. اسی (Assy, 2001) روش تفاضل محدود را با یک نمایش جدید از ضوابط نیومن در نقاط مرزی، برای شبیه‌سازی جریان در سرریزها، به کار گرفت. لنو و کسیدی (Lenau & Cassidy, 1969) جریان غیر چرخشی، غیر لزج و دو بعدی توزیع فشار بستر جریان آب در پرتابه جامی شکل واقع در انتهای سرریز را پیش‌بینی کردند. این محققان در این پژوهش اثر شتاب را در نظر گرفتند و دریافتند که نتایج تحلیل عددی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی دارد.

بورگیسر و راشمن (Burgisser & Rutschmann, 1999) مولفه قائم جریان روی تاج سرریز اوجی در فضای دو بعدی را به روش المان محدود و با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و آشفته تحلیل کردند. معادلات حاکم بر جریان، معادلات رینولدز بود که نتایج حاصل از حل عددی در تعیین ضریب دبی سرریز و نحوه توزیع فشاری روی سرریز به نتایج تجربی بسیار نزدیک به دست آمد. سویچ و جانسون (Savage & Johnson, 2001) با استفاده از یک مدل فیزیکی با مدل عددی و مطالعات موجود، پارامترهای جریان را روی سرریزهای اوجی استاندارد مقایسه کردند. مدل فیزیکی از جنس پلکسی گلاس و در یک فلوم آزمایشگاهی قرار داشت. جریان عبوری از روی سرریز اوجی استاندارد را با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد به روش حجم محدود، با نرم‌افزار Flow3D بررسی کردند و دریافتند که نتیجه پروفیل فشار به دست آمده از مدل

به صورت عددی شبیه سازی و تأثیر ناهمواری ها در پایین دست سرریز بر رفتار و مشخصات جریان بررسی شده است. در اینجا از مدل عددی فلوئنت به منظور شبیه سازی جریان بهره گرفته شده است. سرریز اوجی مورد بررسی، سرریز اوجی مدل آزمایشگاهی چاتیللا و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004) است و تأثیر ناهمواری ها بر مشخصات جریان نیز بر همین سرریز ارزیابی شده است. گفتنی است که در شبیه سازی عددی، از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد به منظور شبیه سازی آشفتگی جریان بهره گرفته شده است.

### مواد و روش ها

#### مشخصات پروفیل سرریز اوجی مورد ارزیابی

بدنه پروفیل سرریز بر اساس جدول طراحی ۱۱۱/۲-۲ از USACE-WES طراحی شده است (Chatila & Tabbara, 2004). اجزای بدنه سرریز عبارتند از یک صفحه قائم در بالادست (قسمت ۱ در شکل ۱)، دو کمان با شعاع انحنای  $H_d/2$  و  $H_d/5$  در قسمت تاج سرریز (قسمت ۲ و ۳ در شکل ۱)، بدنه منحنی سرریز که از طریق رابطه ۱ رسم شده است (قسمت ۴ در شکل ۱)، قسمت خطی (قسمت ۵ در شکل ۱) و منحنی معکوس برای انتقال جریان از بدنه سرریز به حوضچه آرامش (قسمت ۶ در شکل ۱).

بدنه سرریز اوجی با رابطه  $x^n = KH_d^{1-n}y$  تعریف شده که این رابطه با استفاده از ضریب های ثابت  $K=2$ ،  $n=0.85$  و  $H_d=5/0.8$  سانتی متر برای این سرریز توصیف می شود. در رابطه فوق،  $H_d$  هد طراحی سرریز است و شیب قسمت خطی بدنه سرریز ۶۰ درجه (یا شیب ۱/۷۳) در نظر گرفته شده است. رابطه ۱، معادله قسمت منحنی اوجی سرریز را توصیف می کند.

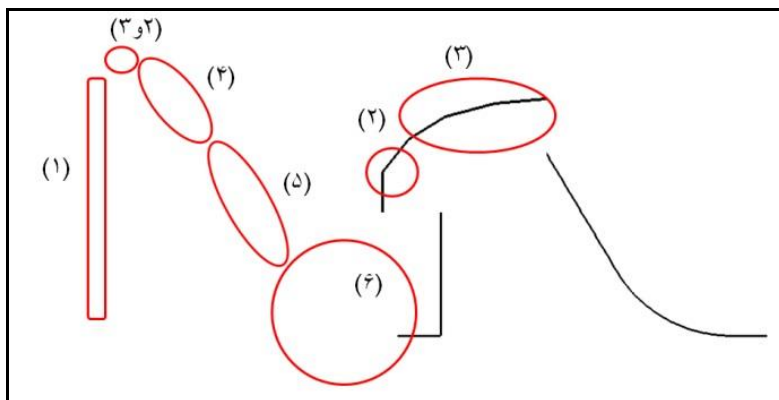
$$y = 0.1256x^{1.85} \quad (1)$$

استفاده شده است.

شیخ کاظمی و همکاران (Sheikh-Kazemi et al., 2016) مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی سد گرمی - چای میانه را در سه مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ ساختند و به بررسی اثر مقیاس بر پروفیل سطح آب در این سرریز با انحنا در پلان و با دیواره های جانبی همگرا پرداختند. نتایج بررسی های این محققان نشان داد که در نسبت دبی به دبی طراحی برابر با ۰/۳، به دلیل تأثیر زیاد لزوجت و کشش سطحی میزان اختلاف ارتفاع سطح آب در مدل با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ نسبت به مقیاس مبنا به ترتیب برابر ۴/۱۸ و ۶/۱۵ درصد است. اسدی و همکاران (Asadi et al., 2016) در مطالعه آزمایشگاهی تأثیر قطر متوسط ذرات در شرایط زبری طبیعی بستر بر نسبت عمق ثانویه به اولیه، استهلاك انرژی نسبی پرش هیدرولیکی، ضریب نیروی برشی را بررسی کرده روابطی برای هر یک از موارد فوق ارائه داده اند.

سجادی و سعدی (Sadjadi & Saadi, 2017) اثر روزنه دار بودن آستانه پلکانی بر خصوصیات پرش در پایین دست سرریز اوجی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آزمایش ها برای چهار میزان بازشدگی (۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درصد) در سه فاصله نسبی مختلف اجرا شد. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که استفاده از آستانه پلکانی روزنه دار در حوضچه آرامش اثری مثبت بر کنترل و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی دارد. پلتیر و همکاران (Peltier et al., 2017) اندازه گیری های سرعت و فشار را روی دو مدل فیزیکی سرریز اوجی با مقیاس های مختلف در بار آبی بیشتر از بار آبی طرح صحت سنجی کردند. مقایسه نتایج مربوط به سرعت اندازه گیری شده نشان داد که اثر مقیاس ناچیز است. در حالی که در اندازه گیری فشار نسبی در دبی های بالا تفاوت هایی مشاهده می شود.

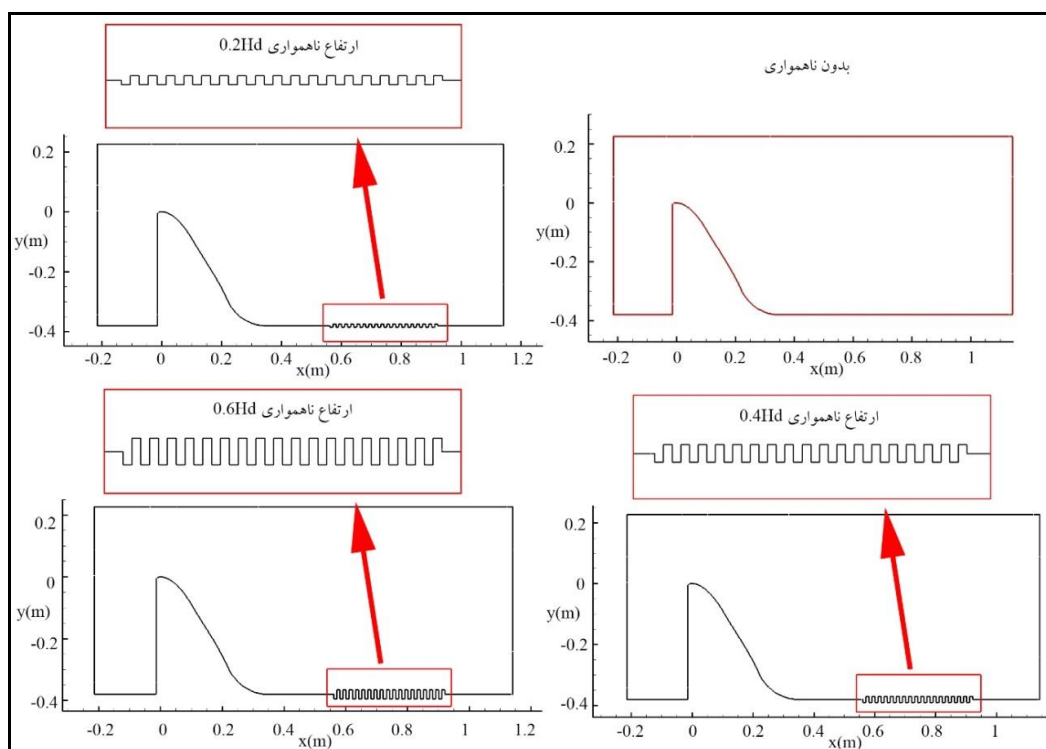
در تحقیق حاضر، جریان روی یک سرریز اوجی



شکل ۱- قسمت‌های مختلف بدنهٔ پروفیل سرریز

متفاوت عبور داده شده است که به جزئیات آن پرداخته خواهد شد. نتایج مربوط به پروفیل سطح آب با نتایج آزمایشگاهی چاتیلو و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004) مقایسه شده و مدل عددی صحت‌سنجی شده است.

شکل ۲ بدنهٔ سرریز و دامنهٔ حل در حالت بدون ناهمواری و وجود نوع ۳ ناهمواری در پایین دست سرریز را نشان می‌دهد. طول و عرض دامنهٔ حل به ترتیب ۱/۳۶ و ۰/۶ متر است. از روی این سرریز، سه جریان با بار آبی



شکل ۲- سرریز اوجی شاهد و ناهمواری‌های ایجاد شده

دارای ناهمواری‌هایی با ارتفاع  $0.2H_d$  (۱۰/۱۶ میلی‌متر)،  $0.4H_d$  (۲۰/۳۲ میلی‌متر) و  $0.6H_d$  (۳۰/۴۸ میلی‌متر) است. عرض و فاصلهٔ ناهمواری‌ها برابر  $0.2H_d$  و در طول

مشخصات هندسی ناهمواری‌های ایجاد شده مطالعه حاضر در چهار گروه از نظر ناهمواری اجرا شده است. حالت اول بدون ناهمواری و سه حالت بعدی

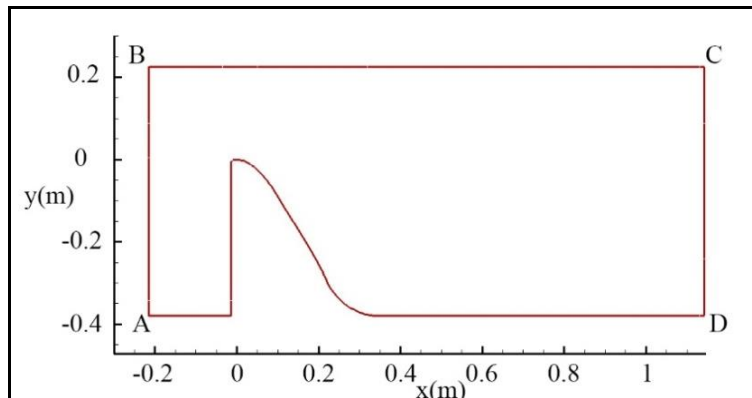
معلوم بودن سرعت جریان و ارتفاع هد آبی ورودی از نوع مرز ورودی فشار است که در آن مقدار سرعت ورودی جریان و هد آبی در مرز ورودی در نرم افزار فلوئنت وارد شده است. مرز AB شامل کف کانال و بدنه سرریز لبه پهن، از نوع شرط مرزی دیوار است و اصل عدم لغزش در آن لحاظ شده است. مرزهای BC و CD نیز از نوع شرایط مرزی خروجی فشار با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

در سرریز معرفی شده، مستقل از نوع ناهمواری اعمالی، سه جریان با بار آبی و دبی متفاوت عبور داده شده است. جدول ۱ مقدار هد و سرعت در این مرز را برای دبی های مختلف نشان می دهد.

۰/۳۶ متر به فاصله ۰/۲۲ متر از پنجه سرریز در نظر گرفته شده است. این فاصله با در نظر گرفتن توسعه یافتگی جریان بر اساس رویکرد آزمون و خطا، تعیین شد. شکل ۲ جزئیات ناهمواری ها را نشان می دهد.

### شرایط مرزی

شرایط مرزی از جمله گام های اساسی در هر شبیه سازی عددی است. در واقع، شرایط مرزی ارتباط بین دامنه حل و محیط اطراف را نشان می دهد. در این مطالعه، شرایط مرزی در نرم افزار گمبیت اعمال شده است. در شکل ۳، دامنه حل و شرایط مرزی مشخص شده است. در این شکل، مرز ورودی یا مرز AD با توجه به



شکل ۳- سرریز اوجی و شرایط مرزی اعمال شده

جدول ۱- شرایط مرزی در مرز AD سرریز لبه پهن برای دبی های مختلف

نوع ناهمواری	۱	۲	۳
بار آبی	$1/5 H_d$	$1 H_d$	$0.75 H_d$
سرعت ورودی جریان (متر بر ثانیه)	۰/۱۰۲۵	۰/۰۵۵۳۹	۰/۰۳۵۶۶

سرعت تحلیل بالایی دارند و از این رو فقط در هندسه های منظم قابل استفاده اند. مزیت مش های غیر ساختاریافته با وجود زمان بر بودن تحلیل آنها، به کارگیری آنها در هندسه های پیچیده است. از این رو با تقسیم دامنه حل به هندسه های منظم و نامنظم، می توان ترکیبی از مش های ساختاریافته و غیر ساختاریافته را به کار برد و سرعت

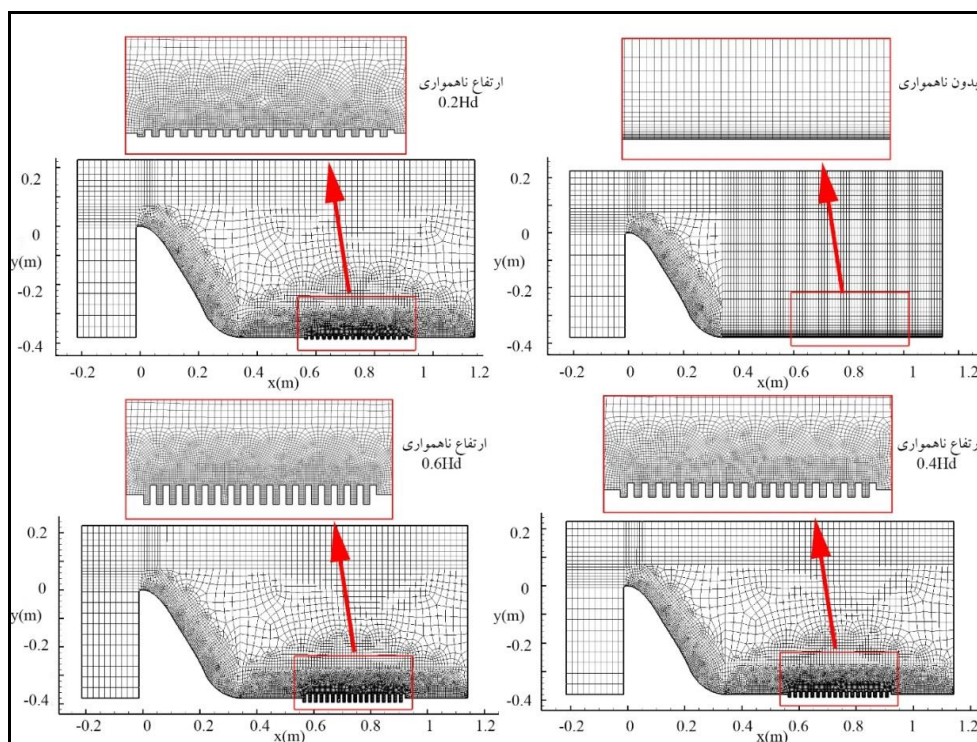
### مش بندی و گسسته سازی معادلات

مش بندی در مطالعه حاضر با نرم افزار گمبیت صورت گرفته است. نرم افزار گمبیت قابلیت ایجاد انواع مختلف مش های رایج در دینامیک سیالات محاسباتی را داراست. در این بررسی از مش های چهار وجهی ساختاریافته و غیر ساختاریافته استفاده شده است. مش های ساختاریافته

تحلیل را تا حد امکان افزایش داد. در شکل ۴، جزئیات مش‌بندی سرریز اوجی برای حالت بدون ناهمواری و سه حالت مختلف ناهمواری معرفی شده نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز تعداد مش‌های ایجاد شده در هر نوع از ناهمواری‌ها ارائه شده است. یادآوری می‌شود که در حالت‌های دو تا چهار، سعی شده است تعداد مش‌ها حتی‌الامکان نزدیک هم در نظر گرفته شود.

جدول ۲- تعداد مش‌های اعمال شده در ۴ نوع سرریز لبه‌پهن

ارتفاع ناهمواری	صفر	$0.2H_d$	$0.4H_d$	$0.6H_d$
تعداد مش	۵۰۹۴	۸۲۰۴	۸۸۵۴	۹۲۱۷



شکل ۴- مش بندی سرریز اوجی با ارتفاع‌های ناهمواری متفاوت

طرح آپویند مرتبه اول و برای حل هم‌زمان کردن سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است (Patankar, 1980).

### نتایج و بحث

#### صحت‌سنجی نتایج

در این مطالعه، نتایج عددی پروفیل سطح آب با نتایج آزمایشگاهی چاتیل و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004)

گسسته‌سازی معادلات حاکم (معادلات ناویر استوکس) در دامنه حل، هدف اصلی تمامی روش‌های عددی از جمله روش حجم‌های محدود است. این گسسته‌سازی با الگوریتم‌های متنوعی در نرم‌افزار فلوئنت در دسترس است.

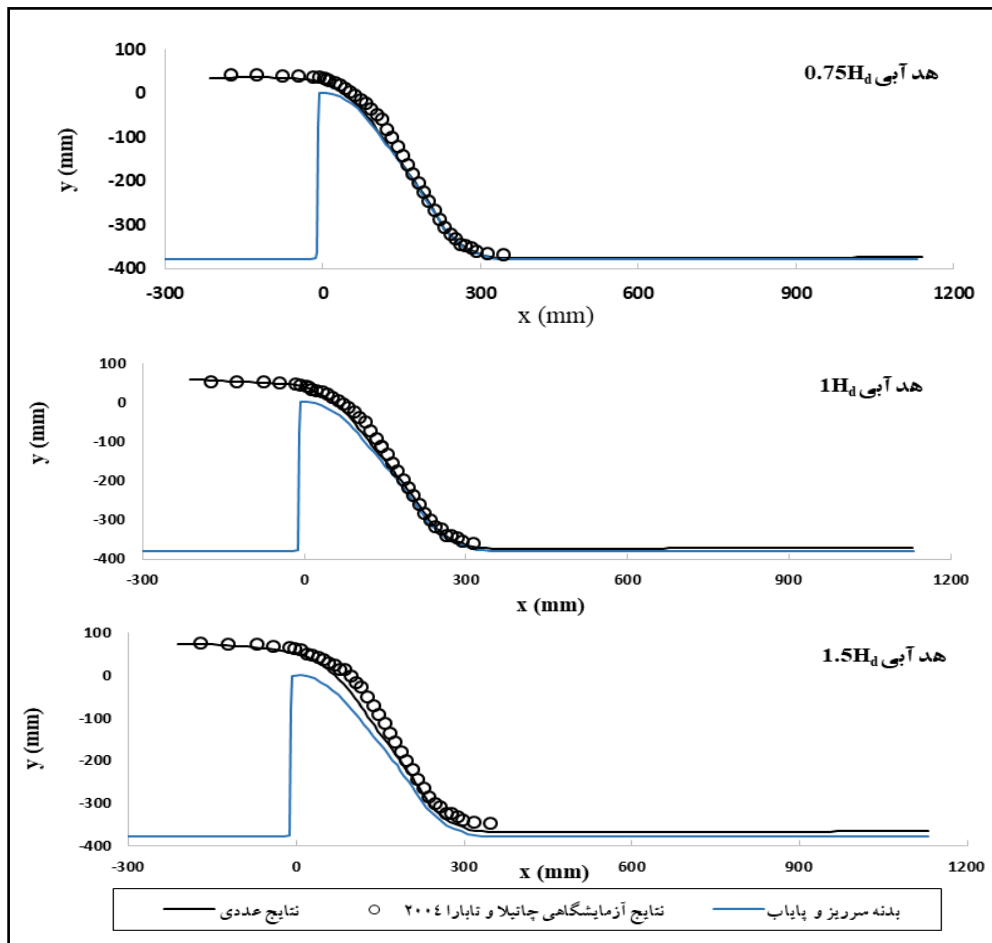
در این مطالعه، برای گسسته‌سازی فشار از طرح استاندارد، برای انفعال جملات جابه‌جایی معادلات ممنتم و جملات جابه‌جایی معادلات آشفتگی از



تأثیر ایجاد ناهمواری در پایین دست سرریز اوجی...

شده است. در این شکل، محور افقی و قائم به ترتیب بیانگر بعد طولی و دامنه حل بر حسب میلی متر است.

در سه جریان مختلف مقایسه و با شاخص های آماری به صورت کمی ارزیابی شده است. در شکل ۵، به مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب پرداخته



شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب برای هدهای آبی مختلف

از ایجاد دامنه حل، مش بندی و مشخص کردن شرایط مرزی، شبیه سازی عددی صورت گرفته است. به علت تلاطم زیاد در ناحیه ناهمواری، بازه زمانی در نرم افزار فلوئنت ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. با اعمال مدل آشفتگی k-ε استاندارد، حل تا زمان ۵ ثانیه ادامه پیدا کرده است. در حالت های مختلف حل، پس از گذشت ۵ ثانیه، در پارامترهای مختلف جریان، نظیر پروفیل سطح آب، تغییری مشاهده نشد. بنابراین پس از ۵ ثانیه حل متوقف شده است.

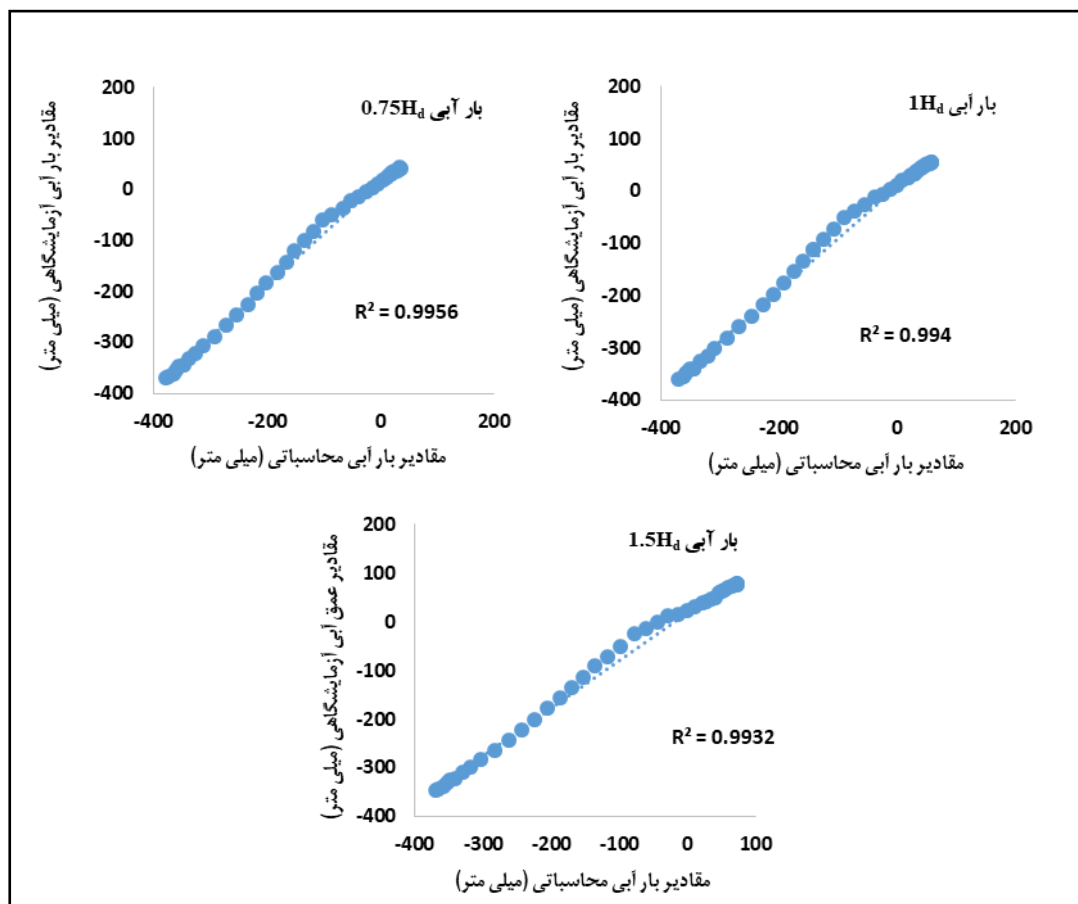
در شکل ۶، به مقایسه کمی نتایج آزمایشگاهی چاتیلا و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004). با نتایج عددی مطالعه حاضر پرداخته شده است. با توجه به ضریب رگرسیون و میانگین مجذور مربعات خطای (RMSE) محاسبه شده در این شکل، می توان دریافت نتایج عددی دقت قابل قبولی را ارائه کرده است.

### نتایج مربوط به پروفیل سطح آب

هدف از مطالعه حاضر، بررسی ناهمواری ها در پایین دست سرریز اوجی است؛ بر این اساس، پس

در قسمت راهنمای شکل نیز مقدار صفر نشان‌دهنده فاز آب و مقدار ۱ نشان‌دهنده فاز هواست. مقدار ۰/۵ نیز به‌عنوان پروفیل سطح آب در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷، کانتور فاز آب و هوا در نرم‌افزار فلونت برای حالت بدون ناهمواری و بارآبی  $1H_d$  نشان داده شده است. در این شکل رنگ آبی نشان‌دهنده فاز آب و رنگ قرمز نشان‌دهنده فاز هواست.

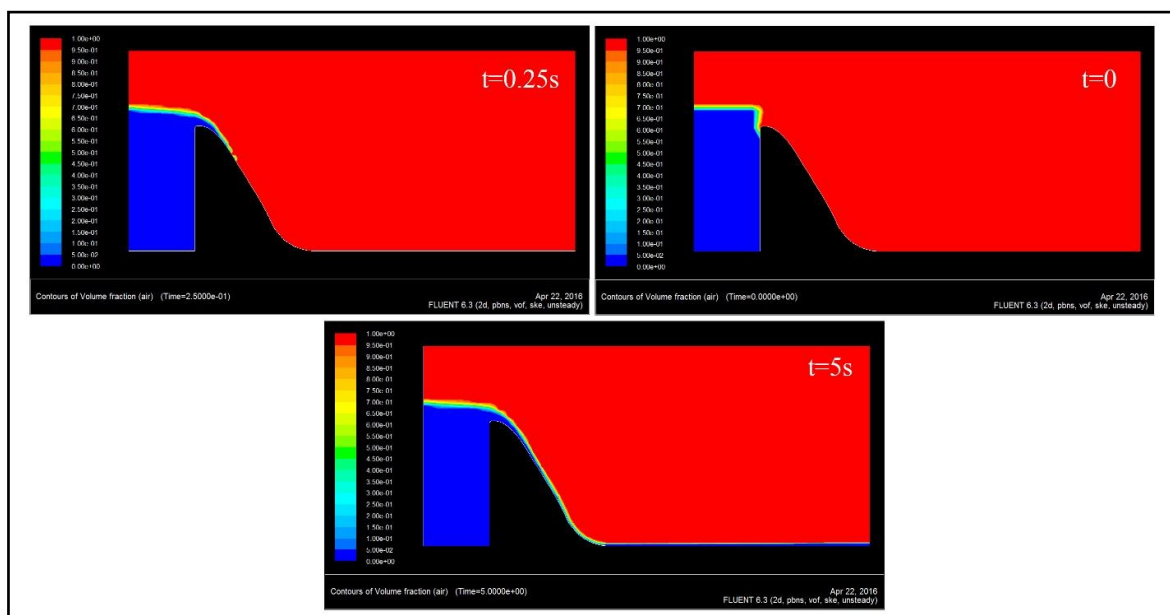


شکل ۶- مقایسه کمی نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب برای بارهای آبی مختلف

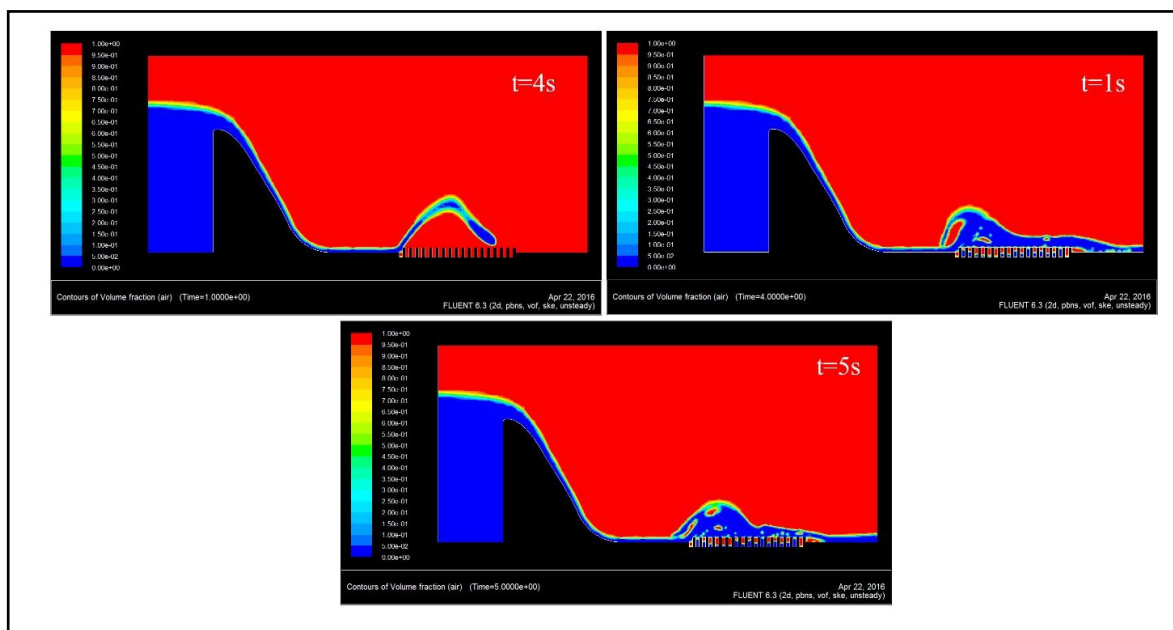
در ادامه، تأثیر ایجاد ناهمواری بر پروفیل سطح آب مقایسه شده است. در شکل ۹، پروفیل سطح آب در بارهای آبی و ارتفاع ناهمواری‌های مختلف مقایسه شده است. در این شکل، محور افقی و قائم به‌ترتیب بیانگر بعد افق و دامنه حل بر حسب میلی‌متر هستند.

رفتار غیر دائمی جریان در برخورد با ناهمواری‌هایی با ارتفاع  $0/6 H_d$  نیز در شکل ۸ ارائه شده است. در این شکل نیز، همانند شکل ۷، رنگ آبی و رنگ قرمز به‌ترتیب بیانگر فاز آب و فاز هواست و پروفیل سطح آب با فاز ۰/۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل‌ها وقوع پرش هیدرولیکی روی ناهمواری‌های ایجاد شده مشهود است.





شکل ۷- کانتور آب و هوا در سرریز اوجی بدون ناهمواری در زمان  $+$ ،  $+$  و  $+$  ثانیه برای بار طراحی  $1H_d$



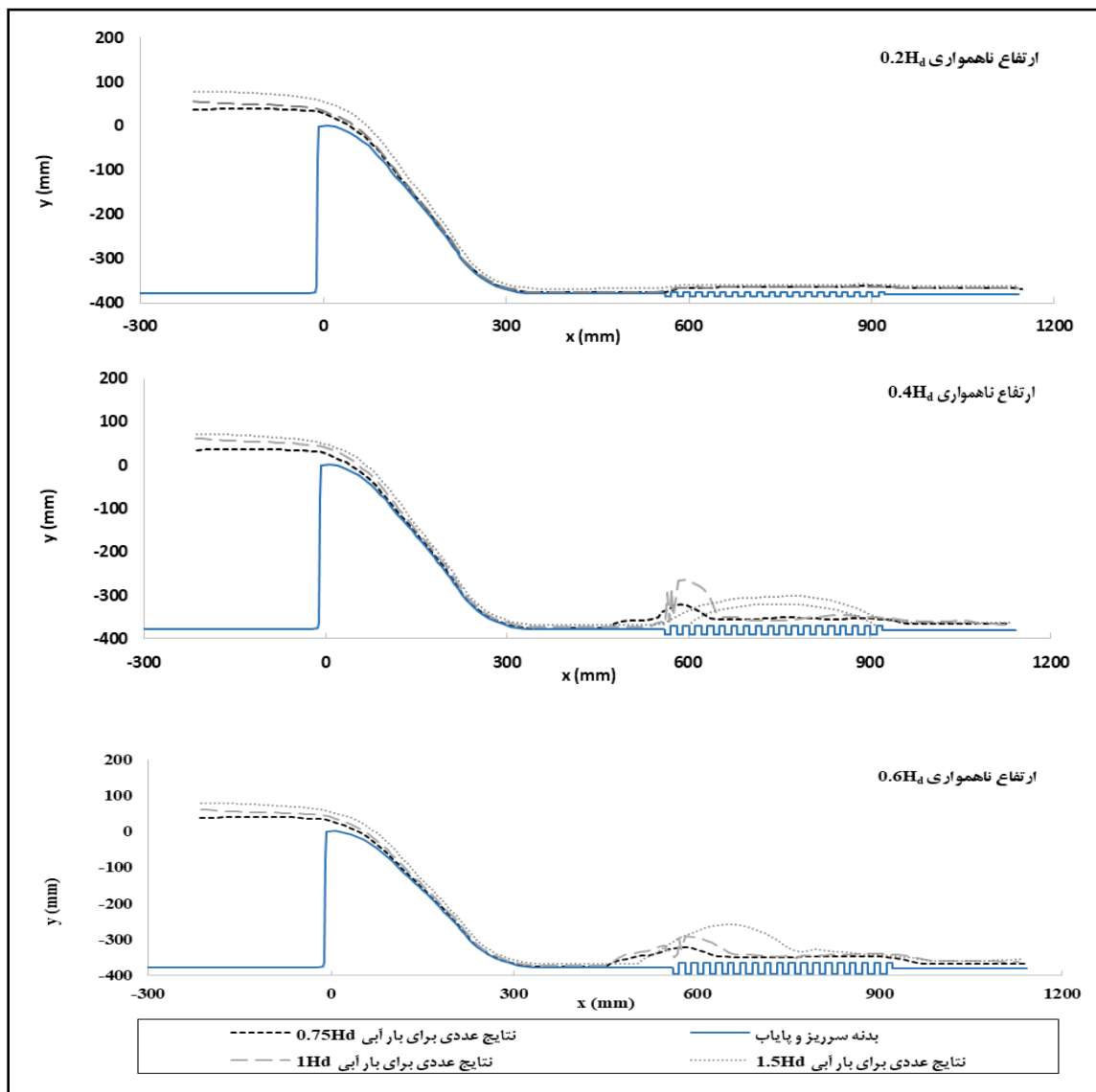
شکل ۸- کانتور آب و هوا در سرریز اوجی با ناهمواری با ارتفاع  $H_d/6$  در زمان ۱، ۴ و ۵ ثانیه

می‌توان دریافت که افزایش عمق پرش در حالت  $1H_d$  به دلیل افزایش بار آبی و به عبارت دیگر افزایش جریان است. با این حال شکل پرش علاوه بر وابسته بودن به شدت جریان، به ابعاد ناهمواری‌ها نیز وابسته است. ولی در بار آبی  $1/5 H_d$  جریان با یک جهش از روی ناهمواری‌ها عبور کرده و هیچ‌گونه پرش هیدرولیکی در این حالت مشاهده نشده است. با افزایش ارتفاع ناهمواری به ارتفاع  $H_d/6$

با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که ناهمواری‌های ایجاد شده در پایین دست سرریز اوجی، تأثیر متفاوتی بر پروفیل سطح آب دارند. ناهمواری ایجاد شده با ارتفاع  $H_d/2$  همانند زبری عمل کرده و موجب تغییر رژیم جریان نشده است. اما ناهمواری با ارتفاع  $H_d/4$  موجب وقوع پرش هیدرولیکی ضعیفی در بارهای آبی  $1/75 H_d$  و  $1 H_d$  شده است. با دقت کردن در تفاوت پرش‌های ایجاد شده

وقوع پرش هیدرولیکی در تمامی دبی‌ها مشاهده شده است. بنابراین اگر طراحی حوضچه آرامش مد نظر باشد، ناهمواری با ارتفاع  $0.6 H_d$  موفق‌ترین طرح ارزیابی می‌شود، زیرا اجازه ورود جریان با انرژی زیاد (جریان خروجی از سرریز) را به پایین دست سرریز نداده است.

با بررسی این شکل می‌توان دریافت با افزایش دبی جریان و در نتیجه بار آبی، پروفیل سطح آب افزایش یافته است. البته این امر منطقی و منطبق با فیزیک مسئله ارزیابی می‌شود.



شکل ۹- مقایسه پروفیل سطح آب سرریز اوجی با ناهمواری با ارتفاع‌ها و دبی‌های مختلف

با محاسبه درصد افت انرژی نسبی بین ورودی مخزن سرریز (بالادست سرریز) و خروجی دامنه حل (پایین دست سرریز)، از رابطه ۲ محاسبه شده است.

نتایج مربوط به استهلاك انرژی در این بخش به بررسی تأثیر ناهمواری‌ها بر استهلاك انرژی در پایین دست سرریز اوجی پرداخته خواهد شد. در این بررسی، استهلاك انرژی

محور قائم).

- وجود ناهمواری، استهلاک انرژی را افزایش داده است.  
- افت انرژی در بیشترین میزان ارتفاع ناهمواری، از سایر حالات بیشتر است.

- میزان استهلاک انرژی حالت سوم از حالت دوم اندکی کمتر است که انتظار می‌رفت چنین نباشد. این میزان اختلاف هرچند بسیار کوچک است می‌تواند ناشی از نوع تلاطم جریان باشد. زیرا گاهی تلاطم جریان، مانند پرش جت آب، می‌تواند به افزایش مقدار جزئی در انرژی جریان بینجامد.

- با افزایش دبی جریان (بار آبی)، میزان استهلاک انرژی نیز در هر یک از حالت‌ها افزایش یافته است.

برای زبری با ارتفاع  $0.4 H_d$ ، برای جریان‌های  $0.75 H_d$  و  $1 H_d$  پرش هیدرولیکی رخ داده و جریان تغییر رژیم داده است. در این حالت‌ها، افت انرژی نسبی به دلیل وقوع پرش هیدرولیکی به ترتیب تا  $80$  و  $54$  درصد رسیده است. ولی برای جریان  $1.5 H_d$  مقدار استهلاک انرژی نسبی کمتری ( $17$  درصد) حاصل شده است. علت این امر عدم تشکیل پرش هیدرولیکی است. برای زبری  $0.6 H_d$  نیز تغییر رژیم بر اثر پرش هیدرولیکی در تمامی بارهای آبی عبوری صورت گرفته و افت انرژی نسبی تا  $84$  درصد افزایش یافته است.

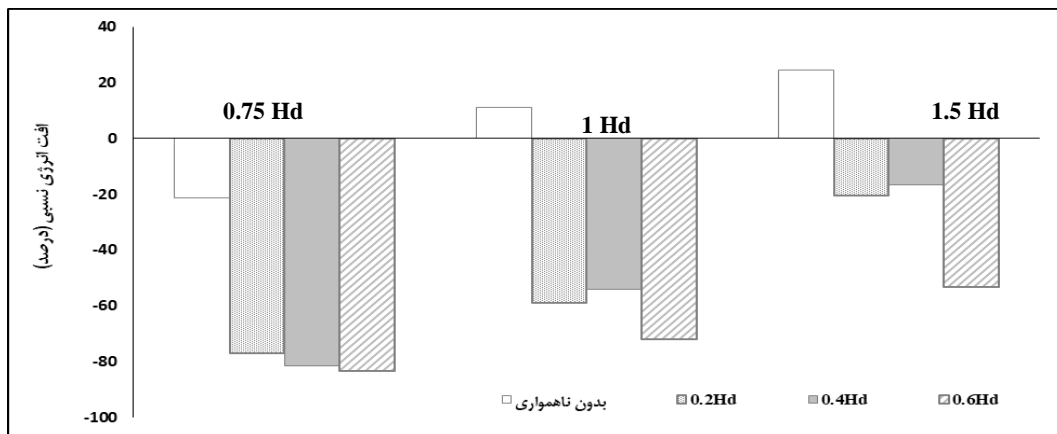
$$\frac{(E_A - E_B)}{E_A} \times 100 = \frac{(y_A + \frac{V_A^2}{2g}) - (y_B + \frac{V_B^2}{2g})}{y_A + \frac{V_A^2}{2g}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن،

$E$ ،  $y$  و  $V$  به ترتیب نشان‌دهنده انرژی مخصوص؛ عمق جریان؛ و سرعت متوسط جریان است. زیرنویس‌های  $A$  و  $B$  نیز به ترتیب بیانگر مقطع ورودی در بالادست مخزن سرریز و مقطع خروجی در پایین دست مخزن سرریز است. در شکل ۱۰، میزان استهلاک انرژی در چهار حالت مختلف و در سه بار آبی متفاوت به صورت گرافیکی مقایسه شده است. در قسمت راهنمای شکل، چهار حالت برای توصیف ناهمواری‌ها در نظر گرفته شده است. حالت اول معرف بدون ناهمواری، حالت دوم معرف ناهمواری با ارتفاع  $0.2 H_d$ ، حالت سوم معرف ناهمواری با ارتفاع  $0.4 H_d$  و حالت چهارم معرف ناهمواری با ارتفاع  $0.6 H_d$  است. مقدار مثبت افت انرژی نسبی (مقادیر محور قائم) بیانگر افزایش انرژی در طول سرریز و مقدار منفی بیانگر استهلاک انرژی است.

با توجه به این شکل می‌توان دریافت:

- در حالت بدون ناهمواری، کمترین افت انرژی نسبت به سایر حالات اتفاق افتاده است. فقدان ناهمواری حتی موجب افزایش میزان انرژی نیز شده است (مقادیر مثبت



شکل ۱۰ - مقایسه تأثیر میزان ناهمواری بر استهلاک انرژی در سرریز اوجی برای بارهای آبی  $0.75 H_d$ ،  $1 H_d$ ،  $1.5 H_d$

## نتیجه‌گیری

به ترتیب با سرعت‌های ورودی ۰/۰۳۵۶۶، ۰/۰۵۵۳۹ و ۰/۱۰۲۵ متر بر ثانیه عبور داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده شد که با افزایش دبی جریان، پروفیل سطح آب نیز به جز در ناحیه وجود ناهمواری، افزایش ارتفاع داشته است. در ناحیه ناهموار و برای ناهمواری با ارتفاع  $H_d ۰/۲$ ، جریان خروجی از بدنه سرریز اوجی تغییر رژیم نداده و ناهمواری ایجاد شده صرفاً نقش زبری را بازی کرده است. برای زبری با ارتفاع  $H_d ۰/۴$ ، برای جریان‌های  $H_d ۰/۷۵$  و  $H_d ۱$  پرش هیدرولیکی رخ داده و جریان تغییر رژیم داده است. در این حالت‌ها، افت انرژی نسبی به دلیل وقوع پرش هیدرولیکی به ترتیب تا ۸۰ و ۵۴ درصد رسیده است. ولی برای جریان  $H_d ۱/۵$  مقدار استهلاك انرژی نسبی کمتری (۱۷ درصد) حاصل شده به این دلیل که ارتفاع ناهمواری توانایی تغییر رژیم جریان را نداشته و به عبارت دیگر پرش هیدرولیکی ایجاد نشده است.

برای زبری  $H_d ۰/۶$  نیز تغییر رژیم بر اثر پرش هیدرولیکی در تمامی بارهای آبی عبوری صورت گرفته و افت انرژی نسبی تا ۸۴ درصد افزایش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که از دیدگاه افت انرژی اگر طراحی حوضچه آرامش مدنظر باشد، ناهمواری با ارتفاع  $H_d ۰/۶$  موفق‌ترین طرح خواهد بود. مطالعات آتی نیز می‌تواند در زمینه ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد چنین ناهمواری‌هایی با طول، ارتفاع و شکل‌های مختلف متمرکز شوند.

در این مطالعه به بررسی عددی تأثیر ایجاد ناهمواری در پایاب سرریز اوجی در کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار فلونتت پرداخته شده است. برای ایجاد دامنه حل و مش‌بندی، از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در حالت غیر دائمی صورت پذیرفته و از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در نرم‌افزار فلونتت استفاده شده است.

هدف اصلی این بررسی، ارزیابی اثر ایجاد ناهمواری در پایین دست سرریز اوجی بر مشخصات هیدرولیکی مانند پروفیل سطح آب، پرش هیدرولیکی و افت انرژی با در نظر گرفتن سه نوع جریان با دبی‌های متفاوت بوده است. همانند هر بررسی یکی از مراحل مهم، صحت‌سنجی نتایج است که با نتایج مدل سازی سرریز اوجی چاتیلا و تابارا (Chatila & Tabbara, 2004). صورت گرفته است. یادآوری می‌شود که مدل سازی چاتیلا و تابارا بدون در نظر گرفتن ناهمواری در پایین دست سرریز اوجی است. مقایسه نتایج به دست آمده با شاخص‌های آماری ضریب رگرسیون و مجذور مربعات خطا با نتایج مدل سازی آنان نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی نتایج قابل قبولی ارائه کرده است. برای ارزیابی تأثیر ناهمواری، سه نوع ناهمواری در پایین دست سرریز اوجی اعمال شده است.

ناهمواری‌های اعمال شده هم به صورت ضرایبی از هد آبی طراحی ( $H_d$ ) به صورت  $H_d ۰/۲$ ،  $H_d ۰/۴$  و  $H_d ۰/۶$  در نظر گرفته شده است. از مجموع این ناهمواری‌ها سه جریان با دبی‌های مختلف ( $H_d ۰/۷۵$ ،  $H_d ۱$ ،  $H_d ۱/۵$ )

## مراجع

- Asadi, F., Fazloulou, R. and Emadi, A. 2016. Investigation the characteristics of hydraulic jump in a rough bed condition using a physical model. J. Water Soil Conserv. 23(5): 295-306. (in Persian)
- Assy, T. M. 2001. Solution for spillway flow by finite difference method. J. Hydraul. Res. IAHR. 39(3): 241-247

- Burgisser, M. F. and Rutschmann, P. 1999. Numerical solution of viscous 2DV free surface flows: flow over spill crests. Proceedings of The 28<sup>th</sup> IAHR Congress. Aug. 22-27. Technical University Graz, Graz, Austria.
- Chamani, M. R. and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. J Hydraul. Eng. ASCE. 125(4): 361-368.
- Chatila, J. and Tabbara, M. 2004. Computational modeling of flow over an ogee spillway. Comput. Struct. 82, 1805-1812.
- Daneshfaraz, R., Kaya, B., Sadeghfam, S. and Sadeghi, H., 2014. Simulation of flow over ogee and stepped spillways and comparison of finite volume and finite element methods. J. Water Resour. Hydraul. Eng. 3(2): 37-47.
- Henderson, H. C., Kok, M. and De Koning, W. L. 1991. Computer-aided spillway design using the boundary element method and non-linear programming. Int. J. Numer. Meth. Fluid. 13(5):625-41.
- Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S. and Cooper, B. 2003. Numerical flow analysis for spillways. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> ANCOLD Conference. Oct. 24-29. Hobart, Tasmania.
- Johnson, M. C. and Savage, B. M. 2006. Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. J. Hydraul. Eng. 132(12): 1353-1357.
- Lenau, C. W. and Cassidy, J. J. 1969. Flow Through Spillway Flip Bucket. J. Hydraul. Div. ASCE. 95(2): 633-648.
- Patankar, S. V. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation. Taylor & Francis Group, New York.
- Pegram, G. S., Officer, A. K. and Mottram, S. R. 1999. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125(5): 500-510.
- Peltier, Y., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M. and Erpicum, S. 2017. Pressure and velocity on an ogee spillway crest operating at high head ratio: experimental measurements and validation. J. Hydro-Environ. Res. 19, 128-136.
- Rahman, M. and Chaudry, H. M. 1997. Computation of flow in open channel flow. J. Hydraul. Res. 35(2): 243-56.
- Sadjadi, M. and Saadi, H. 2017. Control of hydraulic jump by perforated stepped sill in an ogee spillway stilling basin. Irrig. Draina. Struct. Eng. In Press. (in Persian)
- Sanchez, J. M., Pomares, J. and Dolz, J. 2000. Pressure field in skimming flow over a stepped spillway. Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. March 22-24. Zurich, Switzerland.
- Savage, B. M. and Johnson, M. C. 2001. Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study. J. Hydraul. Eng. ASCE. 127(8): 641-649.
- Sheikh-Kazemi, J., Saneie, M. and Azhdary-Moghadam, M. 2016. Scale effect of the water surface profile on ogee spillway with curvature in plan and converging training walls. Irrig. Drain. Struct. Eng. 17(66): 119-136. (in Persian)
- Song, C. and Zhou, F. 1999. Simulation of free surface flow over spillway. J. Hyd. Engrg, ASCE:125(9): 959-67.
- Tsai, W. and Yue, D. 1996. Computation of nonlinear free-surface flows. Annu. Rev. Fluid Mech. 28, 249-78.
- Yildiz, D. and Kas, I. 1998. Hydraulic performance of stepped chute spillway. Hydropower Dam. 4, 64-70.

## **Effect of Roughness at Downstream of Ogee Spillway in Order to Hydraulic Jump Control**

**R. Daneshfaraz\*, S. Sadeghfam and V. Saei**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Civil, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: daneshfaraz@yahoo.com

Received: 7 July 2017, Accepted: 15 April 2018

### **Abstract**

In this study, the roughness at downstream of ogee spillway has been simulated numerically for different flows, and the effects of roughness on the transformation of flow regime, the water surface profiles, and the energy losses also have been investigated. Hence, after solution domain generation, meshing, and specification of boundary conditions, the numerical simulation has been run by using k- $\epsilon$  standard turbulence model, and in order to validation of the numerical results of the investigated ogee spillway, the experimental model of ogee spillway proposed by Chatila and Tabara (2004) has been used. Also, the effects of three types of roughness at downstream of this spillway were evaluated. The results indicated that by increasing the height of roughness, the energy loss increases up to 80 percent. The roughness types of 3 and 4, imposed the regime transformation and caused 70 to 50 percent, in average, energy losses respectively. Also, we found that increase in flow discharge affected directly the water surface profiles. Results showed that if the design of stilling basin was considered, the roughness with a height of  $0.6H_d$  had the ability of flow regime transformation and was evaluated as the most successful design.

**Keywords:** Energy Loss, Flow Regime, Water Surface Profile