

## عملکرد آبی سرریزهای شیب دار تورسنگی در شرایط جریان آزاد

مهرداد خیرایی\*<sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۲</sup>

### چکیده

برخلاف سرریزهای معمولی نفوذناپذیر، مواد فیزیکی و شیمیایی از درون سرریزهای تورسنگی به پایین دست عبور می‌کنند؛ بنابراین سرریزهای تورسنگی سازه‌هایی با کمترین اثرات منفی بر محیط زیست بوده و به سازه‌های دوست‌دار محیط‌زیست معروفند. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تغییرات شیب بالادست و پایین دست بر ضریب آبگذری جریان در سرریزهای شیب دار تورسنگی با شرایط جریان آزاد، و مقایسه با سرریزهای شیب دار نفوذناپذیر می‌باشد. در ابتدا، پس از شناسایی فرانسجهای مؤثر، رابطه‌ی عمومی بدون بعد توسعه داده شده است. برای این منظور، ۸ نمونه‌ی مختلف سرریز تورسنگی و ۳ نمونه‌ی سرریز نفوذناپذیر در یک نهر پایدار آزمایشگاهی افقی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵، ۰/۳ و ۰/۵ متر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها برای دامنه‌ی وسیعی از بده، عمق بالادست، عمق پایین دست، اندازه‌ی مصالح، شیب بالادست و شیب پایین دست انجام گرفتند. نتایج نشان دادند که در شرایط جریان آزاد، با افزایش زاویه‌ی بالادست و پایین دست سرریز با راستای عمود، بار آبی روی سرریز افزایش و ضریب بده کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش اندازه‌ی مصالح، بار آبی روی سرریز کاهش و ضریب بده افزایش می‌یابد. سرانجام، با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته، رابطه‌ای برای تخمین ضریب بده در سرریز شیب دار تورسنگی با همبستگی بالای ۰/۹۷ ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب بده، سرریز شیب دار، تورسنگ، جریان آزاد، نمونه‌ی فیزیکی

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز، mehrdadkheiray@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

## مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های آبی مهم جهت مهار کردن جریان، تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری بدهی جریان در نهرهای آبیاری و رودخانه‌ها می‌باشند. سرریزها را بر اساس ضخامت تاج آنها می‌توان به دو دسته کلی لبه تیز و ثابت مانند، سرریز لبه پهن، سرریز تاج دایره‌ای و سرریز شیب دار و... تقسیم کرد، (قمشی و امامقلی‌زاده (۱۳۸۷)). از سرریزهای لبه تیز معمولاً برای اندازه‌گیری بدهی کم در نهرهای روباز استفاده می‌شود. سرریزهای ثابت نسبت به سرریزهای لبه تیز مستحکمتر و مقاومتر بوده و از آنها برای اندازه‌گیری و تنظیم سطح آب در نهرها و رودخانه‌ها استفاده می‌گردد. یکی از انواع سرریزهای ثابت، سرریزهای کرامپ (شیب‌دار) می‌باشد. شیب بالادست سرریز شیب دار در جلوگیری از منطقه‌ی سکون آب، که در سرریز لبه پهن به وجود می‌آید مؤثر است. همچنین، این سرریزها می‌توانند استغراق زیادی را تحمل کنند و برای بدهی‌های کم و زیاد قابل استفاده می‌باشند. معمولاً، این سرریزها از بتن ساخته شده و دارای بدنه‌ی نفوذناپذیر می‌باشند؛ اما امروزه سرریزهای ساخته شده از توری سنگی به دلیل این‌که بهتر می‌تواند نیازهای طبیعی و محیط‌زیست را برطرف کنند، ترجیح داده می‌شوند. همچنین، از نظر کیفیت آب، مواد فیزیکی و شیمیایی مانند مواد معلق و آلی به حالت تعلیق درآمده، از طریق بدنه‌ی نفوذپذیر به پایین دست منتقل گردیده و ته‌نشستهای انباشته شده در پشت سرریز به حداقل می‌رسد. ممکن است باکتریهای موجود در سطح مصالح سنگی باعث تجزیه‌ی مواد آلی شود این واکنش زیست شیمیایی و همچنین هوادهی ناشی از تلاطم عبور جریان از بین مصالح سنگی سرریز، که باعث تجزیه‌ی هوازی مواد آلی می‌گردد، عاملی برای خودپالایی و تصفیه و حذف بوی بد فاضلاب می‌باشند. با این تفاسیر، چنین سازه‌ها علاوه بر سازگاری با بوم نظام و محیط‌زیست، دارای اثرات مثبت بر آنها می‌باشند.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی خصوصیات جریان با انواع مختلف هندسه ورودی سرریز لبه‌پهن انجام شده است؛ از جمله گاگس و همکاران (۲۰۰۶)، هاگر و اسکوت (۱۹۹۴)، انسار و گونزالس - کاسترو (۲۰۰۳)، لی و گارگه (۱۹۹۸)، سارجیسن و پرسسی (۲۰۰۹) مطالعاتی را در زمینه‌ی اثر شیبهای بالادست و پایین دست سرریز

لبه‌پهن انجام داده‌اند. نتایج آنها نشان داده‌اند که افزایش شیب بالادست باعث کاهش ارتفاع نیمرخ سطح آب، بنابراین کاهش فشار پایای تاج، و در نتیجه کاهش ضریب بدهی جریان می‌باشد. بیشتر مطالعات قبلی در مورد سرریزهای تورسنگی در شرایطی انجام شده که عمق جریان در بالادست سرریز کمتر از ارتفاع سرریز می‌باشد. کلز (۱۹۹۳) جریان متغیر تدریجی را از روی بند سنگریزه‌ای برای دو شرایط جریان مختلف شامل ریزش جزئی و کامل از روی بند مورد مطالعه قرار داد. نتایج نامبرده نشان داد که نسبت گذر جریان از داخل بند سنگریزه‌ای به گذر جریان از روی آن در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵ می‌باشد. میچیکو و همکاران (۲۰۰۵) آب پویایی یک پشته‌ی قلوه‌سنگی را به صورت نظری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده و با انجام تحلیلی یک‌بعدی در مورد جریان یکنواخت دایمی از میان سرریز توصیف کردند که بدهی تابع فراسنجهای مانند عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز، تخلخل، قطر ذرات پشته سنگریزه‌ای، طول سرریز می‌باشد. میچیکو و همکاران (۲۰۰۷) مطالعاتی آزمایشگاهی را در زمینه‌ی جریان بر روی سرریزها و آب‌شکنهای سنگریزه انجام دادند. یافته‌های آنها نشان دادند که تغییرات جرم و اندازه حرکت بین جریان اصلی و جریان در محیط متخلخل اطراف زوایای بالادست و پایین دست سرریز و آب‌شکن غالب بوده، و همچنین، خطوط جریان به سرعت منقبض می‌شدند. لئو و همکاران (۲۰۰۸) جریان آشفته را در اطراف یک پشته سنگریزه‌ای در کف یک نهر پایه دار با جریان آزاد مورد مطالعه قرار دادند. آنها ۳ نمونه با تخلخلهای ۰، ۳۴/۹ و ۴۷/۵ درصد را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که برای سازه‌های متخلخل ناحیه‌ی چرخش در جهت پایین دست، به دلیل عبور جریان از درون سرریز طولانیتر می‌شود. چانسن (۲۰۰۶) اشاره کرد که اندرکنش بین جریان نشی (از داخل سرریز) و روی سرریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است، و موضوعی ارزنده برای مطالعات آینده می‌باشد. از جمله‌ی مطالعات اخیر در زمینه‌ی جریان بر روی سرریز تورسنگی را به وسیله‌ی محمد (۲۰۱۰) می‌توان نام برد. در این مطالعه با انتخاب ۲ نمونه‌ی سرریز تورسنگی مستطیلی و ۲ نمونه‌ی سرریز بتنی با همان هندسه برای مقایسه، به مطالعه عملکرد سرریز تورسنگی پرداخته شده و در نهایت

استفاده از روش تحلیل ابعادی و استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام، فراسنجهای بدون بعد مهم این تحقیق برای نمونه‌ی شاهد (نفوذناپذیر با استفاده از پلگسی-گلاس) و نمونه‌های تورسنگی به ترتیب به صورت روابط ۲ و ۳ استخراج شده‌اند:

$$C_D = f\left(\frac{h}{L_w}, We, Re, \alpha, \beta\right) \quad (2)$$

$$C_D = f\left(\frac{h}{L_w}, \frac{d_m}{P}, We, Re, \alpha, \beta\right) \quad (3)$$

که آنها  $We$  عدد وبر، و  $Re$  عدد رینولدز جریان در بالادست سرریز (محل اندازه‌گیری  $h$ ) می‌باشند. در این تحقیق با توجه به این که عمق جریان روی سرریز بیشتر از ۴ سانتی متر می‌باشد، از عدد وبر صرف نظر شده است. همچنین، با توجه به این که جریان در بالادست سرریز متلاطم می‌باشد، از عدد رینولدز صرف نظر شده است.

### ب) مدل فیزیکی

آزمایشهای این تحقیق در یک نهر پایه دار افقی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵، ۰/۳ و ۰/۵ متر در آزمایشگاه نمونه‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برای اندازه‌گیری بده از بده‌سنج مافوق صوت مستقر بر روی لوله‌ی ورودی تلمبه، و به‌منظور قرائت ارتفاع سطح آب در قسمت‌های موردنیاز از عمق‌یاب مستقر روی نهرپایه دار استفاده گردید. همچنین به منظور بررسی تغییرات نیمرخ سطح آب در آزمایشهای مختلف، از دوربین عکاسی استفاده شده. سپس با استفاده از نرم‌افزار digitizer نیمرخ سطح آب و تغییرات بار آبی بالادست سرریز از روی عکسها استخراج شده‌اند. در مطالعه‌ی سرریز حاضر ۳ نمونه‌ی سرریز شیب دار نفوذناپذیر از جنس پلگسی-گلاس متناظر با سرریز تورسنگی، به‌منظور مقایسه‌ی نتایج و ۸ نمونه‌ی سرریز شیب دار تورسنگی ساخته شده است. شکل (۲) و (۳) به ترتیب نمونه‌های سرریز شیب دار نفوذناپذیر و سرریزهای شیب دار تورسنگی استفاده‌شده در آزمایشها را نشان می‌دهند؛ همچنین، اطلاعات هندسی و نام اختصاری مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده در جدول (۱) ارائه گردیده‌اند. نکته‌ی قابل

روابطی برای پیش‌بینی بده‌ی این سرریز در شرایط آزاد و مستغرق ارائه شد.

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد آبی سرریز شیب دار تورسنگی در شرایط مختلف شیبهای بالادست، پایین دست، ترکیب بالادست و پایین دست، و همچنین مصالح با دانه‌بندی مختلف می‌باشد. در این تحقیق، با بسط فراسنجهای مختلف و استفاده از تحلیل ابعادی، و همچنین استفاده از وایازی غیرخطی، روابطی برای ضریب بده در شرایط جریان آزاد ارائه شده است.

### مواد و روشها

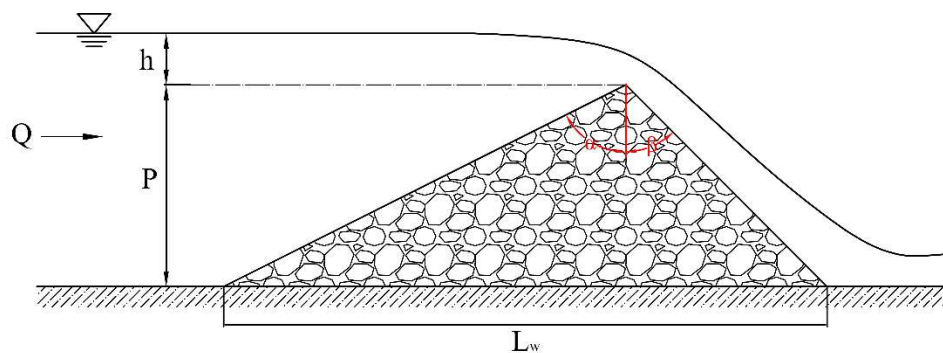
#### الف) تحلیل ابعادی

به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت فراسنجهای متعددی که بر هیدرولیک جریان سرریز شیب دار تورسنگی مؤثر می‌باشند اقدام نموده، و با تحلیل ابعادی، رابطه‌ای کلی شامل فراسنجهای بدون بعد استخراج شده است. فراسنجهای مؤثر در این آزمایشها در رابطه‌ی (۱) ارائه گردیده. همچنین، طرح واره و فراسنجهای هندسی و آبی در این نوع سرریز در شکل (۱) نمایش داده شده است.

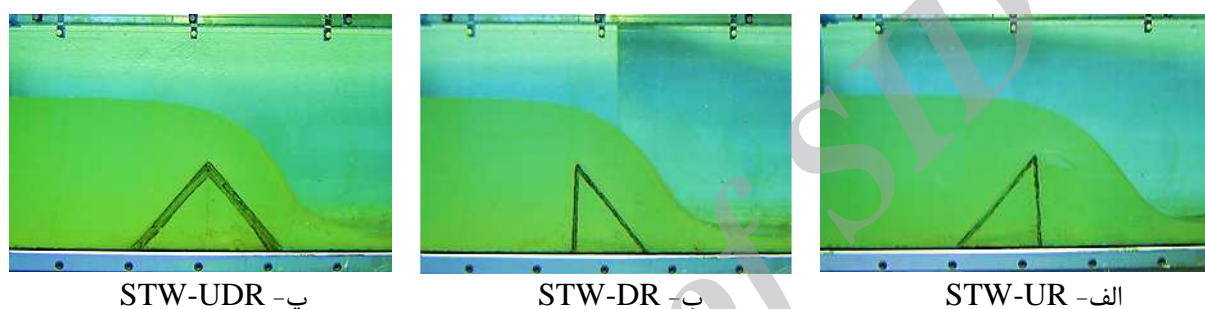
$$f(h, L_w, P, Q, g, \sigma, \rho, \mu, C_D, d_m, \alpha, \beta) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $h$  بار آبی روی سرریز،  $L_w$  طول کف سرریز در جهت جریان،  $P$  ارتفاع سرریز،  $Q$  بده جریان،  $g$  شتاب گرانش،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\rho$  جرم واحد حجم مایع،  $\mu$  لزجت پویایی،  $C_D$  ضریب بده‌ی سرریز،  $d_m$  قطر متوسط معرف مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق،  $\alpha$  زاویه‌ی بالادست سرریز با راستای عمودی و  $\beta$  زاویه‌ی پایین دست سرریز با راستای عمودی می‌باشند. (لازم به ذکر است که در این تحقیق به جای استفاده از عبارت زاویه‌ی بالادست سرریز با راستای عمودی و عبارت زاویه‌ی پایین دست سرریز با راستای عمودی از عبارت زاویه‌ی پایین دست استفاده شود).

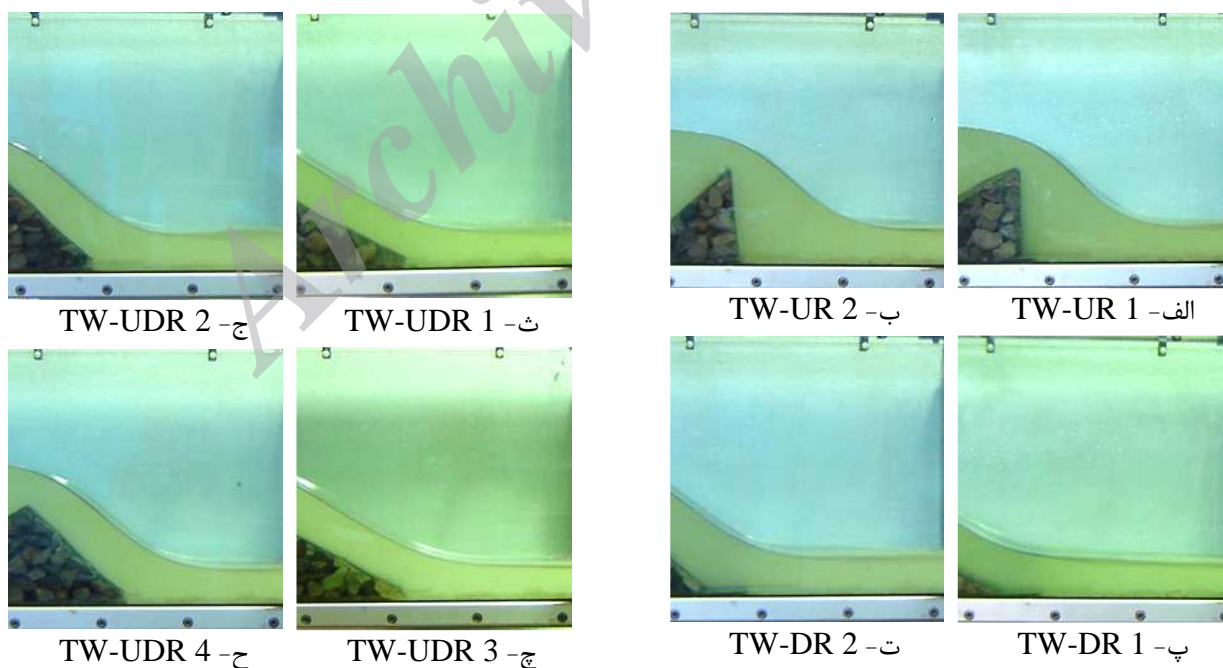
با توجه به این که در تحقیق حاضر از مصالح با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت استفاده شده، بنابراین تنها قطر متوسط مصالح در تحلیل ابعادی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، با توجه به مطالعات پیشین در این زمینه، و



شکل ۱- طرح واره سرریز تورسنگی شیب دار و فراسنجهای هندسی و آبی.



شکل ۲- نمونه‌های نفوذناپذیر استفاده شده در آزمایشها.



شکل ۳- نمونه‌های تورسنگی استفاده شده در آزمایشها.

جدول ۱- مشخصات و نام اختصاری سرریزهای شیب دار مورد استفاده در این تحقیق.

ردیف	نام نمونه سرریز شیب دار	نام اختصاری	P	$\alpha$	$\beta$
۱	سرریز تورسنگی با شیب بالادست ۱	TW-UR-1	۱۶cm	۶۰°	۰°
۲	سرریز تورسنگی با شیب بالادست ۲	TW-UR-2	۱۶cm	۴۵°	۰°
۳	سرریز تورسنگی با شیب پایین دست ۱	TW-DR-1	۱۶cm	۰°	۶۰°
۴	سرریز تورسنگی با شیب پایین دست ۲	TW-DR-2	۱۶cm	۰°	۴۵°
۵	سرریز تورسنگی با شیب ترکیبی ۱	TW-UDR-1	۱۶cm	۶۰°	۶۰°
۶	سرریز تورسنگی با شیب ترکیبی ۲	TW-UDR-2	۱۶cm	۴۵°	۴۵°
۷	سرریز تورسنگی با شیب ترکیبی ۳	TW-UDR-3	۱۶cm	۶۰°	۴۵°
۸	سرریز تورسنگی با شیب ترکیبی ۴	TW-UDR-4	۱۶cm	۴۵°	۶۰°
۹	سرریز نفوذناپذیر با شیب بالادست	TW-UR	۱۶cm	۴۵°	۰°
۱۰	سرریز نفوذناپذیر با شیب پایین دست	STW-DR	۱۶cm	۰°	۴۵°
۱۱	سرریز نفوذناپذیر با شیب ترکیبی	STW-UDR	۱۶cm	۴۵°	۴۵°

آزمایش واقع شده و در مجموع ۴۴۵ آزمایش انجام و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. روابط مختلفی برای بدهی سرریزها وجود دارد. در این تحقیق، رابطه‌ی (۴) مبنای محاسبه‌ی بدهی عبوری از سرریزها قرار گرفته است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (۴)$$

که در آن B عرض نهرپایه دار و H بار آبی کل شامل بار پایا و بار سرعت می‌باشد، که H به صورت  $H = v^2/2g + h$  تعریف می‌شود.

### نتایج و بحث

#### (الف) بررسی اثر هندسه سرریز و اندازه مصالح بر

##### ضریب بده

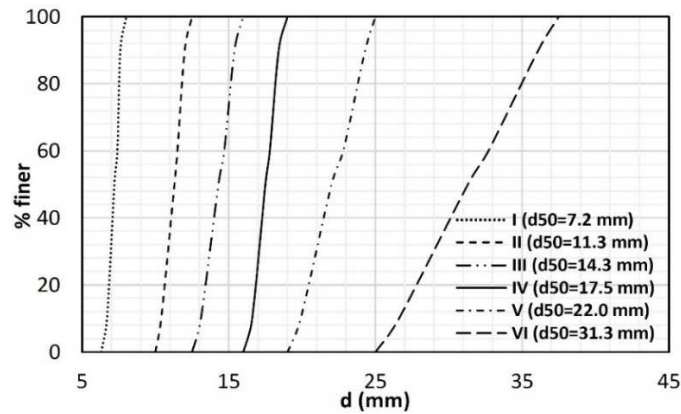
در شکل (۵) نتایج سرریزهای نفوذناپذیر ارائه شده اند. بطور کلی در این نمونه‌ها در محدوده‌ی مورد آزمایش، سرریز با ترکیب شیب بالادست و پایین دست، دارای بیشترین ضریب بده، و سرریز با شیب بالادست دارای کمترین ضریب بده است. جهت بررسی اثر تغییر اندازه‌ی مصالح بر ضریب بده در همهی نمونه‌های تورسنگی،

رسم

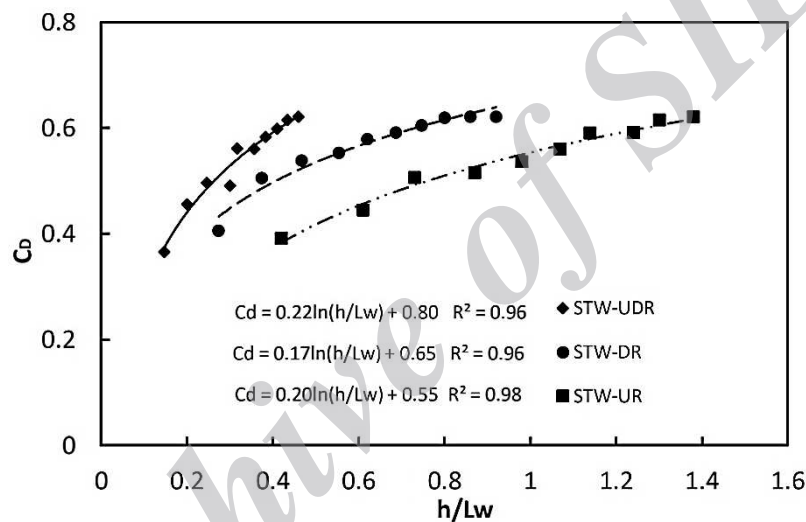
با

نتایج

ذکر این‌که برای سرریز شیب دار (مثلی) از اختصار T استفاده شده است. برای ساخت سرریزهای تورسنگی، در ابتدا چارچوب نمونه از میله‌های فلزی با قطر ۴ میلی‌متر ساخته شده و سپس با استفاده از یک تور فولادی که اندازه شبکه‌های آن کوچکتر از حداقل اندازه‌ی مصالح سنگی مورد استفاده بود، نمونه‌های مختلف سرریز تورسنگی ساخته شد. در این تحقیق سرریزها بر روی یک صفحه فلزی به ضخامت ۱ سانتی‌متر به منظور اتصال مدل‌های ساخته شده به کف نهرپایه دار، و همچنین پایداری آنها هنگام آزمایش قرار داده شدند. مصالح سنگی مورد استفاده در سرریزهای شیب دار تورسنگی شامل ۶ اندازه‌ی مختلف با قطر تقریباً یکنواخت و تیز گوشه در محدوده‌ی ۷/۲ تا ۳۱/۳ میلی‌متر، با تخلخل ۵۱/۱ درصد برای مصالح با قطر متوسط ۷/۲ میلی‌متر، تا تخلخل حدود ۴۳ درصد برای مصالح با قطر متوسط ۳۱/۳ میلی‌متر می‌باشند. همچنین، در شکل (۴) منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در نمونه‌های تورسنگی نمایش داده شده است. همان‌طور که در منحنیهای دانه‌بندی مشخص است، مصالح استفاده‌شده در این تحقیق جز در زبری شماره ۳۱/۳ میلی‌متر، دارای دانه‌بندی تقریباً یکنواخت می‌باشند. نمونه‌های مختلف سرریز در بده‌های مختلف بین ۳ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه مورد



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی تجمعی مصالح مورد استفاده در این تحقیق.



شکل ۵- مقایسه ی ضریب بده با نسبت  $h/L_w$  در سرریزهای نفوذناپذیر

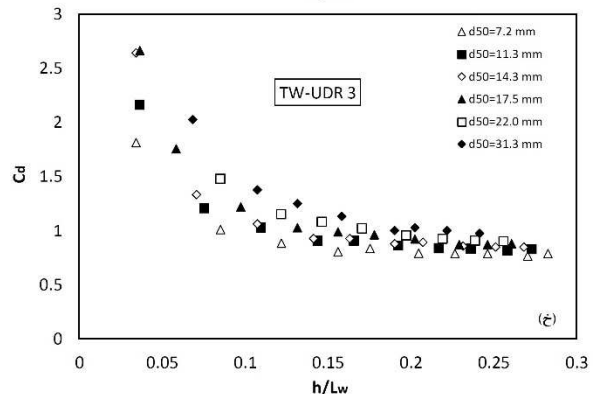
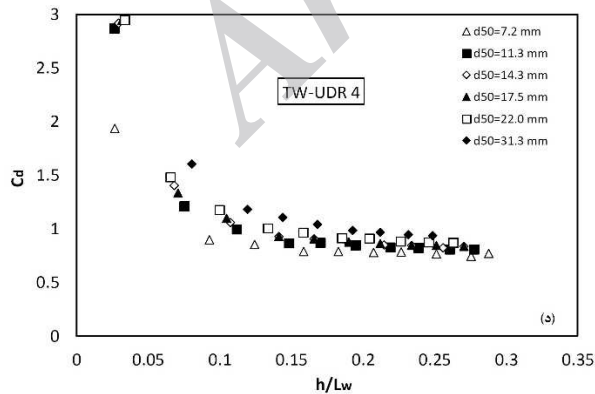
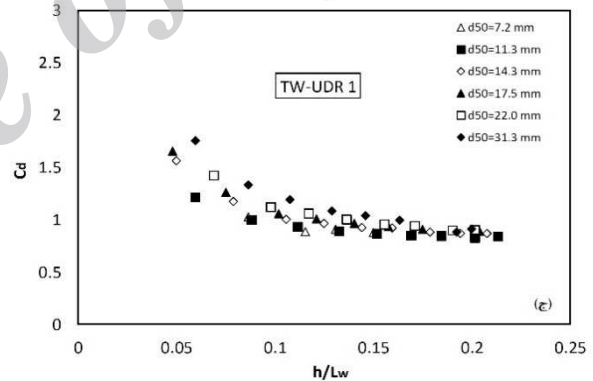
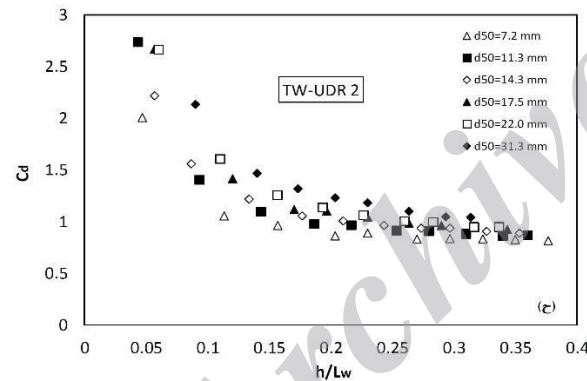
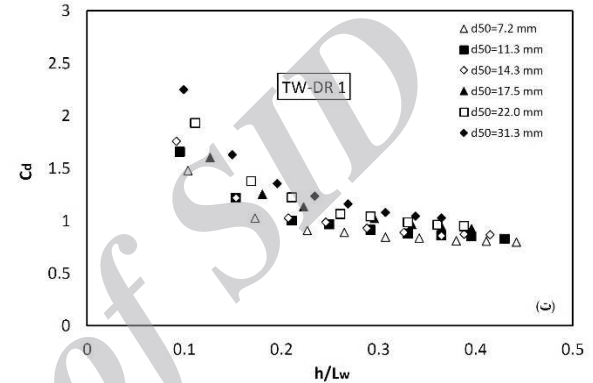
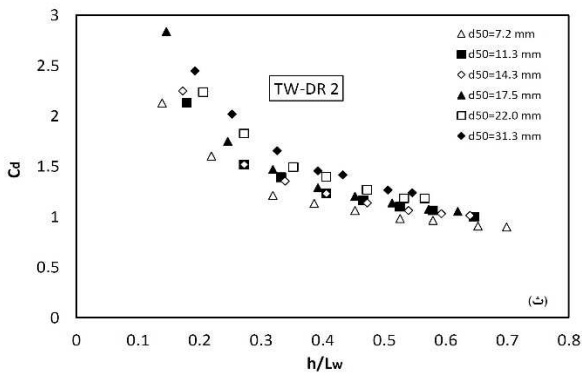
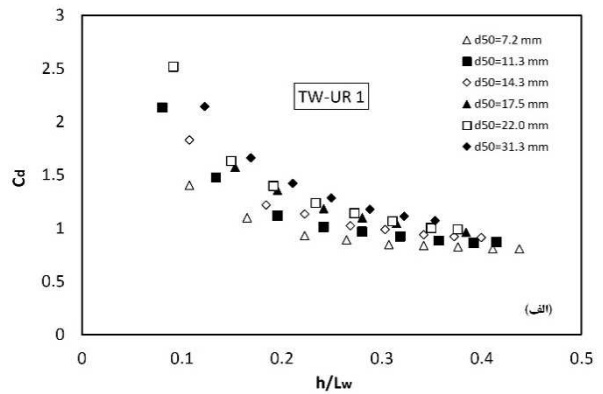
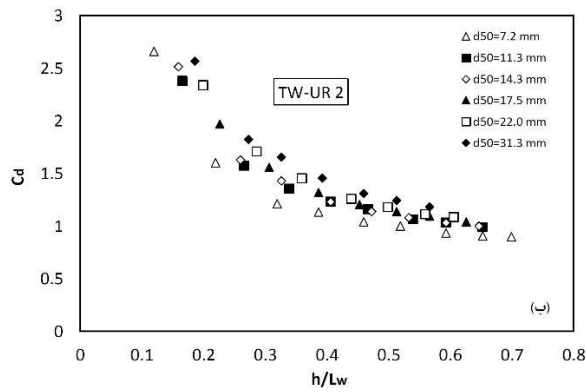
ضریب بده در نمونه‌های تورسنگی با افزایش نسبت  $h/L_w$  در ابتدا با نرخ زیادی کاهش یافته، سپس با افزایش بده ی جریان با توجه به این‌که نسبت بده ی جریان روگذر و جریان عبوری از داخل سرریز افزایش می‌یابد، ضریب بده با نرخ کمتری کاهش یافته، و در مصالح با دانه‌بندی مختلف به هم نزدیک می‌شود.

جهت بررسی اثر تغییر شیب بالادست، پایین‌دست و ترکیب بالادست و پایین‌دست بر ضریب بده، نتایج با رسم نمودارهای شکل (۷) نمایش داده شده‌اند. در این شکلها تغییرات ضریب بده ی ( $C_D$ ) محاسبه گردیده نسبت به

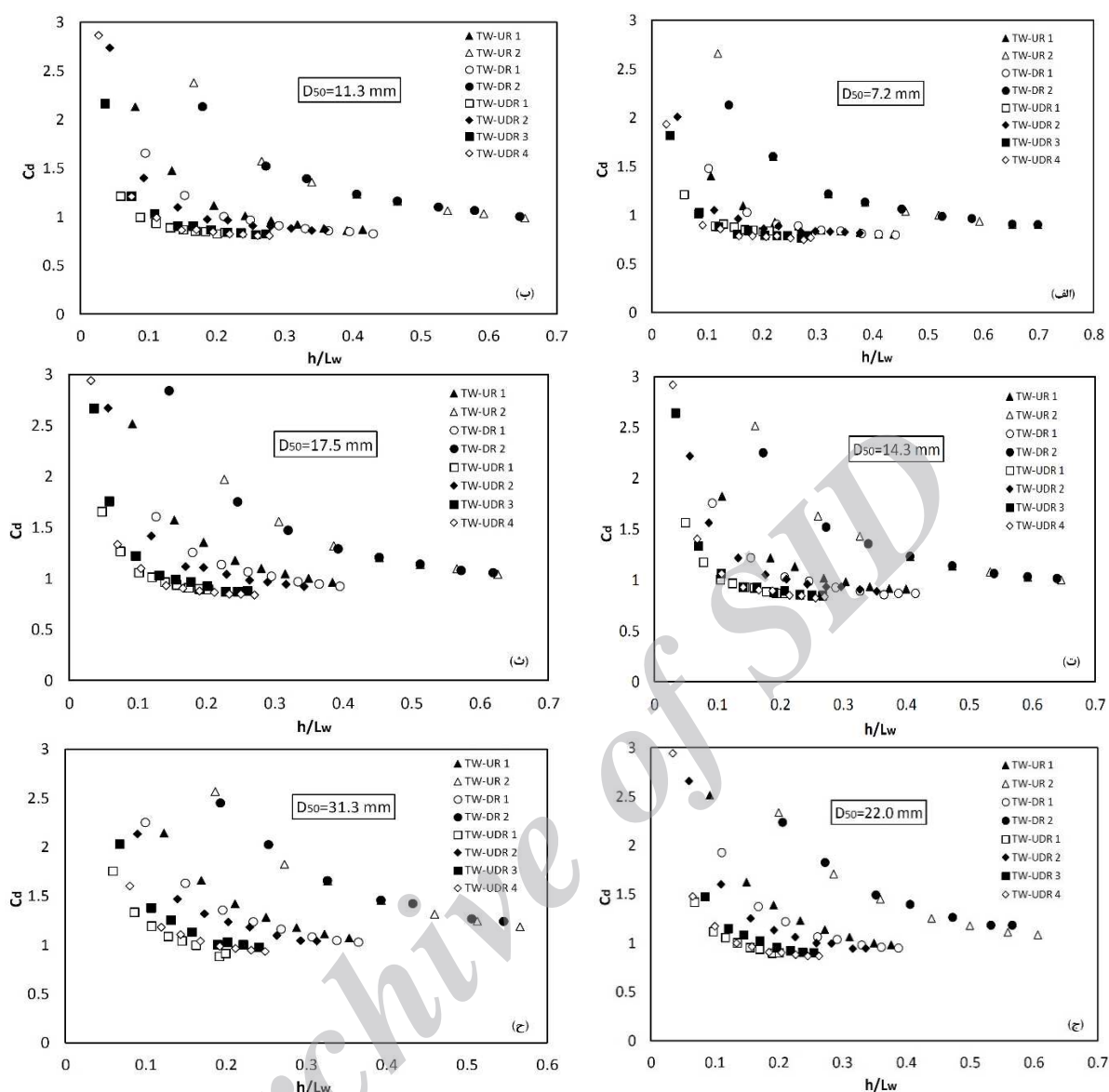
نمودارهای شکل (۶) نمایش داده شده‌اند. نمودارهای شکل (۶) تغییرات ضریب بده ( $C_D$ ) محاسبه شده از رابطه ی (۴) را با نسبت  $h/L_w$  در نمونه‌های تورسنگی و در  $d_{50}$  (اندازه ی متوسط مصالح سنگی) مختلف و نمونه‌های نفوذناپذیر نشان می‌دهند. نتایج بر آنند که در تمامی نمونه‌های تورسنگی، ضریب بده همواره بیشتر از ضریب بده ی نمونه‌های نفوذناپذیر بوده، و با افزایش اندازه ی مصالح ضریب بده افزایش می‌یابد. افزایش ضریب بده در مصالح درشت‌دانه می‌تواند ناشی از کاهش افت گذر جریان از بین مصالح و بزرگ شدن لوله‌های جریان درون سرریز تورسنگی باشد. همچنین، بطور کلی،

نشان داده شده اند. نتایج نشان می

در نمونه های تورسنگی مختلف و در  $d_{50}$  یکسان



شکل ۶- تغییرات ضریب بده با نسبت  $h/Lw$  در نمونه های مختلف هندسی.



شکل ۷- تغییرات ضریب بده با نسبت  $h/L_w$  در اندازه‌های مختلف مصالح.

بده افزایش می‌یابد. همچنین، با مقایسه ی ضریب بده در سه نمونه ی  $TW-UDR 2$ ،  $TW-UDR 3$  و  $TW-DR 2$  که دارای زاویه ی پایین‌دست برابر با ۴۵ درجه و زاویه ی بالادست به ترتیب ۶۰، ۴۵ و صفر درجه می‌باشند، مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن زاویه ی پایین‌دست و کاهش زاویه ی بالادست به صفر، ضریب بده افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش زاویه ی بالادست و پایین‌دست، طول مسیر گذر جریان بیشتر شده و در نتیجه جریان گذری از سرریز کاهش می‌یابد.

دهند که دو نمونه ی  $TW-UR 2$  و  $TW-DR 2$  دارای بیشترین ضریب بده، و نمونه ی  $TW-UDR 4$  دارای کمترین ضریب بده می‌باشند. با مقایسه ی ضریب بده در سه نمونه ی  $TW-UDR 2$ ،  $TW-UDR 4$  و  $TW-UR 2$  که دارای زاویه ی بالادست برابر با ۴۵ درجه و زاویه ی پایین‌دست به ترتیب ۶۰، ۴۵ و صفر درجه می‌باشند، مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن زاویه ی بالادست و کاهش زاویه ی پایین‌دست به صفر، ضریب



جهت بررسی اثر تغییر اندازه‌ی مصالح بر بار آبی روی سرریز، در شکل (۱۰) نیمرخ سطح آب در دو نمونه‌ی TW-UDR 2 و STU-UDR برای بده‌ی ۳۰ لیتر بر ثانیه و مصالح با دانه‌بندی مختلف نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین بار آبی مربوط به مصالح با اندازه‌ی ۷/۲ میلی‌متر، و کمترین بار آبی مربوط به مصالح با اندازه‌ی ۳۱/۳ میلی‌متر می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش اندازه‌ی مصالح بار آبی روی سرریز کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با مقایسه‌ی نیمرخ سطح آب در دو نمونه‌ی TW-UDR 2 بار آبی روی سرریز نفوذناپذیر بیشتر از سرریز گابیونی می‌باشد. بطور کلی، ماهیت جریان روی سرریز تورسنگی با جریان روی سرریز نفوذناپذیر متفاوت است، چون بخشی از جریان از رو، و بخشی از درون سرریز عبور می‌کند.

جهت بررسی اثر تغییر شیب بالادست، پایین‌دست، و ترکیب بالادست و پایین‌دست بر بار آبی روی سرریز، نتایج با رسم نمودارهای شکل (۱۱) نمایش داده شده‌اند. نمودارهای شکل (۱۱) نیمرخ سطح آب را در همه نمونه‌های تورسنگی برای مصالح با اندازه‌های ۱۱/۳ و ۳۱/۳ میلی‌متر، و در بده‌ی ۳۰ لیتر بر ثانیه، نمایش می‌دهند. مطابق شکل دو نمونه‌ی TW-UR 2 و TW-DR 2 دارای کمترین بار آبی، و نمونه‌ی TW-UDR-1 دارای بیشترین بار آبی می‌باشند. با مقایسه‌ی نیمرخ سطح آب در سه نمونه‌ی TW-UDR 4، TW-UDR 2 و TW-UR 2 که دارای زاویه‌ی بالادست برابر با ۴۵ درجه، و زاویه‌ی پایین‌دست به ترتیب ۶۰، ۴۵ و صفر درجه می‌باشند، مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن زاویه‌ی بالادست و افزایش زاویه‌ی پایین‌دست، بار آبی روی سرریز افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه‌ی نیمرخ سطح آب در سه نمونه‌ی TW-UDR 3، TW-UDR 2 و TW-DR 2 که دارای زاویه‌ی پایین‌دست برابر با ۴۵ درجه، و زاویه‌ی بالادست به ترتیب ۶۰، ۴۵ و صفر درجه می‌باشند، مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن زاویه‌ی پایین‌دست و افزایش زاویه‌ی بالادست، بار آبی روی سرریز افزایش می‌یابد.

### (ب) استخراج رابطه‌ی پیش‌بینی ضریب بده

در ادامه با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته به منظور بررسی اثر متقابل فراسنجهای بی‌بعد مؤثر استخراج گردیده بر روی مقدار ضریب بده و ارائه‌ی یک رابطه‌ی ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از وایازی غیرخطی استفاده شده است و در نهایت، روابط (۵) تا (۹) پس از تحلیلهای متعدد استخراج گردید. در این روابط، به صورت گام به گام، ضریب بده در ابتدا نسبت به فراسنج بدون بعد  $h/Lw$  مورد بررسی قرار گرفته، و شکل کلی رابطه‌ی (۵) برای آنها دارای همبستگی بالاتری می‌باشد. در ادامه، ضرایب این رابطه تابعی از دیگر فراسنجهای بدون بعد مستقل تعریف شده است (رابطه‌ی (۶)) سپس ضرایب ثابت این رابطه ابتدا نسبت به فراسنج بدون بعد  $dm/P$  که معرف اندازه مصالح پرکننده تورسنگ، است دسته بندی شده (رابطه‌ی (۷))، در نهایت رابطه برای شبیه‌های مختلف دو طرف سرریز تحلیل شده (رابطه‌ی (۸)) و مطابق شکل (۸) (الف) تا (د) برای نمونه‌های مختلف ضرایب ثابت استخراج گردید. در این روابط  $g, f, \phi, \Gamma$  و  $\Psi$  نماد توابع می‌باشند.

$$C_d = e^{(a_0 + a_1/(h/L_w))} \quad (5)$$

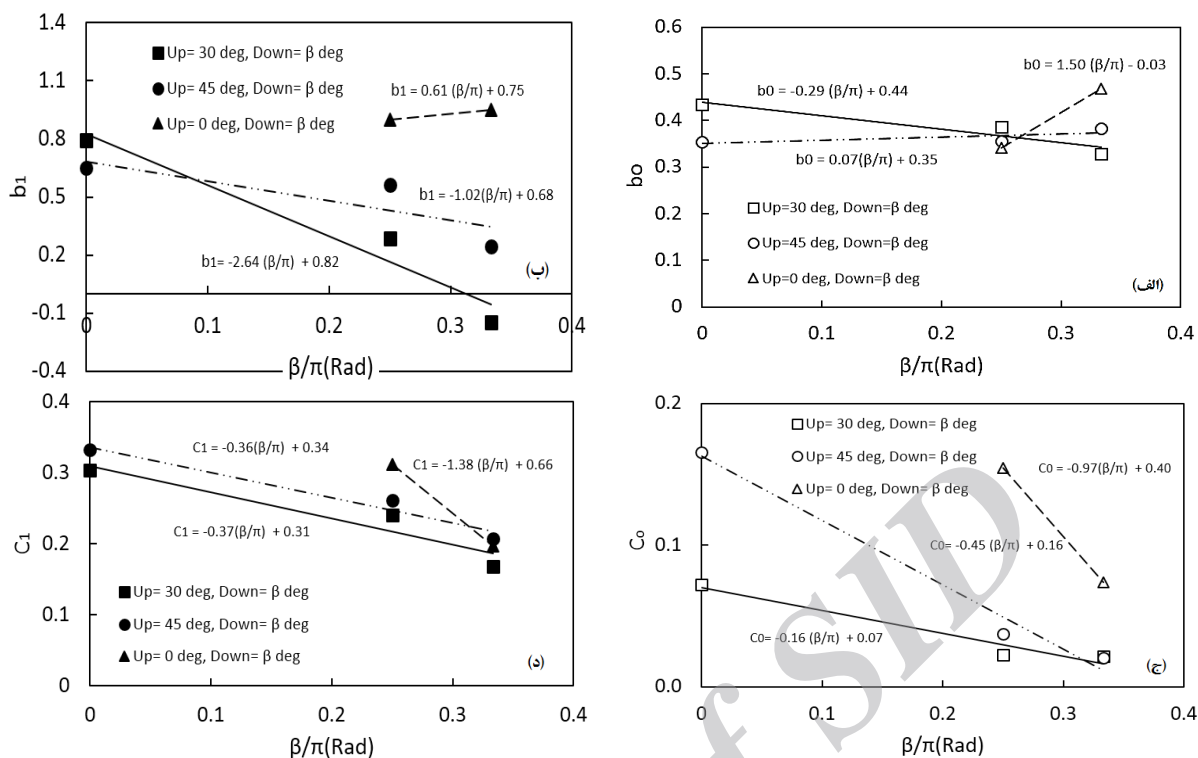
$$\begin{cases} a_0 = f(d_m/P, \alpha, \beta) \\ a_1 = g(d_m/P, \alpha, \beta) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_0 = b_0 - b_1(d_m/P) \\ a_1 = c_0 + c_1(d_m/P) \end{cases} \quad (7)$$

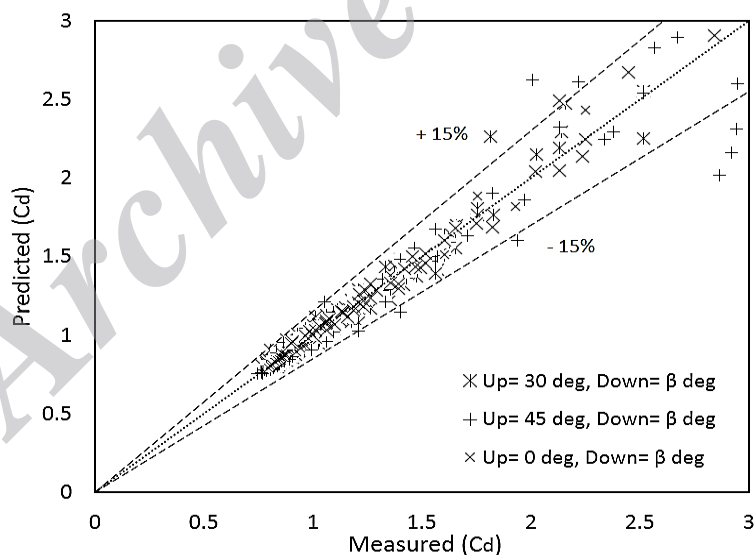
$$\begin{cases} b_0 = \phi(\alpha, \beta) \\ b_1 = \zeta(\alpha, \beta) \end{cases} \text{ and } \begin{cases} c_0 = \Gamma(\alpha, \beta) \\ c_1 = \Psi(\alpha, \beta) \end{cases} \quad (8)$$

در شکل ۹ مقادیر ضریب بده‌ی محاسبه گردیده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار ضریب بده‌ی محاسبه شده از رابطه‌ی (۵) (محور قائم) مقایسه شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که همبستگی مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی با استفاده از روشهای آماری ۹۷ درصد، و در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد.

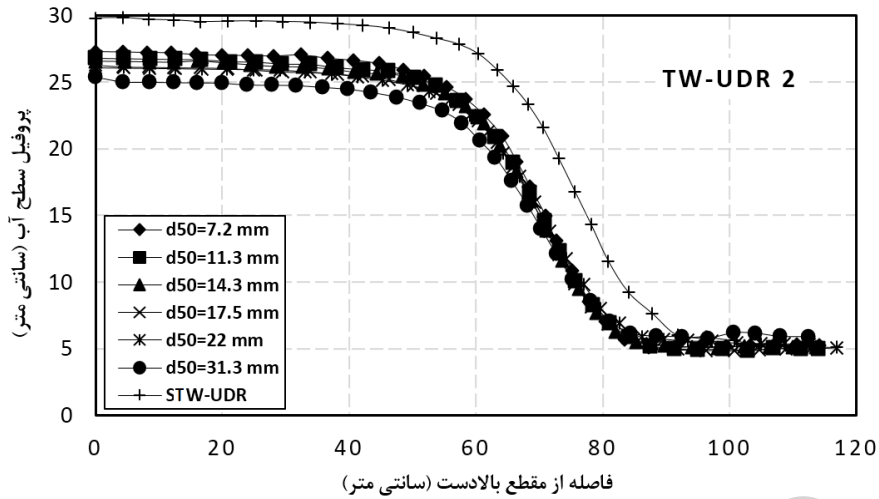
### (ج) بررسی تغییرات بار آبی روی سرریز



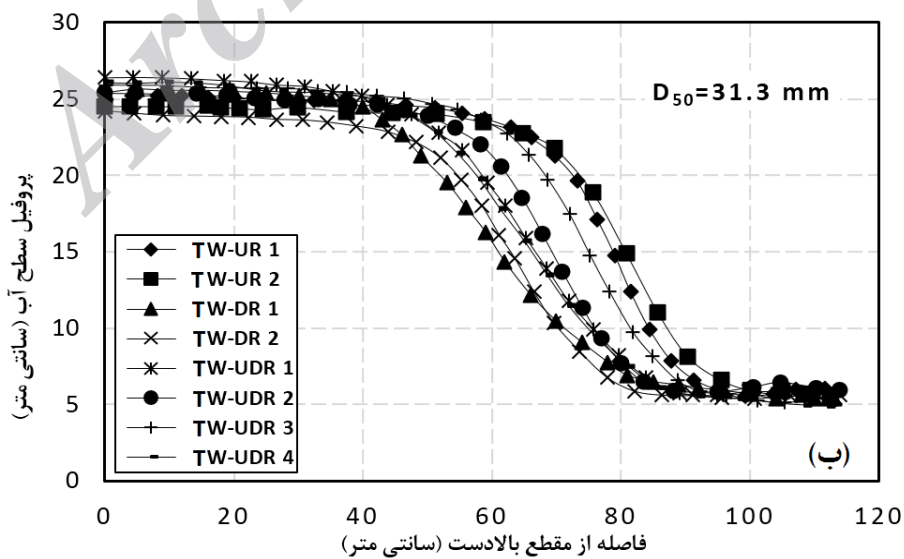
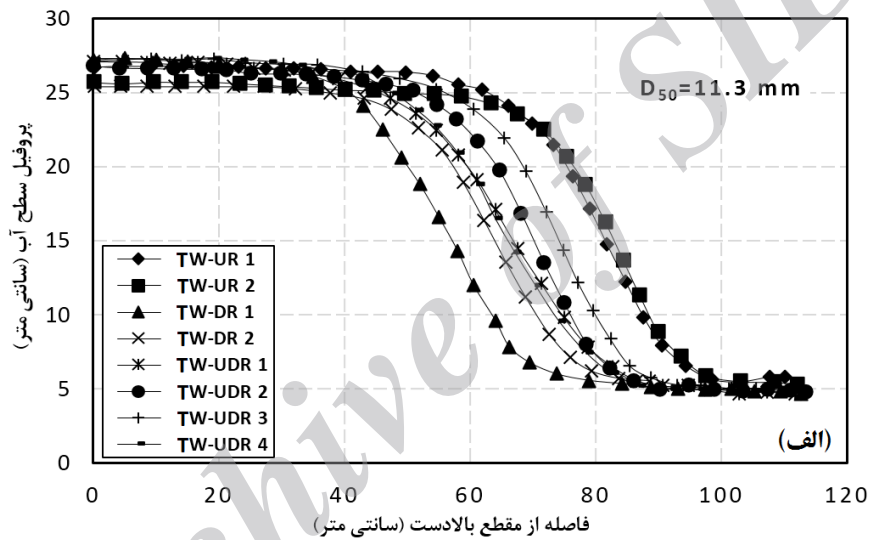
شکل ۸- تغییرات ضرایب ثابت رابطه ی  $\gamma$  در زوایای ثابت بالادست و متغیر پایین دست.



شکل ۹- مقایسه ی ضرایب بده ی اندازه گیری و محاسبه شده از رابطه ی (۵).



شکل ۱۰- نیمرخ سطح آب در دو نمونه‌ی TW-UDR 2 در مصالح با دانه‌بندی مختلف و STU-UDR.



شکل ۱۱- نیمرخ سطح آب در همه نمونه‌های تورسنگی برای مصالح با اندازه‌های (الف) ۱۱/۳ و (ب) ۳۱/۳ میلی‌متر.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد آبی سرریز شیب دار تورسنگی در نمونه‌های مختلف هندسی و آبی پرداخته شده است. در مقایسه‌ی نمونه‌های تورسنگی با نمونه‌های نفوذناپذیر شاهد، ضریب بده‌ی نمونه‌های تورسنگی همواره بیشتر از ضریب بده‌ی نمونه‌های نفوذناپذیر است. در نمونه‌های تورسنگی با افزایش اندازه‌ی مصالح، ضریب بده افزایش یافته، و با افزایش نسبت  $h/LW$  کاهش می‌یابد، این در حالی است که در نمونه‌های نفوذناپذیر ضریب بده با افزایش نسبت  $h/LW$  روندی افزایشی دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با افزایش زاویه‌ی پایین دست و بالادست سرریز با راستای عمود، ضریب بده کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش بده‌ی جریان ضرایب بده در مصالح با اندازه‌ی مختلف و حتی نمونه‌ی شاهد به هم نزدیک می‌شوند. بررسی نیمرخ سطح آب نشان داد با افزایش اندازه‌ی مصالح بار آبی روی سرریز کاهش یافته و برای بده‌ی یکسان بار آبی روی سرریز تورسنگی کمتر از سرریز نفوذناپذیر است. افزایش زاویه‌ی بالادست و پایین دست سرریز با راستای عمود باعث افت بیشتر سرریز شده، و بار آبی روی سرریز افزایش می‌یابد. علاوه بر نتایج فوق، در این تحقیق با استفاده از واپازی غیرخطی، رابطه‌ای با همبستگی ۹۷ درصد جهت محاسبه میزان ضریب بده‌ی سرریز شیب دار تورسنگی ارائه شده است.

## منابع

- 5) Hager, W. H., and Schwalt, M. 1994. Broad-crested weir. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120: 13–26.
  - 6) Kells, J. A. 1993. Spatially varied flow over rock fill embankments. *Can. J. Civ. Eng.* 20: 820–827.
  - 7) Kells, J. A. 1994. Reply on discussion of spatially varied flow over rock fill embankments. *Can. J. Civ. Eng.* 21: 163–166.
  - 8) Lux, F., and Hinchliff, D.L. 1985. Design and Construction of Labyrinth Spillways. 15<sup>th</sup> ICOLD. Conference, Lausanne.
  - 9) Leu, J. M., Chan, H. C., and Chu, M. S. 2008. Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Meas. Instrum.*, 19: 1–7.
  - 10) Li, B., and Garga, V. K. 1998. Theoretical solution for seepage flow in overtopped rock fill. *J. Hydraul. Eng.* 124: 213–217.
  - 11) Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T., and Haneda, M. 2005. Discharge through a permeable rubble mound weir. *J. Hydr. Eng.* 131: 1–10.
  - 12) Michioku, K., Takehara, K., and Etoh, T. 2007. An experimental study on flow field in and around rubble mound river structures. *J. Hydr. Eng.* 25: 37–45.
  - 13) Mohamed, H.I. 2010. Flow over gabion weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136: 573–577.
  - 14) Sargison, J. E., and Percy, A. 2009. Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. *J. Irrig. Drain.*, 135: 115–118.
- 1) قمشی، م. امامقلی زاده، ص. ۱۳۸۷. مکانیک سیالات و هیدرولیک، چاپ اول، دانشگاه شهید چمران اهواز.
  - 2) Ansar, M., and Gonzalez-Castro, J. A. 2003. Submerged weir flow at prototype gated spillways. *Proc., World Water Congress, ASCE, Reston, Va.*
  - 3) Chanson, H. 2006. Discussion of discharge through a permeable rubble mound weir. *J. Hydraulic. Eng.* 132: 432–434.
  - 4) Göğüş, M., Defne, Z., and Özkandemir, V. 2006. Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. *J. Irrig. Drain.*, 132: 272–280.