

بررسی آزمایشگاهی جریان زیربحرانی در شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب

امیر احمد دهقانی، دانشجوی دکتری عمران (گرایش هیدرولیک)، دانشگاه تربیت مدرس، تهران*
محمد رضا چمنی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان**
محمد کریم بیرامی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
*تلفن: (۳۹۷۴) ۰۲۱-۸۰۱۱۰۰۱، نمابر: ۰۲۱-۸۰۰۶۵۴۴، پست الکترونیکی: dehghana@modares.ac.ir
**تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۳۸۰۱، نمابر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیکی: mchamani@cc.iut.ac.ir

چکیده

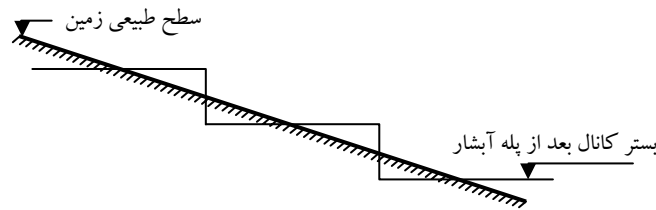
برآورد پارامترهای هیدرولیکی در شیب شکن‌ها یکی از مسائل مهم و مورد توجه مهندسان است؛ زیرا تعیین خصوصیات هیدرولیکی گرداب از جمله افت انرژی و عمق گرداب نقش بسزایی در طراحی هیدرولیکی این سازه‌ها ایفا می‌کند. اگرچه تحقیقات فراوانی بر روی شیب شکن‌هایی با شیب کف صفر صورت پذیرفته است؛ اما خصوصیات هیدرولیکی شیب شکن‌ها با کف معکوس در پایاب بررسی نشده است. در این تحقیق، دو مدل فیزیکی از شیب شکن با ارتفاعهای مختلف و شیب معکوس کف در پایاب بررسی گردید. دو نوع رژیم جریان در آزمایشگاه مشاهده شد که مطالعه حاضر بر روی رژیم دوم که در آن جریان در کانال پایین دست فوق بحرانی است، صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاضر با شیب شکن‌های با کف صفر در پایاب نشان می‌دهد که افزایش شیب کف کانال پایین دست باعث افزایش افت انرژی می‌شود و حد بهینه‌ای برای شیب معکوس وجود دارد که به ازای آن افت انرژی حداکثر است. همچنین، با افزایش شیب کف کانال پایاب، عمق گرداب و عمق اولیه جریان در کانال پایین دست افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: جریان زیربحرانی، شیب شکن، شیب معکوس، گرداب، افت انرژی.

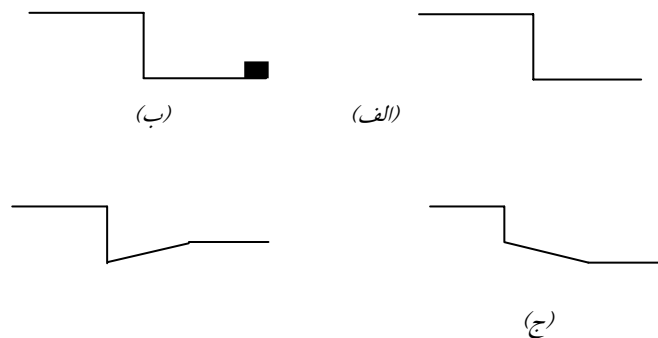
۱- مقدمه

شیب شکن‌ها سازه‌هایی هستند که در کانالهای آبیاری، شبکه‌های جمع‌آوری آب و فاضلاب، شبکه‌های جمع‌آوری آبهای سطحی و سرریزهای پله‌ای مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. در کانالهای آبیاری پس از طرح و محاسبه ابعاد و مشخصات کانال، اگر شیب طبیعی زمین در قسمتهایی از مسیر زیاد و تندتر از شیب مجاز کانال باشد و مخارج خاکریزی و خاک کوبی در مقایسه با ایجاد پله‌های سقوط (آبشار) زیادتر باشد، از شیب شکن استفاده می‌نمایند، شکل (۱). شیب شکن‌های قائم از نظر شکل هندسی شامل چهار دسته ساده، مانع‌دار، با شیب مثبت در پایاب و با شیب معکوس در پایاب می‌باشند،

شکل (۲). وجود شیب شکن باعث خواهد شد تا انرژی مخرب آب به سه صورت، اختلاط جریان با هوا، برخورد جریان با کف کانال پایین دست و چرخش آب در حوضچه گردابی از بین رود.



شکل ۱: پروفیل طولی از مسیر کانال



شکل ۲: انواع شیب شکن از نظر شکل هندسی؛ (الف) شیب شکن قائم ساده، (ب) شیب شکن قائم مانع دار، (ج) شیب شکن قائم با شیب مثبت، (د) شیب شکن قائم با شیب منفی

از اوایل دهه ۱۹۳۰، تعیین خصوصیات هیدرولیکی شیب شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست و شیب کف صفر در پایاب، مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است که از جمله می‌توان به بخمیتف^۱، مور^۲، وایت^۳، رند^۴، گیل^۵، راجاراتنام و چمنی^۶ و محمدی اشاره کرد [۷-۱]. مور با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو شیب شکن قائم با ارتفاعهای مختلف، نتیجه گرفت که افت انرژی به نسب (h/d_c) بستگی پیدا می‌کند که h ارتفاع شیب شکن و d_c عمق بحرانی است. بعد از انتشار مقاله مور، وایت آن را مورد ارزیابی قرار داد و با در نظر گرفتن یک سری فرضیات از جمله شبیه سازی مدل

1-Bakhmeteff

6-Rajaratnam & Chamani

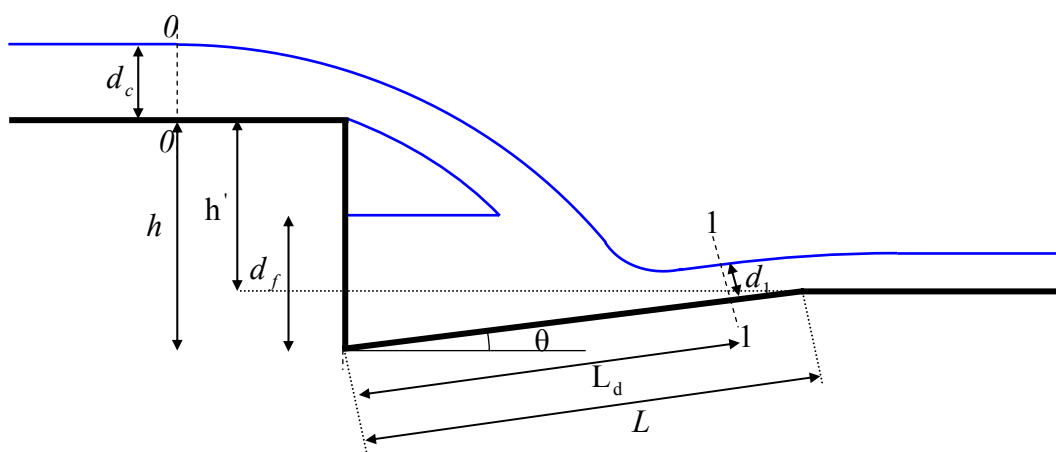
2-Moore

3-White

4-Rand

5-Gill

جریان با مدل جت آزاد، یک مدل تحلیلی پیشنهاد داد. رند در مطالعات آزمایشگاهی خود، عبارت بدون بعدی را به عنوان عدد شیب شکن تعریف نمود و بقیه پارامترها را تابعی از آن در نظر گرفت. گیل نیز با لحاظ عمق گرداب، روابط وایت را تصحیح نمود. راجاراتنام و چمنی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یک سری رابطه‌های تجربی بدست آوردند و با بکارگیری فرضهای جدید روش تحلیلی – تجربی برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی جریان زیربحرانی ارائه نمودند. محمدی نیز با در نظر گرفتن فرضیاتی، روابطی تحلیلی به دست آورد که اساس این فرضیات بیشتر شبیه سازی جریان بر روی شیب شکن با مدل جت آزاد بود. از آنجائیکه بر روی شیب شکن‌های قائم با شیب معکوس کف در پایاب مطالعه‌ای انجام نگرفته است، جا داشت که در این زمینه تحقیقاتی صورت پذیرد. در این تحقیق، با مدلسازی فیزیکی این سازه در آزمایشگاه ابتدا به بررسی رژیمهای جریان که بر روی شیب شکن قائم رخ می‌دهد، پرداخته و سپس خصوصیات هیدرولیکی شیب شکن از جمله افت انرژی (ΔE)، عمق گرداب (d_f) و عمق جریان در پایاب (d_1) مورد مطالعه قرار گرفته است، شکل (۳). همچنین، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این نوع شیب شکن با شیب شکن قائم ساده انجام شده است.



شکل ۳: پروفیل جریان در شیب شکن قائم با شیب معکوس کف در پایاب

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این مطالعه، از یک کانال مستطیلی به طول ۱۱ متر، عرض ۰/۴۰۵ متر و ارتفاع متغیر ۰/۷-۱/۲ متر که جنس یک طرف دیوار آن از شیشه سکوریت و طرف دیگر آن از آهن گالوانیزه ساخته شده، استفاده شده است. جریان آب از یک منبع تغذیه که بیرون از آزمایشگاه قرار دارد، توسط یک پمپ که حداکثر دبی آن ۱۱۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد، در سیکل چرخشی قرار می‌گیرد. دبی جریان بوسیله یک دبی سنج

توربینی که در خط انتقال ورودی به مخزن بالادست کانال نصب شده است و سیستم کاری آن توسط یک نرم افزار کامپیوتری کنترل می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. آب پس از آرامش نسبی در مخزن بالادست که ابعاد آن $1/5 \times 2 \times 2$ متر می‌باشد توسط دو صفحه خمیده به درون کانال آزمایشگاهی هدایت می‌شود. همچنین در انتهای کانال، مخزنهای اندازه‌گیری جریان برای کنترل دبی وجود دارند که دبی جریان در آن توسط سرریز مستطیلی اندازه‌گیری می‌شود.

از دو مدل آزمایشگاهی شیب‌شکن به ارتفاعهای ۲۰ و ۴۰ سانتیمتر و به طول ۴ متر استفاده شد. جهت هوادهی کامل زیر جت آب، چهار روزنه در دیواره قائم شیب‌شکن به فاصله حدود ۰/۵ سانتیمتر از لبه شیب‌شکن تعبیه شد. در قسمت پایین دست شیب‌شکن از ۴ مدل کف معکوس با زوایای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه و طول ۶۵ سانتیمتر استفاده شد. برای شیب‌شکن با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، بعلت محدودیت فیزیکی مدل فقط کف معکوس با زوایای ۵ و ۱۰ استفاده شده است. بعد از کف شیبدار، از یک تخته به طول ۳ متر و ارتفاعی درست برابر ارتفاع انتهایی کف معکوس استفاده شد، شکل (۴). ایجاد شیب افقی کانال آزمایشگاهی با استفاده از تراز یاب و یک سیستم الکتریکی تنظیم شیب انجام شده است.



شکل ۴: شمای کلی از شیب‌شکن و کف شیبدار

۳- مشاهدات آزمایشگاهی

دو رژیم مختلف جریان در این نوع شیب‌شکن‌ها برای مقادیر مختلف دبی مشاهده شده است. در رژیم اول که در دبی‌های نسبتاً کمتر اتفاق می‌افتد، بر روی کف معکوس که در پایاب شیب‌شکن قرار دارد، پرش هیدرولیکی مستغرق تشکیل می‌شود، شکل (۵-الف). در رژیم دوم که در دبی‌های بالاتر اتفاق می‌افتد، پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست حرکت می‌کند و پروفیل جریان شبیه جریان در شیب‌شکن بدون شیب کف در پایاب می‌شود، شکل (۵-ب). بعد از برخورد جت به کف، در رژیم اول جریان زیر بحرانی و در رژیم دوم جریان فوق بحرانی در پایاب حوضچه مشاهده می‌شود. دبی مرزی که در آن

رژیم جریان عوض می‌شود، در حالتیکه دبی جریان در حال افزایش یا در حال کاهش باشد، متفاوت است [۸]. با توجه به میزان دبی در کانالهای انتقال، احتمال تشکیل رژیم دوم جریان بیشتر است. لذا در این تحقیق، به بررسی خصوصیات هیدرولیکی گرداب در این رژیم جریان پرداخته می‌شود.

۴- خصوصیات هیدرولیکی گرداب

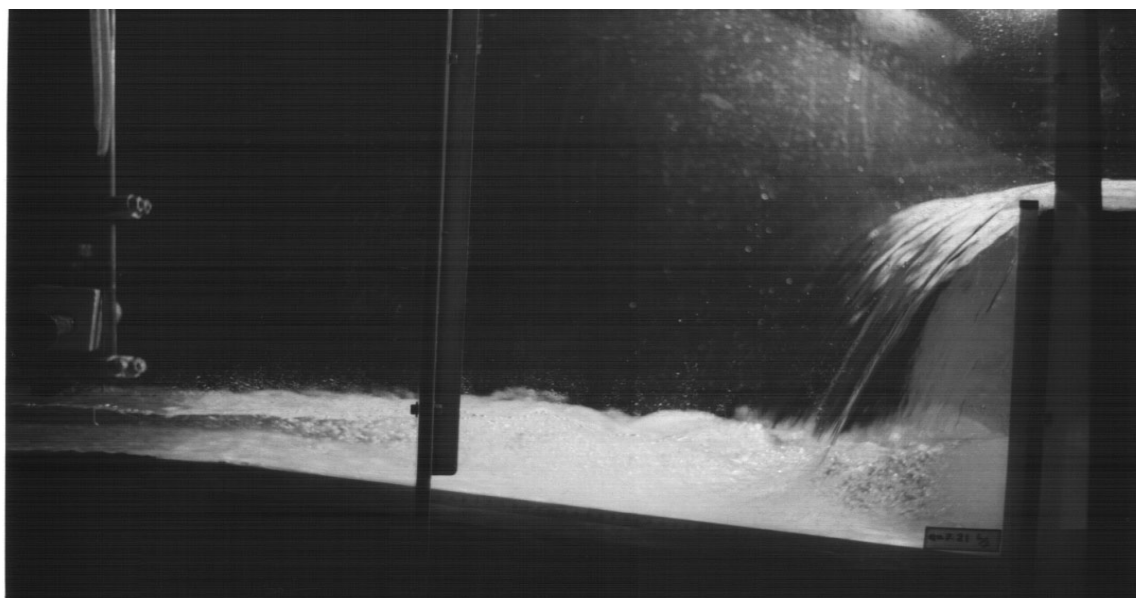
۴-۱ افت نسبی انرژی ($\Delta E/E_0$)

برای محاسبه افت انرژی در شیب‌شکن، نیاز به محاسبه انرژی در مقطع ۱-۱ می‌باشد، شکل (۳). برای محاسبه انرژی در کانال پایین‌دست از رابطه زیر استفاده می‌شود:

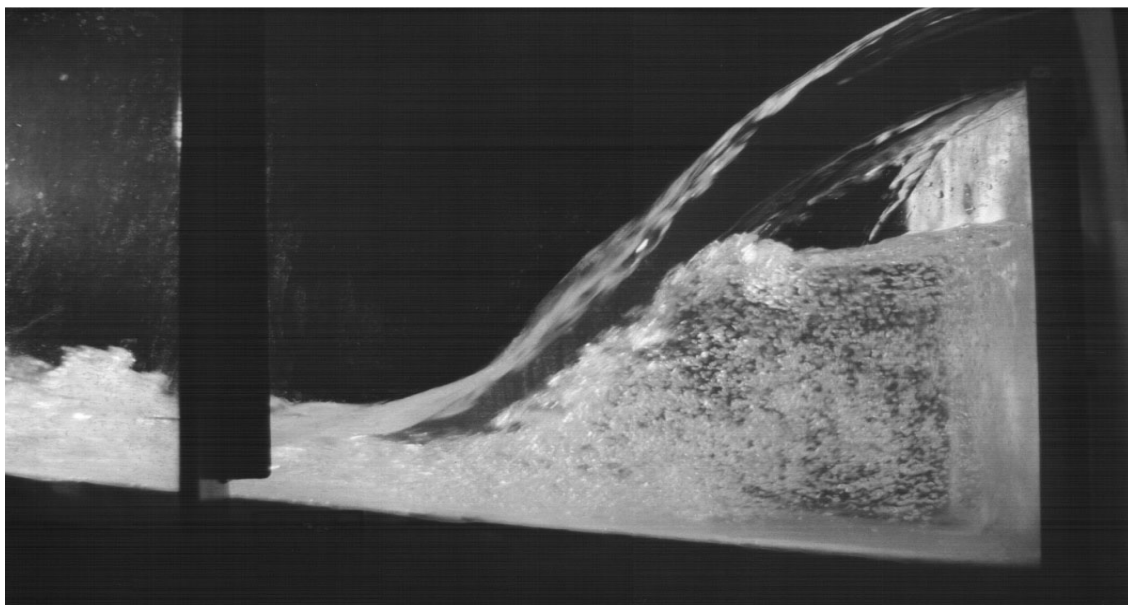
$$E_1 = d_1 \cos\theta + \frac{V_1^2}{2g} + L_d \sin\theta \quad (1)$$

که در آن، E_1 و V_1 به ترتیب انرژی و سرعت جریان در مقطع ۱-۱، L_d طول شیب‌شکن، θ شیب کف پایین‌دست و g شتاب ثقل است.

بعلت اغتشاش زیاد جریان و ورود هوا به داخل جریان، اندازه‌گیری عمق جریان براحتی امکان‌پذیر نیست. اندازه‌گیری دقیق عمق جریان در کانال پایین‌دست برای برآورد انرژی جریان مؤثر است و اگر دقیق برآورد نشود، ممکن است خطا تا ۲۵٪ هم برسد. بارسم منحنی سرعت برحسب عمق جریان، سطح زیر منحنی حساب شد که این مقدار بدست آمده باید برابر دبی جریانی باشد که توسط دبی‌سنج توربینی



(الف)



(ب)

شکل ۵: انواع رژیمهای جریان بر روی شیب شکن؛ (الف) رژیم اول جریان؛ (ب) رژیم دوم جریان

قرائت شده است. بنابراین، با آزمون و خطا عمق جریان در کانال پایین دست برآورد گردید. برای محاسبه سرعت متوسط جریان نیز از منحنی (سرعت-عمق) استفاده شده و از رابطه زیر این مقدار برآورد گردید:

$$\frac{V_I^2}{2g} = \frac{\sum v^3 \Delta A}{2g \sum v \Delta A} \quad (۲)$$

که در آن، ΔA مساحت المان مقطع و v سرعت جریان در وسط المان مقطع است. با توجه به اینکه در مقطع ۰-۰ در شکل (۳) انرژی بالادست جریان برابر $h + 1/5 d_c$ می باشد، افت انرژی را می توان از رابطه زیر بدست آورد

$$\Delta E = h + 1.5 d_c - d_I \cos \theta - \frac{V_I^2}{2g} - L_d \sin \theta \quad (۳)$$

که در آن، h ارتفاع شیب شکن و d_c عمق بحرانی جریان است.

برای مقایسه افت نسبی انرژی، $\Delta E/E_0$ بین حالتی که در پایاب کف معکوس وجود دارد با نتایج

تجربی محققین دیگر مربوط به شیب صفر نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل و شکلهای

بعد، نتایج مربوط به هر شیب برای شیب‌شکلهای با ارتفاع ۲۰ و ۴۰ سانتیمتر با یک علامت نشان داده شده است. در شکل (۶)، h' ارتفاع مؤثر شیب‌شکن برابر $h' = h - L \sin \theta$ می‌باشد که $L = 65 \text{ cm}$ ، طول کل قسمت شیب‌دار شیب‌شکن است. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که افت نسبی انرژی بدست آمده برای شیب‌های منفی کف ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بیشتر از مقدار آن برای کف افقی در پایاب است. جالب است که مقدار افت نسبی انرژی برای شیب کف با زاویه ۵ درجه مقداری بیشتر از افت انرژی با زاویه کف ۱۵ درجه است. بنظر می‌رسد که این نحوه تغییرات نشان‌دهنده وجود یک حد بهینه شیب کف در پایاب است که به ازاء آن افت نسبی انرژی در پایاب شیب‌شکن به مقدار حداکثر می‌رسد.

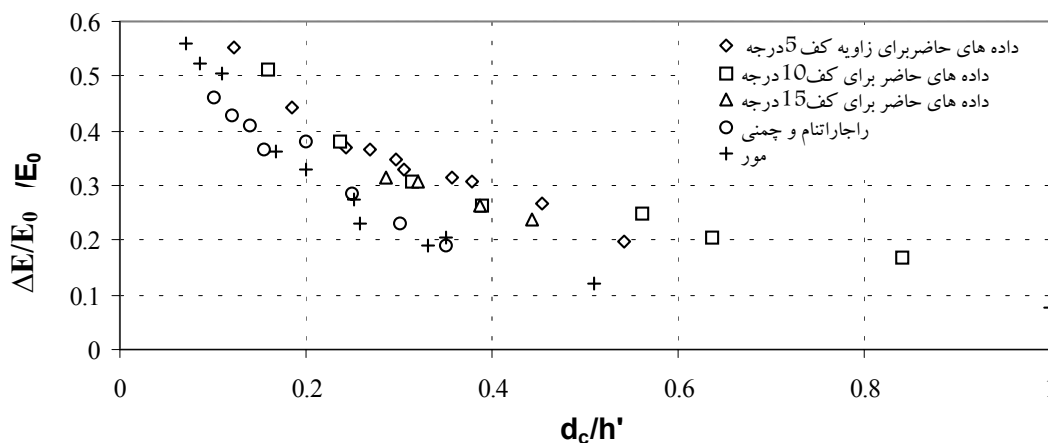
۴-۲ ارزیابی عمق گرداب در حوضچه (d_f)

برای برآورد عمق گرداب از خط کش مدرجی که بر روی دیوار شیشه‌ای نصب شده بود، استفاده گردید. عمق گرداب در حوضچه مجاور دیواره شیب‌شکن به حداکثر مقدار میرسد و هر چه به محل برخورد جت به سطح حوضچه می‌رسد، عمق آب کاهش می‌یابد. همچنین، عمق گرداب نسبت به زمان دارای نوساناتی می‌باشد، بهمین دلیل برای هر دبی مقادیر حداقل و حداکثر عمق اندازه‌گیری شده و سپس متوسط‌گیری شده است. وقتی که جریان آب بصورت جت آزاد از لبه شیب‌شکن پرتاب می‌شود، مقدار زیادی از هوا وارد جریان آب می‌شود و باعث می‌گردد تا یک محیط دو فاز از آب و هوا در گرداب شیب‌شکن قائم بوجود آید. این موضوع برای دبی‌های بیشتر محسوس‌تر است.

برای مقایسه عمق گرداب بین حالتی که در پایاب کف معکوس وجود دارد و حالتی که در پایاب کف افقی قرار دارد، نتایج حاصل از شیب‌های مختلف با نتایج تجربی محققین دیگر در شکل (۷) ترسیم شده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که در یک دبی ثابت، با افزایش شیب منفی کف در پایاب شیب‌شکن، عمق نسبی گرداب افزایش می‌یابد.

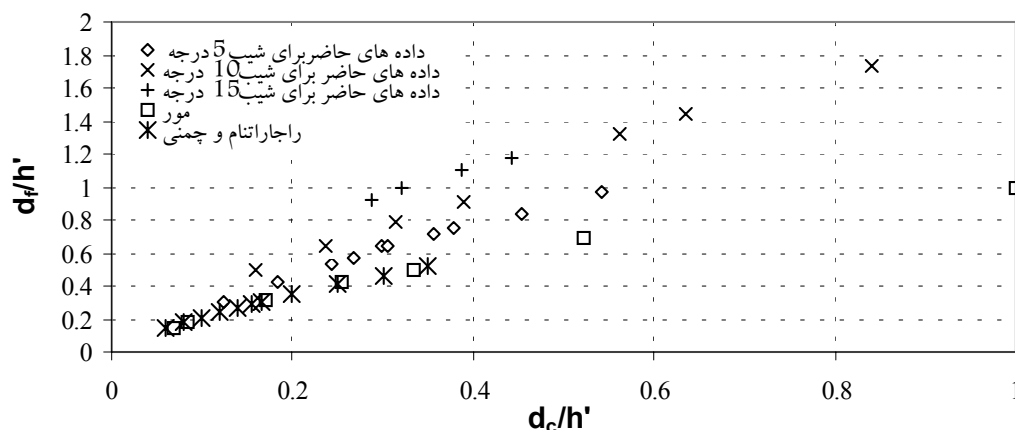
۴-۳ ارزیابی عمق جریان در پایاب (d_f)

جریان پس از عبور از شیب‌شکن به صورت جت پرتابی به کف پایین‌دست برخورد می‌کند و مقدار زیادی هوا داخل جریان خواهد شد که اندازه‌گیری مستقیم عمق جریان خطای فراوانی دارد. لذا،



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی افت نسبی انرژی مطالعه حاضر برای شیب‌شکن با شیب

معکوس کف در پایاب با نتایج آزمایشگاهی محققین قبلی

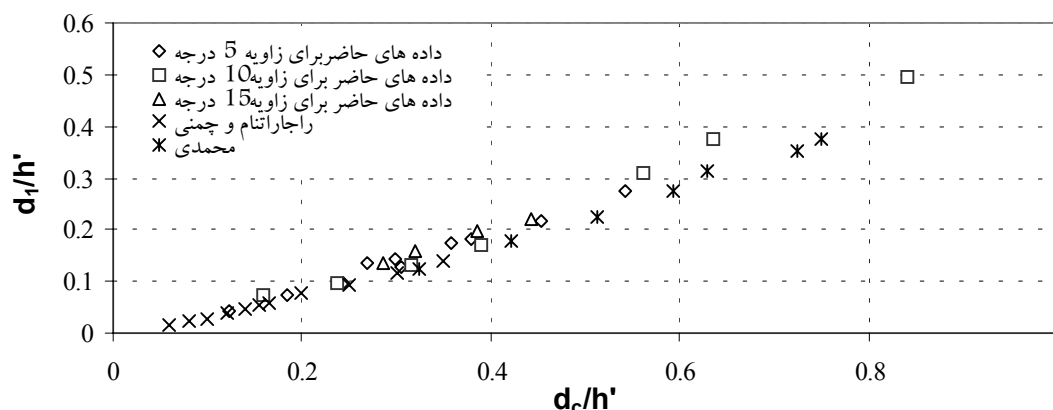


شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی عمق نسبی گرداب شیب‌شکن با شیب معکوس در پایاب با نتایج آزمایشگاهی شیب‌شکن با شیب صفر در پایاب

این عمق به طور غیرمستقیم و از روی منحنی (سرعت-عمق) به دست می‌آید. نتایج حاصل از شیب‌های منفی مختلف با نتایج تجربی محققین دیگر در شکل (۸) نشان داده شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که در یک دبی ثابت، با افزایش شیب از صفر به ۵ درجه در پایاب شیب‌شکن، عمق جریان افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش شیب منفی کف، d_1 ثابت می‌ماند.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی جریان زیربحرانی بر روی شیب‌شکن‌های با شیب کف معکوس (شیب منفی) صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به ازاء دبی ثابت، با افزایش شیب منفی کف، مقدار افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر شیب منفی کف، این افت کاهش می‌یابد. با افزایش شیب منفی کف به ازاء یک دبی ثابت، عمق گرداب در



شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی حاضر برای شیب شکن با شیب معکوس در پایاب با نتایج تجربی قبلی برای شیب شکن با شیب صفر در پایاب به لحاظ عمق نسبی جریان در پایاب

حوضچه افزایش می یابد. همچنین، با افزایش شیب منفی کف تا ۵ درجه عمق جریان در پایاب افزایش می یابد، ولی با افزایش بیشتر شیب منفی کف، این عمق ثابت می ماند.

۶- قدردانی

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان و سازمان مدیریت منابع آب ایران که مخارج پروژه را تامین نمودند کمال تشکر و قدردانی بعمل می آید.

۷- مراجع

- [1] Bakhmeteff, B. A., *Hydraulics of Open Channels*, Mc Graw-Hill, 1932, pp. 295.
- [2] Moore, W. L., "Energy Loss at the Base of Free Overfall", *Trans., ASCE*, 108, 1943, 1343- 1360.
- [3] White, M. P., "Discussion of Moore (1943)", *Trans., ASCE*, 108, 1943, 1361-1364.
- [4] Gill, M. A., "Hydraulics of Rectangular Vertical Drop Structures", *J. Hydr. Res., IAHR*, 17(4), 1979, 289-302.
- [5] Rand, W., "Flow Geometry at Straight Drop Spillways", *Proc., ASCE*, 81, Paper 791, 1955, 1-13.
- [6] Rajaratnam, N. & Chamani, M. R., "Energy Loss at Drops", *J. Hydr. Res., IAHR*, 33(3), 1995, 373-384.
- [7] محمدی، ر.، "تحلیل ریاضی خصوصیات هیدرولیکی گرداب در شیب شکن قائم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، تابستان ۱۳۷۸.

[8] دهقانی، ا. ا.، "تحلیل خصوصیات هیدرولیکی گرداب در شیب شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست و شیب

معکوس در پایاب“، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، تابستان ۱۳۸۰.