

اثر مقیاس بر پروفیل سطح آب در سرریز اوجی با انحنا در پلان و با دیواره‌های جانبی همگرا

جلال شیخ کاظمی^{*}، مجتبی صانعی و مهدی اژدری مقدم^{**}

^{*} نگارنده مسئول: گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. تلفن: ۰۵۴)۳۳۴۲۰۰۶۴، پیام‌نگار: j.kazemi65@gmail.com

^{**} به ترتیب: کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیک، گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران؛ و دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان
تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۰

چکیده

اطلاع از پروفیل سطح جریان روی سرریز برای طراحی ارتفاع آزاد و ارتفاع دیواره سرریز اهمیت دارد که مهندسان طراح از مدلسازی فیزیکی برای طراحی این نوع سازه‌ها استفاده می‌کنند، از این رو اثر مقیاس در مدلسازی سرریز باعث اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده بین مدل و نمونه اصلی می‌شود. در این تحقیق، مدل آزمایشگاهی سرریز سد گرمی‌چای میانه در سه مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ ساخته و پروفیل سطح آب روی سرریز، با هفت دبی اندازه‌گیری شد؛ همچنین، درصد اختلاف ارتفاع سطح آب دو مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ نسبت به مدل با مقیاس مبنا (مقیاس ۱:۵۰) محاسبه شد. نتایج بررسی‌ها و مشاهدات نشان می‌دهد که در نسبت دبی به دبی طراحی برابر ۳/۰، 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 ۱۸/۴ و ۱۵/۶ درصد است. دبی‌های بزرگ‌تر که ارتفاع آب روی سرریز افزایش می‌یابد، باعث کاهش تأثیر نیروی لزوجت و کشش سطحی می‌شود که در نسبت دبی به دبی طراحی ۱/۱۸ میزان اختلاف ارتفاع سطح آب در مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ به ترتیب برابر ۵/۸ و ۴/۸ درصد است. در این تحقیق، میزان تأثیر لزوجت و کشش سطحی با ارائه رابطه اصلاحی (K') که تابع رینولدز و وبر بوده بیان و مشخص گردید که با مدلسازی سرریز اوجی با انحنا در پلان و با دیواره جانبی همگرا می‌توان در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $3/1 \times 10^4$ از اثر لزوجت و در اعداد وبر بزرگ‌تر از ۲۷۰ از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد و نتایج نمونه اصلی را با برون‌یابی از مطالعات مدل به دست آورد.

واژه‌های کلیدی

اثر مقیاس، پروفیل سطح آب، سرریز اوجی، کشش سطحی، لزوجت

مقدمه

پرکاربردترین سرریزها در طراحی سازه‌های هیدرولیکی هستند. این سرریزها بر اساس محاسبات هیدرولیکی مربوط به سرریزهای با تاج مدور به گونه‌ای طراحی می‌شوند که پروفیل تاج و جلو ساختمان آنها منطبق بر پروفیل سطح زیرین آب لبریز شده از یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی با همان مشخصات مورد نیاز در بالادست سرریز اصلی است (Hosseini & Abrishami, 2011).

هنگامی که ارتفاع سطح آب دریاچه پشت سد به حداکثر مقدار خود برسد و در همین زمان سیل دیگری اتفاق افتد، باید وسیله‌ای در سد تعبیه شده باشد که بتواند این آب اضافی را خارج کند. ساختمان هیدرولیکی برای دفع آب اضافی را سرریز می‌نامند (Najmaei, 1994). سرریزهای اوجی به دلیل راندمان بالای تخلیه از جمله

ظرفیت جریان سرریز تا حد زیادی به طول و شکل تاج آن بستگی دارد. سرریز اوجی با انحنا در پلان نسبت به سازه‌های سرریز مستقیم چند مزیت دارد. سرریز با انحنا در پلان افزایش طول تاج را برای یک عرض ثابت فراهم می‌کند و بدین وسیله افزایش ظرفیت برای هد بالادست را باعث می‌گردد. نتیجه افزایش ظرفیت جریان این است که این نوع سرریز، نسبت به سرریزهای خطی، نیاز به ارتفاع آزاد کمتری در مخزن بالادست دارد، که به مسیر سیلاب و افزایش ظرفیت ذخیره مخزن کمک می‌کند (Crookston, 2010). برای کنترل ارتفاع آب بالادست و افزایش ظرفیت جریان، سرریزهای اوجی با انحنا در پلان، اغلب از طراحی‌های مطلوب هستند (Johnson & Savage, 2006).

با اینکه در طرح و محاسبه سدها و تأسیسات مربوط با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی پیشرفت‌های زیادی شده است اما با توجه به پیچیدگی جریان و پارامترهای مؤثر بر آن کسب نتایج دقیق از طریق مدلسازی عددی امکان‌پذیر نیست و اطمینان قطعی از عملکرد مناسب را به طراح و سازنده نخواهد داد. از طرفی، تحلیل‌های ریاضی به همراه تجربه‌های موجود، پیوسته قادر به ارائه اطلاعات کافی برای تضمین عملکرد صحیح سازه هیدرولیکی پر خرج نخواهد بود. از این رو به دلیل هزینه زیاد ساخت سد و سرریز و تأسیسات مربوط و نیز زیان جانی و مالی ناشی از عملکرد ناصحیح سرریز، آزمایش مدل هیدرولیکی برای بسیاری از سرریز سدها با شرایط خاص هندسی عملاً لازم است.

مدل فیزیکی هیدرولیکی سرریزها معمولاً با اندازه کوچک‌تر از نمونه اصلی ساخته و در آزمایشگاه تحت شرایط کنترل شده بررسی می‌شود؛ با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی رفتار نمونه اولیه سرریزها پیش‌بینی خواهد شد (Chanson, 2004). طراح باید تأثیرات مقیاس مدل را کنترل و مدلی را توصیه کند که به بهترین وجه جنبه‌های

مهم نمونه اصلی را شبیه‌سازی نماید. بدین ترتیب ممکن است برای بررسی جنبه‌های مختلف فرایندهای نمونه اصلی به چندین مدل نیاز باشد. تأثیرات جانبی ناخواسته در مدل ناشی از متغیرهایی هستند که طبق ضروریات شبیه‌سازی مقیاس‌بندی نشده‌اند. این تأثیرات به این علت وجود می‌آیند که ممکن است فقط یک معیار شبیه‌سازی دینامیکی جریان در مدل لحاظ شده باشد (Ettema et al., 2005). برای برقراری تشابه کامل دینامیکی، تمام نیروهای مهم از جمله نیروی لزوجت، فشاری، کشش سطحی و نظایر آن را باید در نظر گرفت (Fox et al., 2011). برای تعیین چگونگی تأثیرگذاری مقیاس روی نتایج مدل می‌توان از یکسری مدل‌های مقیاس استفاده کرد که در این صورت باید از هر نمونه اصلی چندین مدل با مقیاس متفاوت ساخته شود. هرگاه اطلاعات نمونه اصلی ناکافی باشد آزمایش سری‌های مقیاس نیز خیلی مفید هستند پس بسیاری از نتایج نمونه اصلی را با برون‌یابی می‌توان از مطالعات مدل به دست آورد (Ettema et al., 2005).

از تحقیقاتی که به تأثیر مقیاس مدل‌های فیزیکی روی سازه‌های هیدرولیکی پرداخته‌اند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. باوس (Boes, 2000)، اثر مقیاس در مدلسازی جریان را با استفاده از خانواده مدل روی جریان سرریز پلکانی دو فازی به‌طور آزمایشگاهی مطالعه کرد تا تأثیر مقیاس مدل روی فرایند هوادهی بررسی شود. نتایج این محقق نشان داد که استفاده از خانواده مدل، در صورتی که حداقل عدد رینولدز و وبر به ترتیب 10^5 و ۱۰۰ فراهم کند، می‌توان در مدل‌های با مقیاس کوچک‌تر از ابعاد نمونه اصلی که با قانون تشابه فرود کوچک شده‌اند، از اثر مقیاس صرف‌نظر کرد. باوس و هگر (Boes & Hager, 2003)، مشخصات جریان دو فازی سرریز پلکانی را در آزمایشگاه با رژیم جریان غیر ریزشی بررسی کردند. نتایج این

میزان نرخ حباب^۵ و توزیع زمان وتر حباب^۶ را نشان می‌دهد که با تشابه فرود مدلسازی شده‌اند. فایس و گنووژ (Fais & Genovez, 2008)، منحنی میزان دبی و اصلاح اثر مقیاس در سرریزهای نیلوفری را بررسی کردند. مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از مدل سرریز سد پاراتینگا در مقیاس ۱:۵۱/۰۲ توسط فایس انجام شد و با دو مقیاس ۱:۶۳/۱۷ و ۱:۸۳/۲۹ از سرریز نیلوفری سد پاراتینگا که گنووژ در سال ۱۹۹۷ ساخته بود، مقایسه شد. نتایج تحقیقات این محققان نشان می‌دهد که برای ارتفاع سطح آب کم روی تاج سرریز نیلوفری، عدد وبر از حداقل مورد نیاز کمتر است که اثر مقیاس بر نتایج مدل تأثیر خواهد داشت و عدد رینولدز بزرگ‌تر از 10^5 به‌دست آمد که از اثر لزوجت می‌توان صرف‌نظر کرد.

فلدر و چانسون (Felder & Chanson, 2009)، تشابه دینامیکی و اثر مقیاس در جریان سطح آزاد آشفته روی سرریز پلکانی را بررسی و خصوصیات جریان‌های دو فاز با سرعت بالا را روی سرریز پلکانی برای اعتبار تشابه فرود و رینولدز به‌صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری کردند که نتایج تأثیرات مقیاس قابل توجهی را نشان داد. هلر (Heller, 2011) اثر مقیاس در مدل‌های هیدرولیکی بین مدل و نمونه اصلی و تشابه فرود و رینولدز در مدل‌ها را بررسی کرد. چانسون و چاچریو (Chanson & Chachereau, 2013) تأثیر مقیاس در خصوصیات جریان دو فاز پرش هیدرولیکی با عدد فرود برابر ۵/۱ و در اعداد رینولدز بین $2/5 \times 10^4$ تا $1/3 \times 10^5$ را در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که بیشتر خصوصیات جریان آب- هوا با عدد رینولدز بزرگ‌تر از $1/25 \times 10^5$ را نمی‌توان به نمونه اصلی برون‌یابی کرد زیرا اثر مقیاس در میزان نرخ حباب، آشفتگی، توزیع زمان وتر حباب و مشخصات خوشه حباب^۷ وجود دارد. فیستر و

محققان روی حداقل عدد رینولدز و وبر که نیازمند حداقل اثر مقیاس در مدلسازی فیزیکی جریان‌های آب و هوا دو فاز می‌باشد را نشان داده است. برای اینکه اثر لزوجت و کشش سطحی ناچیز شمرده و با نیروهای گرانشی و اینرسی در تشابه فرود مقایسه شود، حداقل اعداد رینولدز و وبر به‌ترتیب در حدود 10^5 و 10^6 در نظر گرفته شده است. گونزالز و چانسون (Gonzalez & Chanson, 2004) اثر مقیاس در سرریزهای پلکانی با شیب ملایم در جریان‌های آب - هوا را در آزمایشگاه بررسی و در توزیع نرخ تعداد حباب^۱، شدت تلاطم^۲ و اندازه وتر حباب^۳ اثر مقیاس قابل توجهی مشاهده کردند. گونزالز و چانسون (Gonzalez & Chanson, 2005)، با بررسی آزمایشگاهی آشفتگی جریان به‌منظور تعیین مقاومت جریان در جریان‌های غیر ریزشی سرریزهای پلکانی نشان دادند که برای به حداقل رساندن تأثیرات مقیاس مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ، عدد رینولدز بین 4×10^5 و 8×10^5 به‌دست می‌آید.

چانسون (Chanson, 2008) با مدلسازی فیزیکی، اثر مقیاس جریان‌های سرریز پلکانی را بررسی کرد. اعتبار تشابه فرود با آنالیز داده‌های سه آزمایش در شیب‌های $(3/4=0)$ ، ۱۶ و ۲۲ (درجه) از سد خاکی مورد آزمایش قرار گرفت. یافته این تحقیق نشان می‌دهد که بیشتر مدل‌های فیزیکی نمی‌توانند شرایط جریان را بدون اثر مقیاس قابل توجه به نمونه اصلی سرریز برون‌یابی کنند و نمی‌توان اتلاف انرژی ناشی از آشفتگی و میزان هوادهی را بر اساس آزمایش‌های تشابه فرود پیش‌بینی کرد. مارزین و چانسون (Murzyn & Chanson, 2008)، تأثیر مقیاس خصوصیات جریان دو فاز پرش هیدرولیکی را در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج آزمایش، اثر مقیاس را در پرش هیدرولیکی کوچک در درصد فضای خالی^۴،

1- Bubble Count Rate Distributions
3- Bubble/Droplet Chord Sizes
5- Bubble Count Rate
7- Bubble Cluster Characteristics

2- Turbulence Intensity
4- Distributions of Void Fraction
6- Bubble Chord Time Distributions

در این خصوص طراحان با مدل‌سازی فیزیکی از سرریز مقدار ارتفاع سطح آب روی سرریز را اندازه‌گیری می‌کنند و پروفیل سطح آب و الگوی جریان را به‌دست می‌آورند. اما اینکه مدل فیزیکی را طراحان با چه مقیاسی بسازند و آیا اثر مقیاس در مدل‌سازی بر نتایج پروفیل سطح آب اثر دارد یا خیر مورد سؤال قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر با استفاده از سه مدل فیزیکی تأثیر مقیاس بر پروفیل سطح آب روی سرریز اوجی با انحنا در پلان و با دیواره‌های جانبی همگرا بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

اندازه مقیاس و مشخصات هندسی سرریز اوجی

آزمایش‌های این پژوهش در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری با استفاده از مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی سد گرمی‌چای میانه در سه مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ اجرا شد. نمایی از پلان و مقطع سرریز در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در جریان‌های کانال باز یعنی جریان سطح آزاد، اثر نیروی ثقل حاکم و عدد فرود همیشه غالب و معیار شبیه‌سازی است. مقیاس هندسی طول (L)، سطح (A) و حجم (V) به‌ترتیب در روابط ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. زیرنویس‌های m و p به‌ترتیب نسبت مقیاس، مدل و نمونه اصلی را مشخص می‌کند. استفاده از دو پارامتر بی‌بعد (به‌عنوان مثال عدد فرود و عدد رینولدز) هم‌زمان در مقیاس یک مدل امکان‌پذیر نیست. برای مثال اگر $Fr_m = Fr_p$ شود آنگاه $Re_m \neq Re_p$ می‌شود. مدل فیزیکی از سرریز می‌تواند از تشابه فرود استفاده کند اما مقیاس هندسی باید آن اندازه بزرگ باشد تا اثر لزوجت و تنش سطحی ناچیز باشد. هرچند محدوده عدد رینولدز و عدد وبر به‌طور عمومی برای کاربردهای تشابه فرود مشخص نشده است (Crookston, 2010).

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (1)$$

همکاران (Pfister *et al.*, 2013) اثر مقیاس روی منحنی میزان دبی روی سرریزهای کلید پیانویی با تاج استوانه‌ای را با نرم‌افزار Flow3D به‌صورت عددی و مقایسه با مدل فیزیکی مطالعه کردند و دریافتند که برای محدودیت هد روی سرریز $H = 0.03$ متر در شعاع استوانه‌ای تاج سرریز $0.005 \leq R \leq 0.3$ متر و با فرض $\frac{C_{dm}}{C_{dp}} = 0.98$ و برای $H = 0.015$ متر با فرض $\frac{C_{dm}}{C_{dp}} = 0.95$ می‌توان از اثر لزوجت و کشش سطحی جلوگیری کرد. برای شعاع استوانه کمتر از ۰/۰۵ متر محدودیت بیشتر به‌کار برده شد که C_{dm} ضریب دبی مدل و C_{dp} ضریب دبی نمونه اصلی است.

فیستر و چانسون (Pfister & Chanson, 2014) اثر مقیاس در مدل‌سازی فیزیکی سازه‌های هیدرولیکی برای جریان‌های دو فازی آب و هوا که با تشابه فرود شبیه‌سازی شده‌اند را بررسی کردند. نتایج محدودیت عدد رینولدز و وبر و ترکیب آنها از لحاظ تعداد مورتون^۱ برای جلوگیری از اثر مقیاس در پارامترهای جریان آب و هوا مانند اندازه حباب و مقیاس آشفتگی را نشان داد. کاسترو و هگر (Castro & Hager, 2014). اثر مقیاس روی سرریز با تاج انحنا را بررسی کردند و نشان دادند که با حداقل شعاع انحنا تاج سرریز برابر ۰/۰۱ متر و حداقل هد جریان ۰/۰۴ متر روی تاج سرریز می‌توان از اثر مقیاس قابل توجه جلوگیری کرد. در نهایت رابطه‌ای برای تأثیر مقیاس با پیش‌بینی درست از مشخصات دبی روی سرریز با تاج انحنا در نظر گرفته شد.

بیشتر تحقیقات درباره تأثیر مقیاس روی سازه‌های هیدرولیکی با جریان دو فازی بوده است (مانند سرریزهای پلکانی، سرریز نیلوفری، حوضچه آرامش و غیره)، اما با توجه به اینکه مهندسان و طراحان بتوانند ارتفاع آزاد و ارتفاع دیواره سرریز اوجی را طراحی کنند و پروفیل سطح آب و الگوی جریان روی سرریز را بدانند، نیاز است که از پروفیل سطح آب جریان روی سرریز آگاهی داشته باشند.

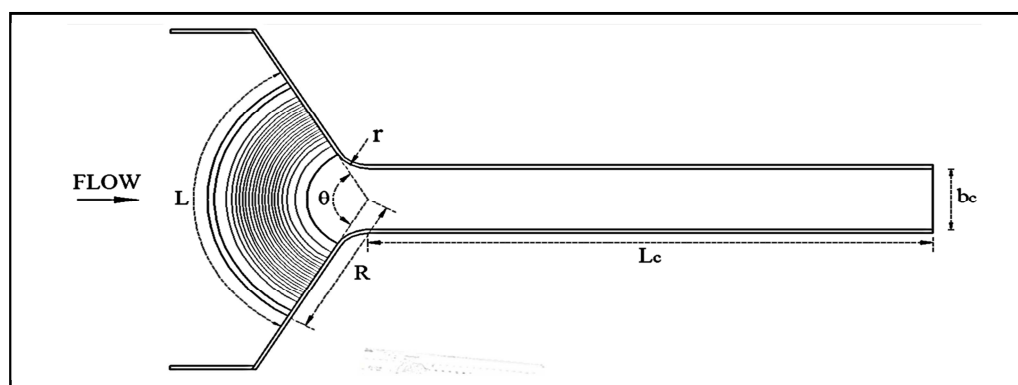
اثر مقیاس بر پروفیل سطح آب در سرریز...

جدول ۱ مشخصات هندسی سه مقیاس مدل فیزیکی

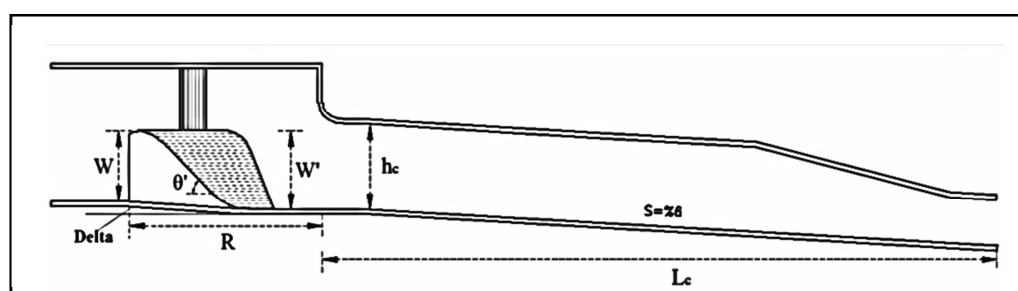
$$A_r = L_r^2 \quad (2)$$

سرریز اوجی را نشان می‌دهد که با استفاده از تشابه فرود شبیه‌سازی شده‌اند.

$$V_r = L_r^3 \quad (3)$$



شکل ۱- پلان سرریز و کانال پایین‌دست



شکل ۲- مقطع سرریز

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریز

مقیاس مدل	ارتفاع سرریز (W) (سانتی‌متر)	ارتفاع تاج تا پنجه سرریز (W') (سانتی‌متر)	طول تاج سرریز (L) (سانتی‌متر)	طول سرریز (R) (سانتی‌متر)	زاویه همگرایی دیواره سرریز (theta) (درجه)	شعاع اتصال زاویه شوت (r) (سانتی‌متر)	عرض کانال (b_c) (سانتی‌متر)	طول کانال (L_c) (سانتی‌متر)	ارتفاع کانال (h_c) (سانتی‌متر)
۱:۱۰۰	۷	۷/۸	۴۲	۲۰	۱۲۰	۴/۵	۹	۷۰	۸/۴۵
۱:۷۵	۹/۳۴	۱۰/۴	۵۶	۲۶/۶۷	۱۲۰	۶	۱۲	۹۳/۴	۱۱/۳
۱:۵۰	۱۴	۱۵/۶	۸۴	۴۰	۱۲۰	۹	۱۸	۱۴۰	۱۶/۹

ساخت مدل فیزیکی سرریز اوجی

در مدل سرریز اوجی با مقیاس ۱:۵۰ از مخزنی به ابعاد ۲/۰ متر طول و ۱/۸۰ متر عرض و ۱/۲۰ عمق و از جنس مصالح بنایی و یک حوضچه آرامش به ابعاد ۲/۰ متر طول و ۱/۳۰ متر عرض و عمق ۰/۶ متر و در ادامه حوضچه آرامش، فلومی به طول ۱/۵ متر، عرض ۰/۶ متر و عمق ۰/۶ متر استفاده شد. پروفیل اوجی سرریز سد

در دو مدل سرریز اوجی با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ از مخزنی به ابعاد ۱/۲۰ متر طول، ۰/۷ متر عرض، ۰/۵ متر عمق از جنس پلکسی‌گلاس و فلومی به طول ۴ متر، عرض ۰/۶۰ متر و ارتفاع ۰/۵۰ متر از جنس دیواره‌های مصالح بنایی (بلوک سیمانی و ملات ماسه سیمان) استفاده شد؛

تأمین آب از یک پمپ حلزونی استفاده شد که توانایی پمپاژ حداکثر دبی ۴۶ لیتر بر ثانیه را به داخل مدل دارد و برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه‌تیز با زاویه رأس ۹۰ درجه در قسمت خروجی فلوم استفاده شد که قبل از اجرای آزمایش کالیبره شده و دارای دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه بود.

با توجه به شبیه‌سازی فرود، نسبت مقیاس که می‌تواند از عدد فرود ثابت نتیجه شود در روابط ۴ و ۵ نشان داده شده است (Chanson, 2004)، که با توجه به این رابطه‌ها دبی واقعی به دبی در مقیاس مورد نظر تبدیل می‌شود:

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} = \sqrt{L_r} \quad \text{سرعت} \quad (4)$$

$$Q_r = V_r L_r^2 = L_r^{5/2} \quad \text{دبی} \quad (5)$$

شکل‌های ۴-الف، ب و ج به‌ترتیب نمایی از مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ را نشان می‌دهد.

گرمی‌چای بر اساس استاندارد USBR با رابطه $y = -0.196524x^{1.85}$ و با ارتفاع طراحی ۳ متر و با دو کمان از دایره به شعاع‌های $R_1=2.4$ و $R_2=6.0$ متر طراحی شده بود که به پروفیل اوجی سرریز متصل است. دبی طراحی سرریز ۳۳۸ مترمکعب بر ثانیه است. سرریزها با دستگاه تراشکاری CNC با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر از بلوک‌هایی با جنس تفلون ضد آب طبق نقشه تراشیده و ساخته شده‌اند. دیواره جانبی و کانال پایین‌دست سرریز از پلکسی‌گلاس ساخته شد.

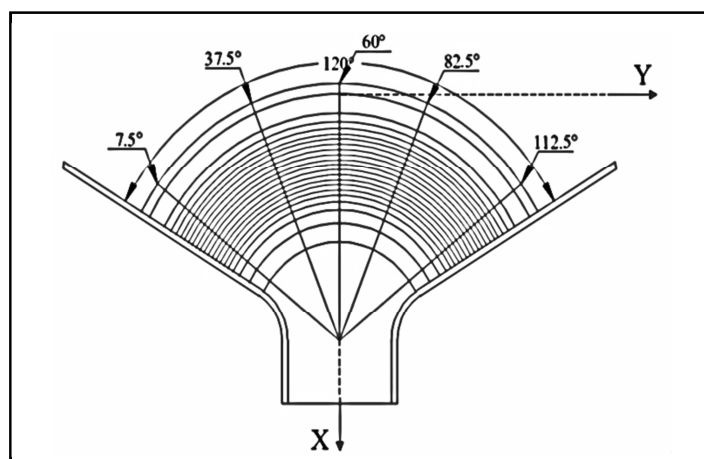
روش اجرای آزمایش

آزمایش‌ها با هفت دبی طبق جدول ۲ اجرا و برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب از عمق‌سنج^۱ با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. ارتفاع سطح آب برای تمام دبی‌های مورد آزمایش $1/18 < \frac{Q}{Q_d} \leq 0/30$ و برای هر سه مقیاس مدل فیزیکی در پنج قطاع به زوایای ۷/۵، ۳۷/۵، ۶۰، ۸۲/۵ و ۱۱۲/۵ درجه نسبت به دیواره، روی سرریز اندازه‌گیری شد. شکل ۳ نمایی از محورهای اندازه‌گیری سطح آب را روی سرریز نشان می‌دهد. برای

جدول ۲- دبی‌های مورد آزمایش در تحقیق به‌ازای مقیاس‌های مختلف ($L_r^{2.5} \times Q_p \times 10^3$)

ردیف	دبی واقعی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی دبی طراحی	دبی در مدل در مقیاس ۱:۱۰۰ (لیتر بر ثانیه)	دبی در مدل در مقیاس ۱:۷۵ (لیتر بر ثانیه)	دبی در مدل در مقیاس ۱:۵۰ (لیتر بر ثانیه)
۱	۱۰۰	۰/۳۰	۱/۰۰	۲/۰۵	۵/۶۵
۲	۱۵۰	۰/۴۴	۱/۵۰	۳/۰۷	۸/۴۸
۳	۲۰۰	۰/۶۰	۲/۰۰	۴/۱۰	۱۱/۳۱
۴	۲۵۰	۰/۷۴	۲/۵۰	۵/۱۳	۱۴/۱۴
۵	۳۰۰	۰/۸۸	۳/۰۰	۶/۱۵	۱۶/۹۷
۶	۳۳۸	۱/۰۰	۳/۳۸	۶/۹۳	۱۹/۱۲
۷	۴۰۰	۱/۱۸	۴/۰۰	۸/۲۱	۲۲/۶۲

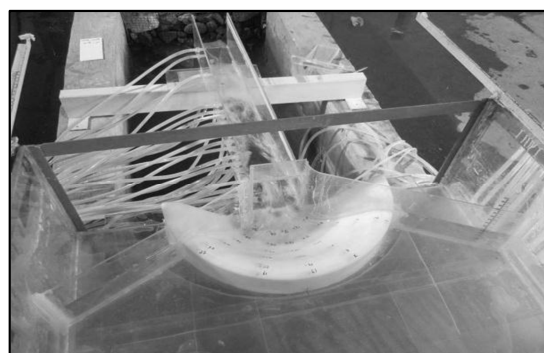
اثر مقیاس بر پروفیل سطح آب در سرریز...



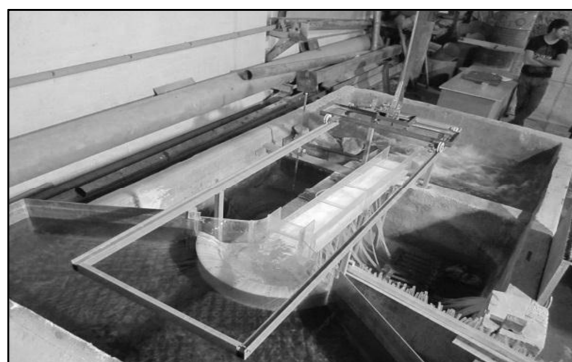
شکل ۳- نمایی از پلان سرریز و محورهای اندازه‌گیری سطح آب



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴ - نمایی از مدل فیزیکی سرریز در مقیاس‌های (الف) ۱:۱۰۰، (ب) ۱:۷۵ و (ج) ۱:۵۰

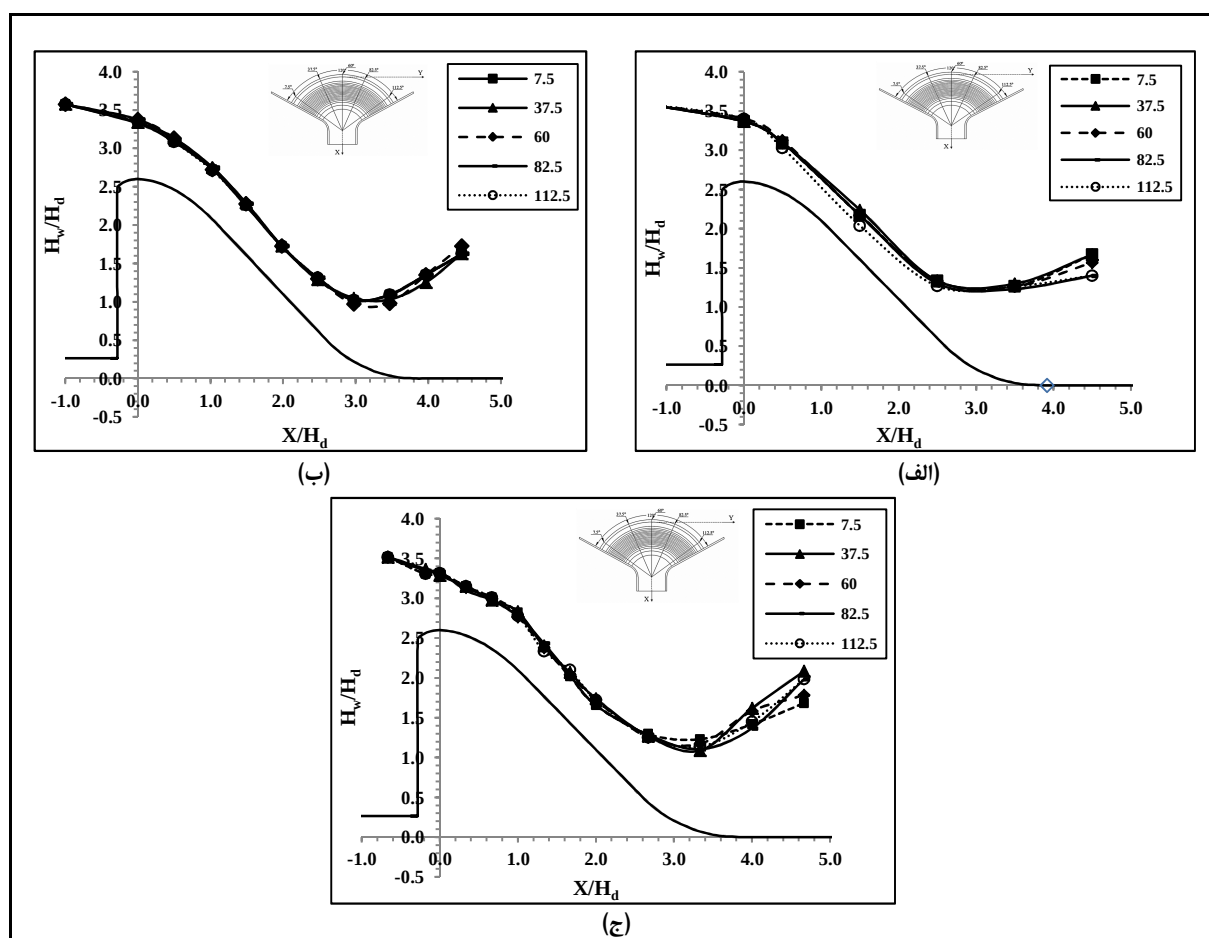
بررسی پروفیل سطح آب روی سرریز اوجی

در ۱:۵۰ در پنج محور مختلف روی سرریز نشان می‌دهد. در این دبی طراحی یک جریان غیریکنواخت تدریجی و فوق بحرانی روی سرریز جریان دارد که در پنجه سرریز به دلیل همگرایی دیواره سرریز، پرفش هیدرولیکی مشاهده گردید. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهد

ارتفاع سطح آب برای تمام دبی‌های مورد آزمایش و برای هر سه مقیاس روی سرریز اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۵- الف، ۵- ب و ۵- ج، پروفیل سطح آب را در دبی طراحی $\frac{Q}{Q_d} = 1/0$ به ترتیب برای مقیاس ۱:۷۵، ۱:۱۰۰ و

شکل‌های ۵- الف، ۵- ب و ۵- ج، میانگین ارتفاع سطح آب را روی سرریز در دبی‌های مختلف به ترتیب برای مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ را نشان می‌دهد. در این اشکال $Q = Q_d$ دبی، Q_d دبی طراحی، H_w = ارتفاع آب؛ H_d = ارتفاع طراحی؛ و X = فاصله از تاج سرریز.

اختلاف سطح آب در محورهای مختلف روی سرریز ناچیز است. این اختلاف ناچیز در ارتفاع آب روی سرریز در دبی‌های دیگر هم مشاهده گردید. به همین دلیل برای نشان دادن پروفیل سطح آب در دبی‌های مختلف و مقایسه اختلاف سطح آب با هم، میانگین ارتفاع سطح آب محورهای اندازه‌گیری محاسبه شد.



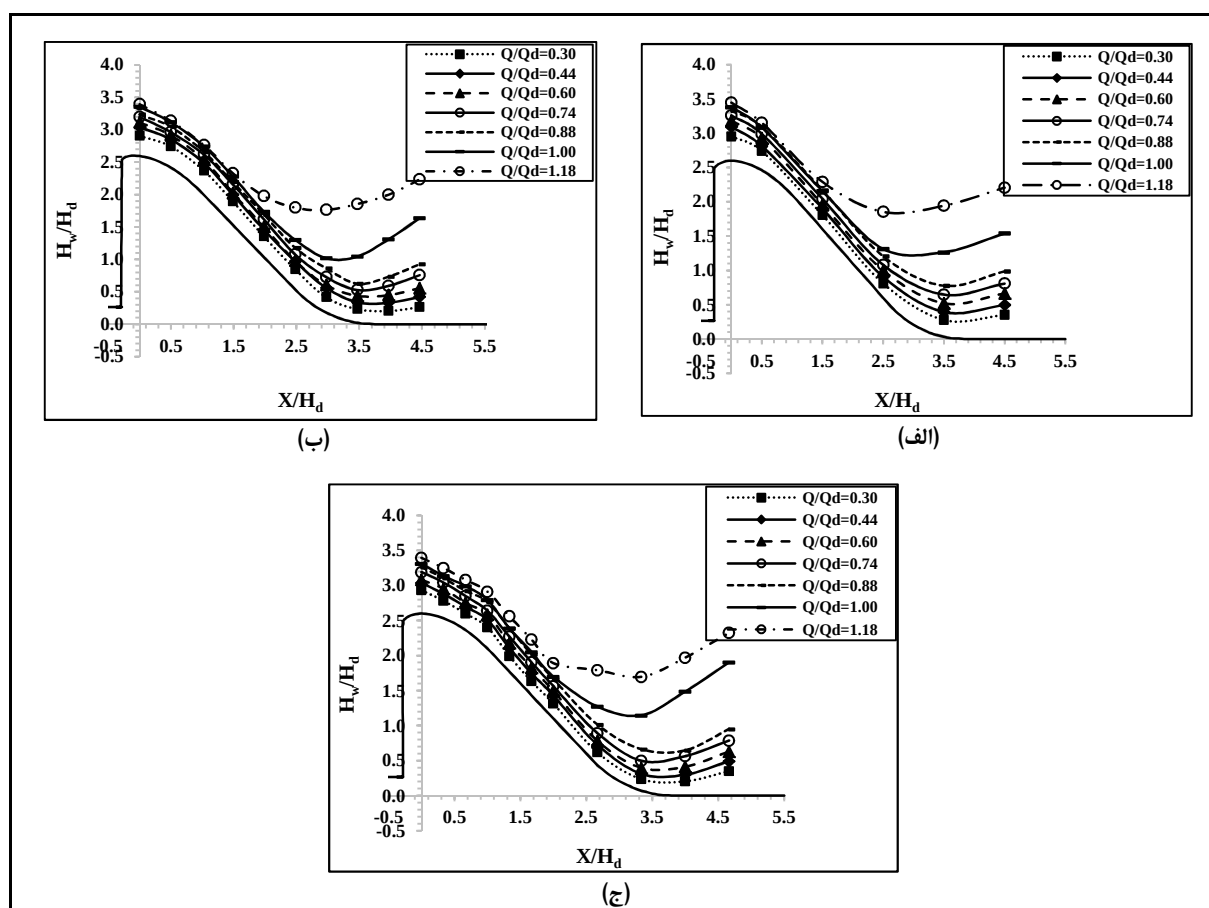
شکل ۵ - پروفیل سطح آب در دبی طراحی $Q/Q_d=1.0$ و در مقیاس‌های (الف) ۱:۱۰۰، (ب) ۱:۷۵ و (ج) ۱:۵۰

گردید که در پنجه سرریز موج دم‌خروسی^۱ اتفاق افتاده است. مشاهده گردید که پدیده دم‌خروسی در قسمت میانی پنجه سرریز، نسبت به کناره‌ها، ارتفاع بیشتری دارد. همچنین، در اطراف موج دم‌خروسی جریان‌های ثانویه مشاهده گردید که این جریان می‌تواند ناشی از سرعت کم جریان در نزدیک دیواره‌ها باشد که در هنگام ورود به کانال پایین‌دست در اثر

شکل‌های ۶- الف، ۶- ب و ۶- ج نشان می‌دهند که در دبی‌های $0.88 \leq \frac{Q}{Q_d} \leq 0.30$ و در هر سه مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ جریانی غیرکنواخت تدریجی و فوق‌بحرانی روی بدنه سرریز جریان دارد که با توجه به قوسی بودن در پلان سرریز اوجی و به دلیل همگرایی دیواره در محل تقاطع از آب سرریز شده تداخل جریان و همگرایی جریان آب مشاهده

یعنی دبی‌های $Q/Q_d = 1$ و $Q/Q_d = 1/18$ یک جریان غیریکنواخت سریع و فوق‌بحرانی روی سرریز جریان داشت که در پنجهٔ سرریز پرش هیدرولیکی ثابت مشاهده گردید. پرش یا جهش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که با تغییر حالت جریان از فوق‌بحرانی به زیربحرانی و با ورود هوا در غلتابه، آشفتگی قوی و استهلاك انرژی مشخص می‌شود (Woolbright, 2006). در شکل ۸ نمایی از پرش هیدرولیکی در پنجهٔ سرریز در مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰ نشان داده شده است.

برخورد با سرعت بالاتر به سمت پنجه پس زده می‌شود و نوعی حرکت گردابه‌ای را تجربه می‌کند. دم‌خروسی واژه توصیفی برای شناسایی سطح فواره زدن آبی که با تداخل امواج نوسانی^۱ یا امواج ایستاده^۲ ایجاد می‌گردد، است (Tanner, 1982). در شکل ۷، نمایی از موج دم‌خروسی در مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰ نشان داده شده است. در دبی بین $1/10 < Q/Q_d \leq 0.88$ پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز مشاهده شد اما این پرش هیدرولیکی ثابت نبود و حالت گذار بین پرش هیدرولیکی و دم‌خروسی در حال تغییر بود. اما در دبی‌های بزرگ‌تر



شکل ۶ - پروفیل سطح آب به ازای دبی‌های مختلف در مقیاس‌های (الف) ۱:۱۰۰، (ب) ۱:۷۵ و (ج) ۱:۵۰

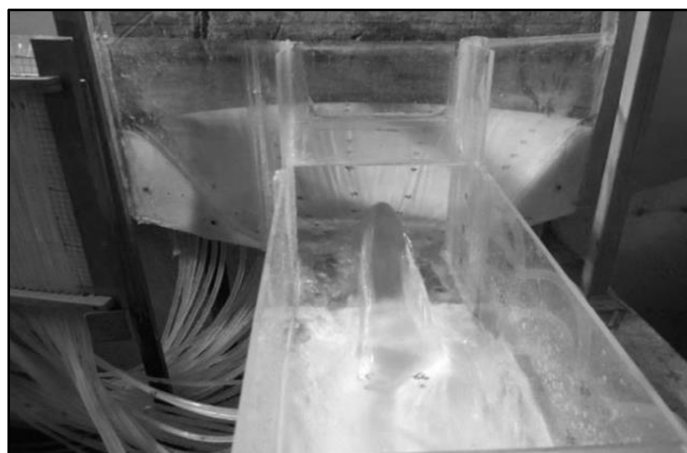
میزان اثرگذاری مقیاس را در اندازهٔ ارتفاع سطح آب به‌دست آورد باید آنها را با هم مقایسه کرد. سطح آب جاری شده روی سرریز در دبی‌های مختلف باعث ایجاد

مقایسهٔ پروفیل سطح آب در سرریز اوجی

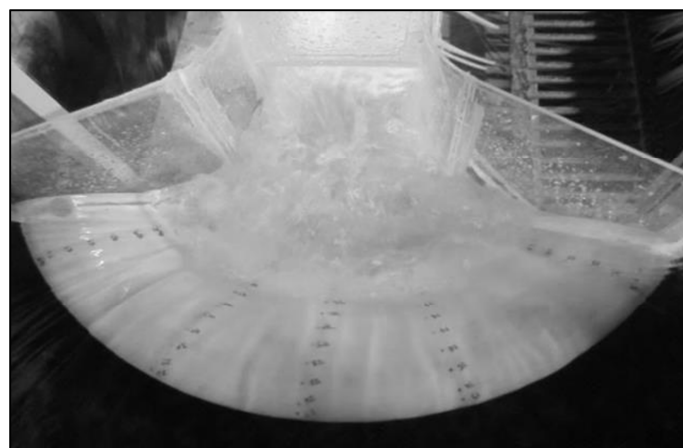
پروفیل سطح آب به‌ازای هفت دبی روی هر سه مقیاس مدل فیزیکی رسم گردید، اما برای اینکه بتوان

مقایسه پروفیل سطح آب در شکل‌های ۹- الف تا ۹- ز نشان می‌دهد که پروفیل سطح آب در مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ بالاتر از مقیاس ۱:۵۰ است. پروفیل سطح آب در هر سه مقیاس نشان می‌دهد که هرچه مقیاس کوچک‌تر باشد تأثیر لزوجت و کشش سطحی بیشتر است و این تأثیرات باعث افزایش هد در سطح آب می‌شود. ارتفاع سطح آب روی سرریز (H_w) با تقسیم بر ارتفاع طراحی (H_d) به صورت بی بعد $\frac{H_w}{H_d}$ ارزیابی شد. مکان اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب روی سرریز با پارامتر بی بعد $\frac{X}{H_d}$ نشان داده شده است که X فاصله افقی از تاج سرریز است.

موج دم‌خروسی و پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز شده است و به همین دلیل میزان اختلاف پروفیل سطح آب بین سه مقیاس را، روی تاج و قسمتی از شوت، یعنی در بازه بین $0 \leq \frac{X}{H_d} \leq 2$ به دست آمد و باهم مقایسه شد. برای اینکه اختلاف سطح آب بین سه مقیاس واضح‌تر نمایش داده شود پروفیل سطح آب را برای هر دبی، ارتفاع سطح آب نسبت به بدنه سرریز رسم گردید. شکل‌های ۹- الف تا ۹- ز مقایسه ارتفاع سطح آب را در سه مدل فیزیکی از سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰، ۱:۷۵ و ۱:۵۰ در دبی‌های بین $\frac{Q}{Q_d} \leq 1/18 = \frac{Q_{دبی}}{Q_{دبی طراحی}} \leq 0/30$ نشان می‌دهد.

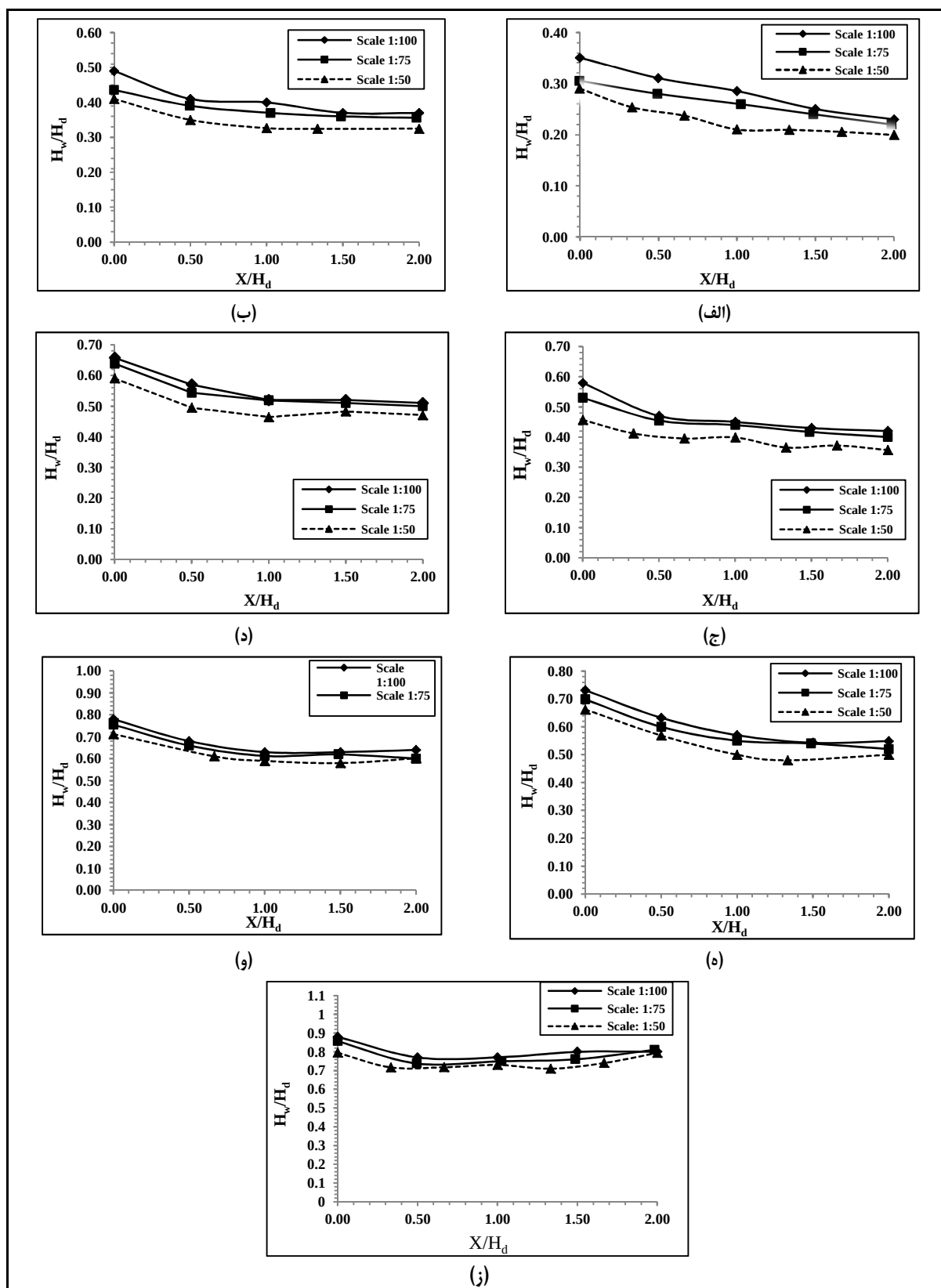


شکل ۷- نمایی از موج دم‌خروسی در مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰



شکل ۸- نمایی از پرش هیدرولیکی در مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰

اثر مقیاس بر پروفیل سطح آب در سرریز...



شکل ۹- مقایسه ارتفاع سطح آب در (الف) $Q/Q_d = 0.3$ ، (ب) $Q/Q_d = 0.44$ ، (ج) $Q/Q_d = 0.6$ ، (د) $Q/Q_d = 0.74$ ، (ه) $Q/Q_d = 0.88$ ، (و) $Q/Q_d = 1.0$ ، (ز) $Q/Q_d = 1.18$

یاد شده باعث افزایش هد روی سرریز می‌شود. بیشترین اختلاف ارتفاع سطح آب در مقیاس ۱:۱۰۰ در $\frac{Q}{Q_d}=0/30$ دیده می‌شود که برابر ۱۸/۴ درصد و کمترین اختلاف ارتفاع سطح آب در $\frac{Q}{Q_d}=1/18$ دیده می‌شود که برابر ۵/۸ درصد است. در مقیاس ۱:۷۵، بیشترین اختلاف ارتفاع سطح آب در $\frac{Q}{Q_d}=0/30$ دیده می‌شود که مقدار آن برابر ۱۵/۶ درصد و کمترین اختلاف ارتفاع سطح آب در $\frac{Q}{Q_d}=1/18$ برابر ۴/۸ درصد است. در دبی طراحی $\frac{Q}{Q_d}=1/0$ اختلاف ارتفاع سطح آب در مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ به ترتیب ۸/۵ و ۵ درصد به دست آمد.

شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{Q}{Q_d}$ مقدار اختلاف ارتفاع سطح آب در هر دو مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ روند کاهشی دارد. می‌توان دریافت که با افزایش دبی، ارتفاع آب روی سرریز افزایش می‌یابد و این افزایش هد باعث کاهش تأثیر نیروی لزوجت و کشش سطحی می‌شود اما باید دانست که همچنان تأثیر این نیروها با توجه به کوچک بودن مقیاس قابل توجه است. با نتایج به دست آمده می‌توان گفت که اثر مقیاس در مدلسازی فیزیکی، در نتایج نمونه اصلی تأثیر قابل توجهی دارد.

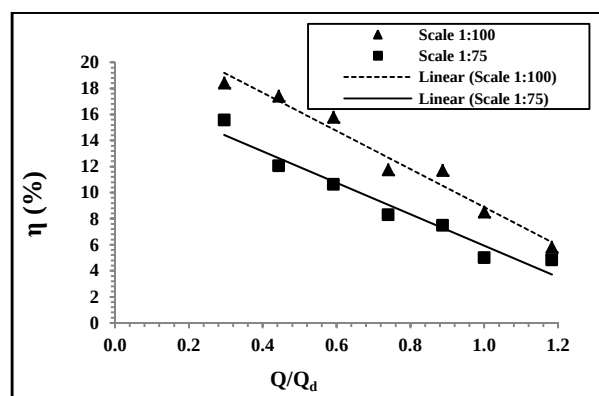
مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۵۰ که بزرگ‌ترین مقیاس اندازه‌گیری در این تحقیق است به عنوان مدل فیزیکی سرریز مبنا قرار داده شد تا بتوان میزان اثر مقیاس در ارتفاع سطح آب و درصد اختلاف سطح آب روی دو مدل سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ را نسبت به مقیاس مبنا به دست آورد. درصد میانگین قدر مطلق اختلاف سطح آب (η) از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$\eta = \left| \frac{H_w - H_{w(0)}}{H_{w(0)}} \right| \times 100 \quad (6)$$

که در آن،

H_w = ارتفاع سطح آب؛ و $H_{w(0)}$ = ارتفاع آب در مقیاس مبنا (مقیاس ۱:۵۰).

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، درصد اختلاف ارتفاع سطح آب روی سرریز در مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰۰، نسبت به مدل با مقیاس ۱:۵۰، در دبی‌های مختلف بیشتر از مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۷۵ است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقیاس کوچک‌تر باشد خصوصیات از سیال مانند تأثیر نیروی لزوجت و کشش سطحی بیشتر است و این افزایش تاثیرات

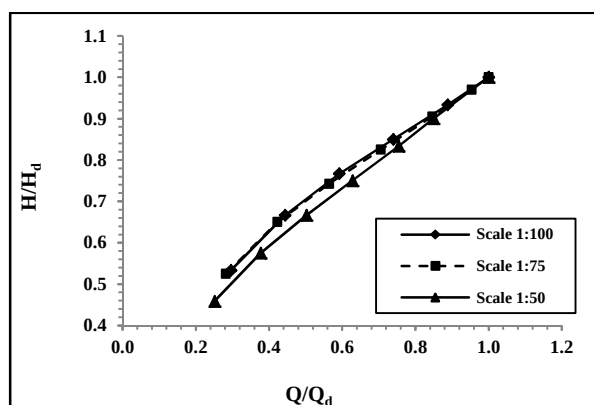


شکل ۱۰- درصد اختلاف سطح آب روی سرریز به دبی

که در آن،
 H/H_d = ارتفاع سطح آب تاج سرریز به ارتفاع طراحی؛ و
 $H/H_{d(0)}$ = ارتفاع آب تاج سرریز در مدل فیزیکی با مقیاس مبنا (مقیاس ۱:۵۰) به ارتفاع طراحی.

درصد قدر مطلق اختلاف سطح آب بالادست تاج سرریز (ϕ) از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\phi = \left| \frac{(H/H_d) - (H/H_d)_{(0)}}{(H/H_d)_{(0)}} \right| \times 100 \quad (7)$$

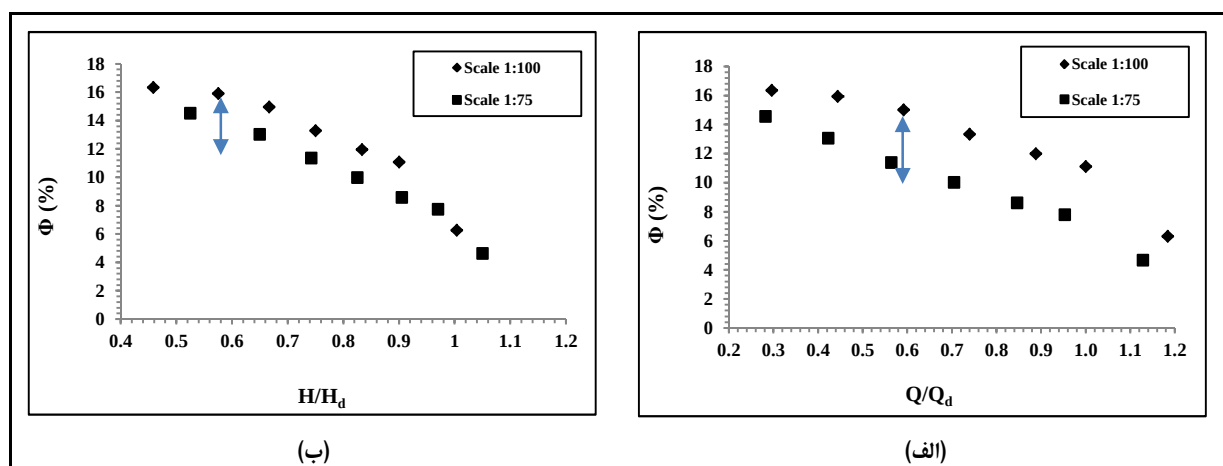


شکل ۱۱- نمودار دبی - اشل

می‌توان دریافت که با افزایش دبی، ارتفاع آب روی سرریز افزایش می‌یابد و این افزایش هد باعث کاهش تاثیر نیروی لزجت و کشش سطحی می‌شود.

در شکل ۱۲- ب نیز می‌توان درصد اختلاف ارتفاع سطح آب روی تاج سرریز را در نسبت ارتفاع به ارتفاع طراحی مختلف در دو مقیاس ۱:۱۰۰ و مقیاس ۱:۷۵ مشاهده کرد. اختلاف ارتفاع سطح آب روی تاج سرریز در مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰ در نسبت $\frac{H}{H_d}$ مختلف، بیشتر از مدل سرریز با مقیاس ۱:۷۵ است. فاصله بین دو منحنی در شکل‌های ۱۲- الف و ۱۲- ب درصد اختلاف آب را روی تاج سرریز بین دو مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ نشان می‌دهد.

شکل ۱۲- الف نشان می‌دهد که درصد اختلاف ارتفاع سطح آب روی تاج سرریز (Φ) ، در مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰ در دبی‌های مختلف، بیشتر است تا در مدل سرریز با مقیاس ۱:۷۵. بیشترین اختلاف ارتفاع سطح آب روی تاج سرریز در مقیاس ۱:۱۰۰ در دبی $\frac{Q}{Q_d} = 0.30$ برابر $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ درصد و کمترین آن در دبی $\frac{Q}{Q_d} = 0.30$ برابر $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ درصد است. در مقیاس ۱:۷۵، بیشترین اختلاف ارتفاع سطح آب در دبی $\frac{Q}{Q_d} = 0.30$ دیده می‌شود که مقدار آن برابر $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ درصد و کمترین آن در دبی $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ دیده می‌شود که برابر $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ درصد است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دبی، مقدار اختلاف ارتفاع سطح آب روی تاج در هر دو مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ روند کاهشی دارد.



شکل ۱۲- (الف) نسبت دبی به درصد افزایش هد در مقیاس ۱:۵۰

(ب) نسبت ارتفاع به ارتفاع طراحی به درصد افزایش هد در مقیاس ۱:۵۰

رابطه تأثیر مقیاس بر پروفیل سطح آب

برای به دست آوردن پروفیل سطح آب برای سرریز با انحنا در پلان می‌توان از مدل‌سازی، استفاده کرد. در صورت کوچک شدن مقیاس مدل فیزیکی سرریز، خصوصیات سیال مانند لزوجت و کشش سطحی افزایش می‌یابد که باید این تأثیرات در بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز مورد توجه قرار گیرد. برای اینکه محدودیت عدد رینولدز و عدد وبر در میزان تأثیرگذاری لزوجت و کشش سطحی بر پروفیل سطح آب روی سرریز به دست آید، می‌توان با محاسبه ارتفاع سطح آب روی تاج سرریز و به دست آوردن ضریب دبی، تأثیر لزوجت و کشش سطحی را محاسبه نمود. برای تعیین دبی عبوری از روی سرریز اوجی از رابطه ۸ استفاده می‌شود:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} \quad (۸)$$

که در آن،

Q = دبی سرریز؛ C_d = ضریب دبی؛ g = شتاب ثقل؛ L = طول تاج سرریز؛ و H = ارتفاع سطح آب روی تاج. ضریب C_d را ضریب دبی (یا ضریب دبی حجمی و یا ضریب شدت جریان) گویند. مقدار آن بستگی به اعداد رینولدز (ضریب لزوجت)، وبر (کشش سطحی) و نسبت $\frac{H}{W}$ (اثر هندسی) دارد (Hamedi, 2002).

برای مقدار ضریب دبی C_d ، محققان رابطه‌هایی متفاوت ارائه کردند که هر یک به نوعی اثر هندسه سرریز، لزوجت و کشش سطحی سیال را در برمی‌گیرد. در این تحقیق برای اینکه میزان تأثیرگذاری مقیاس و میزان تأثیر لزوجت و کشش سطحی برای پروفیل سطح آب روی سرریز اوجی به دست آورده شود، پارامتر K' تعریف شد. پارامتر K' تابع عدد رینولدز و عدد وبر است که در رابطه ۱۱ نشان داده شده است. اعداد رینولدز و وبر به صورت رابطه‌های ۹ و ۱۰ استفاده شد، رانگا راجو و آساوا (Ranga-Raju & Asawa, 1977) رابطه ۱۱ را ارائه داده‌اند:

$$Re = \frac{g^{0.5} H^{1.5}}{\nu} \quad (۹)$$

$$We = \frac{\rho g H^2}{\sigma} \quad (۱۰)$$

$$K' = f(Re = \frac{g^{0.5} H^{1.5}}{\nu}, We = \frac{\gamma H^2}{\sigma}) \quad (۱۱)$$

که در آن،

g = شتاب ثقل؛ H = ارتفاع سطح آب روی تاج؛ ν = ضریب لزوجت سینماتیکی؛ γ = وزن مخصوص آب؛ و σ = کشش سطحی.

محققان رابطه‌های مختلفی برای ضریب دبی ارائه کردند که رابطه اثر هندسه سرریز $(0.611 + 0.075 \frac{H}{W})$ (Hamedi, 2002) در بیشتر روابط ضریب دبی مشترک است.

در این تحقیق برای محاسبه تأثیرگذاری مقیاس و اثر لزوجت و کشش سطحی در سرریز اوجی با انحنا در پلان و با دیوار جانبی همگرا، مقدار ضریب دبی C_d (ضریب دبی محاسباتی) به صورت رابطه ۱۲ نوشته شده است:

$$C_d = (0.611 + 0.075 \frac{H}{W}) K' \quad (۱۲)$$

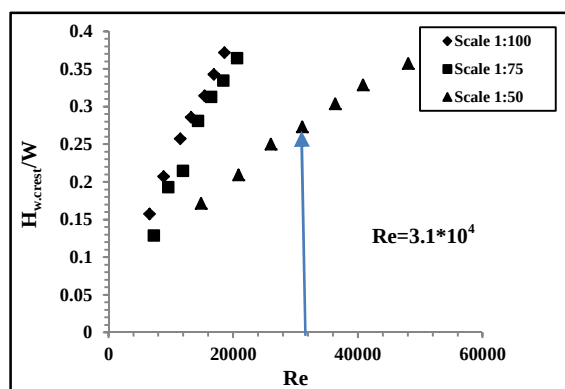
که در آن،

$(0.611 + 0.075 \frac{H}{W})$ = اثر هندسه سرریز (Hamedi, 2002) و K' = اثر لزوجت و کشش سطحی که بر اساس رگرسیون غیرخطی بین ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسباتی و با استفاده از Solver نرم‌افزار Excel به شکل رابطه ۱۳ به دست آمد. در اینجا با معلوم بودن دبی عبوری، طول سرریز و با اجرای آزمایش و قرائت ارتفاع آب روی تاج سرریز اوجی می‌توان ضریب دبی C_d را از رابطه ۸ به دست آورد. این ضریب، ضریب دبی مشاهداتی $C_{d(obs)}$ است.

$$K' = 0.94 + \frac{33.02}{Re^{0.2} We^{0.6}} \quad (۱۳)$$

ضریب دبی محاسباتی $C_{d(cal)i}$ در مقایسه با ضریب دبی مشاهداتی $C_{d(obs)i}$ درصد خطا ε_i به دست می‌آید که از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مقدار K' در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $3/1 \times 10^4$ به سمت ۱ میل می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که با ساخت مدل فیزیکی از سرریز اوجی با انحنا در پلان با دیواره جانبی همگرا در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $3/1 \times 10^4$ می‌توان از اثر لزوجت صرف‌نظر کرد و ارتفاع سطح آب به‌دست آمده از مدل فیزیکی را با برون‌یابی به نمونه اصلی انتقال داد. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در اعداد رینولدز کوچک‌تر از $3/1 \times 10^4$ اثر نیروی لزوجت باعث افزایش ارتفاع آب روی تاج سرریز شده است. اما در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $3/1 \times 10^4$ می‌توان ارتفاع آب روی سرریز در مدل فیزیکی را به نمونه اصلی انتقال داد.



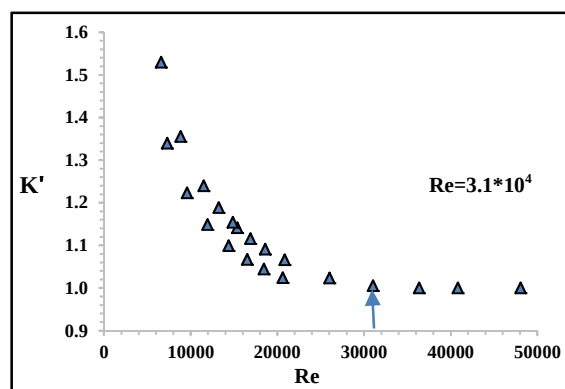
شکل ۱۴- تغییرات عدد رینولدز در برابر $\frac{H_{w,crest}}{W}$ در مقیاس مختلف

ارتفاع آب روی سرریز در مدل فیزیکی را به نمونه اصلی انتقال داد. بر اساس نتایج این تحقیق به طراحی که محدودیت در طول تاج سرریز دارند و ملزم به ساخت سرریزهای با انحنا در پلان هستند توصیه می‌شود که با ساخت مدل فیزیکی سرریز و با استفاده از رابطه ضریب دبی (روابط ۱۲ و ۱۳) که اثر لزوجت و کشش سطحی در آن در نظر گرفته شده است می‌توانند ضریب دبی سرریز را به‌دست آورند؛ همچنین می‌توان برای تعیین ارتفاع سطح آب محدودیت برای عدد رینولدز و عدد وبر برای جلوگیری از لزوجت و کشش سطحی را در نظر گرفت.

$$\varepsilon_i = \frac{C_{d(cal)i} - C_{d(obs)i}}{C_{d(obs)i}} \times 100 \quad (14)$$

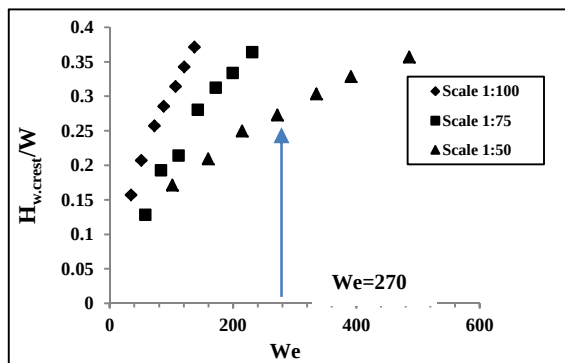
با استفاده از رابطه ۱۵، میانگین درصد خطا E برای کل مجموعه N داده به‌دست می‌آید. در این تحقیق برای هر سه مقیاس مدل فیزیکی، ۷ دبی مورد آزمایش قرار گرفت. رابطه ۱۲ بر اساس رگرسیون غیرخطی بین ۲۱ داده به‌دست آمده است. میانگین خطا E برای رابطه ۱۲، ۲/۵ درصد و همچنین مقدار ضریب همبستگی^۱ برای رابطه ۱۲، ۰/۹۳ است که مقدار قابل قبولی است.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N |\varepsilon_i|}{N} \quad (15)$$

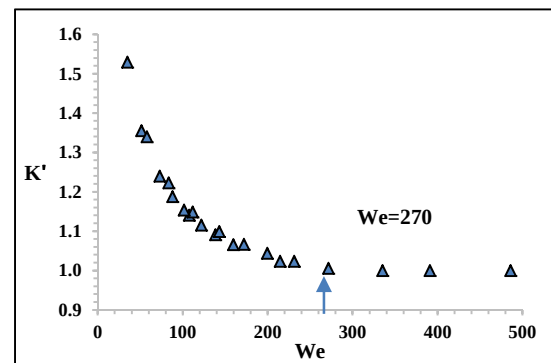


شکل ۱۳- نسبت تغییرات K' به عدد رینولدز

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که مقدار K' در اعداد وبر بزرگ‌تر از ۲۷۰ به سمت ۱ میل می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که با ساخت مدل فیزیکی از سرریز اوجی با انحنا در پلان با دیواره جانبی همگرا در اعداد وبر بزرگ‌تر از ۲۷۰ می‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد و ارتفاع سطح آب به‌دست آمده از مدل فیزیکی را با برون‌یابی به نمونه اصلی انتقال داد. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در اعداد وبر کوچک‌تر از ۲۷۰ اثر نیروی کشش سطحی باعث افزایش ارتفاع آب روی تاج سرریز شده است. اما در اعداد وبر بزرگ‌تر از ۲۷۰ می‌توان



شکل ۱۶- تغییرات عدد وبر در برابر $\frac{H_{w,crest}}{W}$ برای مقیاس مختلف



شکل ۱۵- نسبت تغییرات K' به عدد وبر

نتیجه‌گیری

دبی‌های بزرگ‌تر که ارتفاع آب روی سرریز افزایش می‌یابد، باعث کاهش تأثیر نیروی لزوجت و کشش سطحی می‌شود که در دبی $\frac{Q}{Q_d} = 1/18$ میزان اختلاف ارتفاع سطح آب در مدل با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ نسبت به مقیاس مبنا به ترتیب برابر ۵/۸ و ۴/۸ درصد است. نتایج به دست آمده اثر مقیاس را در مدل‌های با مقیاس کوچک‌تر از ابعاد نمونه اصلی سرریز اوجی نشان می‌دهند که با قانون تشابه فرود کوچک شده‌اند. همچنین، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با مدلسازی سرریز اوجی با انحنا در پلان با دیواره جانبی همگرا می‌توان در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $10^4 \times 3/1$ از اثر لزوجت و در اعداد وبر بزرگ‌تر از ۲۷۰ از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد و نتایج نمونه اصلی را با برون‌یابی از مطالعات مدل به دست آورد.

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی هستند که معمولاً با مطالعه یک مدل فیزیکی طراحی می‌شوند تا عملکرد سرریز در آزمایشگاه بازسازی و به یک طراحی خوب کمک کند. یکی از مسائلی که در مطالعه مدل فیزیکی اتفاق می‌افتد اثر مقیاس است. برای اینکه امکان کاهش نیروی لزوجت و کشش سطحی نیست، اختلاف در ارتفاع سطح آب روی سرریز نسبت به نمونه اصلی وجود دارد. نتایج آزمایش‌ها و مشاهدات این تحقیق نشان می‌دهد که در دبی‌های کم ($\frac{Q}{Q_d} = 0/30$) 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 افزایش می‌یابد که به ترتیب برابر ۱۸/۴ و ۱۵/۶ درصد است. در

قدردانی

از ریاست و کارکنان بخش فنی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که ما را در ساخت مدل‌های فیزیکی یاری رساندند قدردانی می‌شود.

مراجع

- Boes, R. M. 2000. Scale effects in modeling two-phase stepped spillway flow. International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. Zürich. Switzerland.
- Boes, R. M. and Hager, W. H. 2003. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. J. Hydraul. Eng. ASCE. 129, 661-670.
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W. H. 2014. Scale effects of round-crested weir flow. J. Hydraul. Res. 52(5): 653-665.
- Chanson, H. 2004. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. 2nd Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann. London.

- Chanson, H. 2008. Physical modelling, scale effects and self-similarity of stepped spillway flows. Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress. May 12-16. Honolulu. Hawaii. United States.
- Chanson, H. and Chachereau, Y. 2013. Scale effects affecting two phase flow properties in hydraulic jump with small inflow Froude number. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 45, 234-242.
- Crookston, B. M. 2010. Labyrinth Weirs. Ph. D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Utah State University.
- Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P. and Wahl, T. 2005. Hydraulic Modeling: Concept and Practice. Translator: Shamsaie, A. and Sarng, A. Sharif University of Technology. Institute of Scientific Publications. Tehran. (in Persian)
- Fais, L. M. C. F. and Genovez, A. I. B. 2008. Discharge rating curve and scale effects correction in morning glory spillways. Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Oct. 20-23. Hohai University. Nanjing. China.
- Felder, S. and Chanson, H. 2009. Turbulence dynamic similarity and scale effects in high-velocity free-surface flows above a stepped chute. *Exp. Fluid.* 47, 1-18.
- Fox, R. W., McDonald, A. T. and Pritchard, Ph. J. 2011. Introduction to Fluid Mechanics (19th Ed.). Translator: Poosti, B. Academic Pub. Tehran. Iran. (in Persian)
- Gonzalez, C. A. and Chanson, H. 2004. Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows. Proceeding of the 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering. July 13-16. Australia.
- Gonzalez, C. A. and Chanson, H. 2005. Experimental study of turbulence manipulation in stepped spillway. implications on flow resistance in skimming flows. Proceeding of the IAHR Congress. Sep. 11-16. Seoul. Korea.
- Hamed, M. H. 2002. Hydraulic Open Channel. Vol. I. Khaje-Nasir-Toosi University Press. Tehran. Iran. (in Persian)
- Heller, V. 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *J. Hydraul. Res.* 49(3): 293-306.
- Hosseini, S. M. and Abrishami, J. 2011. Hydraulic Open Channel. 20th Edition. Emam-Reza University Press. Mashhad. Iran. (in Persian)
- 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. ASCE.* 132(12): 1353-1357.
- Murzyn, F. and Chanson, H. 2008. Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. *Exp. Fluid.* 45, 513-521.
- Najmaei, M. 1994. Hydraulic Applications. Vol. I. University of Science and Technology Press. Tehran. Iran. (in Persian)
- Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G. and Schleiss, A. J. 2013. Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested piano key weirs. Proceeding of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs. Nov. 20-22. Paris. France.
- Pfister, M. and Chanson, H. 2014 Two phase air-water flows: scale effects in physical modeling. *J. Hydrodyn.* 26, 291-298.
- Ranga-Raju, K. G. and Asawa, G. L. 1977. Viscosity and surface tension effects on weir flow. *J. Hydraul. Div. ASCE.* 103(10): 1227-1231.
- Tanner, W. F. 1982. Rooster tail. *Beaches and Coastal Geology*. Part of the Series Encyclopedia of Earth Science. Available at: <http://link.springer.com>. 702-703.
- Woolbright, R. W. 2006. Hydraulic performance evaluation of RCC stepped spillways with sloped converging training Walls. B. Sc. Biosystems Engineering. Oklahoma State University. Stillwater. Oklahoma.

Scale Effect of the Water Surface Profile on Ogee Spillway with Curvature in Plan and Converging Training Walls

J. Sheikh-Kazemi*, M. Saneie and M. Azhdary-Moghadam

* Corresponding Author: M. Sc. of Hydraulic Structure Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran. Email: j.kazemi65@gmail.com

Received: 28 March 2016, Accepted: 9 June 2016

The water surface profiles on spillway are important for design of free board and spillway training wall height. The engineers have used physical modeling to design these kinds of structures, Considering that the scale effect in the spillway modeling, leads to the different measured data between model and prototype, in this study, an experimental model based on Garmi-Chay Mianeh dam spillway was designed in three 1:100, 1:75, and 1:50 scales. Next, the water surface profile on spillway crest measured in seven discharges and compared with basic scale of (1:50), the percentage of water level difference on the crest calculated in two physical models with 1:100 and 1:75 scales. Results and observations revealed that in $\frac{\text{Discharge}}{\text{Design Discharge}} = \frac{Q}{Q_d} = 0.30$ due to the effect of viscosity and surface tension the difference of water level in the scale of 1:100 and 1:75 was 18.4% and 15.6% respectively, relative to the base scale. The larger discharge, water level on spillway increases, leads to decrease viscosity and surface tension effects. For $\frac{Q}{Q_d} = 1.18$ the difference in water level in the scale of 1:100 and 1:75 was 5.8% and 4.8% respectively relative to the base scale. In this study, viscosity and surface tension effects is stated with correction equation (K'), that was functions of Reynolds and Weber numbers. With the ogee spillway modeling the effect of viscosity in Reynolds numbers larger than 3.1×10^4 and the effect of tension surface in Weber numbers larger than 270 can be neglected and by extrapolation prototype results from model studies can be obtained.

Keywords: Ogee Spillway, Scale Effect, Surface Tension, Viscosity, Water Surface Profile