

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر دیواره جانبی بر ابعاد گودال آبستگی در پایین دست کالورت\*

سید محمدعلی زمردیان<sup>(۱)</sup> حمیده غفاری<sup>(۲)</sup> فاطمه ساداتی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** آبستگی موضعی در خروجی کالورت پدیده‌ای متداول است؛ لذا ارائه راهکارهای مقابله با این پدیده مخرب ضروری می‌باشد. در مطالعه حاضر تأثیر دیواره جانبی پایین دست کالورت بر ابعاد گودال آبستگی موضعی با در نظر گرفتن دیواره‌هایی با زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به خط مرکزی جریان، در دو تیپ هیدرولیکی ۱ و ۴ و در دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از دیواره با زاویه ۱۵ درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبستگی و همچنین ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین دست می‌شود که میزان کاهش عمق آبستگی در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ هیدرولیکی به میزان ۳۵/۳٪ نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین دیواره با زاویه ۳۰ درجه در مقطع مستطیلی با تیپ ۱، با کاهش ۴۶٪ آبستگی عملکرد خوبی را نشان داده است. دیواره‌های جانبی با زاویه ۶۰ و ۷۵ درجه، عملکرد مناسبی در کاهش آبستگی نشان ندادند. همچنین در تیپ ۱، دیواره در همه زوایا باعث کاهش عمق آبستگی شد؛ اما در تیپ ۴ فقط در زاویه ۱۵ درجه عمق آبستگی به میزان ۳۰٪ در مقطع دایره‌ای و ۱۰٪ در مقطع مستطیلی کاهش پیدا کرد. همچنین ابعاد گودال آبستگی در پایین دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد؛ به گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱ هیدرولیکی، عمق آبستگی به میزان ۳۵٪ نسبت به مستطیلی افزایش داشته است که این در تیپ ۴ هیدرولیکی به میزان ۹۵٪ مشاهده شد. همچنین ابعاد گودال آبستگی در تیپ ۱ نسبت به تیپ ۴ در همه زوایا بیشتر می‌باشد. و این در حالی است که ارتفاع رسوب‌گذاری در تیپ ۴ نسبت به تیپ ۱ بیشتر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** آبستگی موضعی، تیپ هیدرولیکی، زاویه دیواره جانبی.

## Experimental Investigation on the Effect of Wing Walls on Scour Hole's Dimensions Downstream of Culvert

S. M. Ali Zomorodian

H. Ghaffari

F. Sadati

### Abstract

Local scour at the culvert outlet is common event. In this study the effect of different angles of wing walls flare on scour in hydraulic conditions for type 1 and 4 flows at downstream of circular and box culvert investigated. Wing walls flare 15, 30, 45, 60 and 75- degrees to the outlet centerline were considered in this study. Result showed 15- degree flare wing walls reduced scour depth, scour length and mound height. So, 15- degree flare wing wall in box culvert and type1 flow reduced scour equal 35.3% to the control test. Also, 30- degree flare wing walls in box culvert and type1 flow has shown a good performance in reducing scour depth equal 46%. Wing walls flare angle 60 and 75- degree, did not have good performance in reducing scour depth at downstream of culverts. In type 1 flow, scour can be reduced by using of wing walls with any angles. In type4 flow, only 15- degree wing walls flare reduced maximum scour depth equal 30% in circular culvert and 10% in box culvert. Also, the dimensions of the scour hole on downstream of the circular culvert is more than box culvert. So, in the circular culvert and type 1, scour depth increased equal 35% compared to box culvert and it was observed equal 95% in type-4 flow. The dimensions of the scour hole in type 1 flow is higher than type 4 at all angles, while the mound height in type 4 is higher than type 1 flow.

**Key word** Local scour, Hydraulic type, Wing Walls flare

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۱۹ تاریخ پذیرش آن ۹۷/۵/۶ می‌باشد.

Email: mzmorod@shirazu.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

(۲) کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز.

(۳) کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز.

## مقدمه

کالورت یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی است که به منظور انتقال جریان آب از زیر خاکریز جاده، بزرگراه، راه‌آهن و غیره به کار می‌رود و نقش مؤثری در عبور جریان هنگام سیلاب دارد؛ بنابراین می‌توان گفت که کالورت‌ها ساختمان‌هایی حفاظتی هستند که هنگام عبور سیلاب و یا هرگونه جریان کنترل‌نشده، از کانال‌ها و سازه‌های وابسته و همچنین خاکریزها حفاظت می‌کنند. در همین راستا طراحی و اجرای دقیق آنها و مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از آنها ضروری به نظر می‌رسد و نقش مؤثری در طول عمر سازه دارد. آبشستگی موضعی در خروجی کالورت پدیده‌ای متداول است و از عوامل تهدیدکننده پایداری آن می‌باشد که در صورت عدم کنترل و مهار آن، پتانسیل خرابی تمامیت سازه زیربنایی آن را دارد و خسارت زیادی را به همراه می‌آورد. در خروجی کالورت به دلیل سرعت زیاد، جریان معمولاً به صورت جت افقی خارج می‌شود، به این صورت که خطوط جریان موازی با بستر می‌باشد. با برخورد جریان خروجی از کالورت به سطح آب پایاب و تغییرات سرعت، الگوی خطوط جریان تغییر می‌کند و باعث افزایش تلاطم جریان و ایجاد جریان‌های ثانویه به شکل گرداب (Eddy) در این ناحیه می‌شود که باعث جدا شدن و انتقال ذرات بستر به پایین‌دست و در نتیجه تشکیل گودال آبشستگی در خروجی کالورت می‌شود. رسوبات حمل‌شده در پایین‌دست تجمع پیدا می‌کنند و یک برآمدگی را تشکیل می‌دهند. با گذشت زمان انرژی گرداب‌ها توسط حجم آب درون گودال مستهلک می‌شود و گودال آبشستگی به تعادل می‌رسد. با مرور زمان و تکرار جریان سیلاب عبوری از کالورت و در صورت عدم تمهیدات لازم در این ناحیه این‌گونه آبشستگی به سمت بالادست حرکت می‌کند و باعث شسته شدن زیر سازه می‌شود و پایداری آن را مختل می‌کند. بنابراین شبیه‌سازی این‌گونه

آبشستگی در شرایط مختلف ضرورت دارد تا براساس آن بتوان راهکارهای مناسبی برای کنترل آن ارائه داد و همچنین به مهندسان طراح در پیشگیری از مشکلات آتی کمک نمود. کالورت‌ها اگرچه از نظر اجرایی ساده هستند اما طرح هیدرولیکی آنها تا حدودی پیچیده می‌باشد و تابعی از عوامل مختلف است که به سادگی قابل تقسیم به جریان‌های تحت فشار یا آزاد نمی‌باشد بلکه در برخی موارد ترکیبی از این دو حالت می‌باشد [1]. بنابراین برآورد وضعیت آبشستگی در خروجی کالورت‌ها به دلیل تأثیر پارامترهای متعدد دشوار است. چو (۱۹۵۹) جریان درون کالورت را در ۶ تیپ هیدرولیکی دسته‌بندی کرده‌است که در شکل (۱) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است ارتفاع سراب، ارتفاع کالورت، عمق جریان درون مجرا، طول و شیب مجرا از عوامل تعیین‌کننده نوع جریان درون کالورت می‌باشد. در این شکل  $H_w$  ارتفاع آب بالادست و  $D$  ارتفاع کالورت است [2]. یو و لی (۲۰۱۲) بیان نمودند که طبقه‌بندی جریان در کالورت طبق سه مشخصه بیان می‌شود. مشخصه اول این است که ورودی کالورت مستغرق است یا خیر، که به وسیله سطح آب بالادست مشخص می‌شود. مشخصه دوم شامل ویژگی‌های جریان درون مجرا است و مشخصه سوم وضعیت جریان در پایین‌دست کالورت می‌باشد [3]. به منظور جلوگیری از آبشستگی در پایین‌دست کالورت از حوضچه‌های آرامش، پوشش بتنی و سنگچین استفاده می‌شود اما در مواردی به جهت کاهش هزینه احداث و یا در مواردی که کالورت در نواحی دورافتاده باشد و از تبدیل خاکی استفاده شده باشد خروجی آن حفاظت نمی‌شود بنابراین دچار فرسایش و آبشستگی می‌شود. محققان زیادی به مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر در آبشستگی در ناحیه پایین‌دست کالورت پرداخته‌اند از جمله زونبرگ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی آبشستگی در ناحیه خروجی کالورت‌ها بیان

را برای تخمین ابعاد آبشستگی ارائه دادند:

$$y = \frac{a}{\sigma^{0.4}} \left[ \left( \frac{Q}{g^{0.5} D^{2.5}} \right) \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{0.2} \right]^b \quad (1)$$

در این رابطه متغیر  $y$  شامل  $L_s/R_H$ ،  $W_s/R_H$ ،  $y_s/R_H$  و  $V_s/R_H^3$  است و  $a$  و  $b$  مقادیری ثابت هستند.  $y_s$  ماکزیمم عمق آبشستگی،  $W_s$  ماکزیمم عرض آبشستگی،  $L_s$  ماکزیمم طول آبشستگی،  $V_s$  ماکزیمم حجم آبشستگی،  $\sigma$  انحراف معیار ذرات،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات می‌باشد [7].

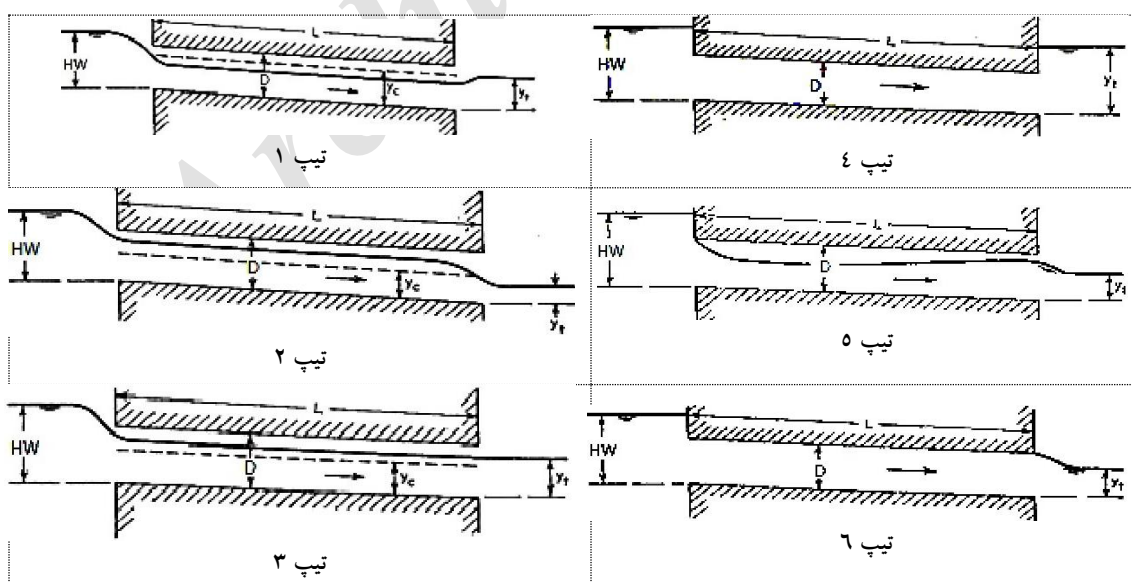
کروکستون و تولیس (۲۰۱۲) به بررسی عملکرد آبشستگی در کالورت با کف فرسایش‌پذیر در شرایط تحت فشار و آزاد پرداختند. آنها یک ضریب اطمینان برای ۸ نوع رسوب ارائه دادند و به این نتیجه رسیدند که زاویه‌دار بودن رسوبات درمقایسه با رسوبات گردگوشه، وسعت آبشستگی را کاهش می‌دهد [8].

علاوه بر پارامترهای ذکر شده که توسط محققان بررسی شده است زاویه دیواره جانبی کالورت نیز در میزان آبشستگی در پایین دست کالورت مؤثر می‌باشد که به آن کمتر توجه شده است. دیواره‌های جانبی در ورودی بالادست و همچنین در خروجی کالورت‌ها به عنوان بال هدایتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دیواره‌ها به منظور افزایش بازدهی جریان در کالورت، تدریجی نمودن جریان در ورودی و خروجی کالورت، کاهش افت جریان، کمک به پایداری سازه و همچنین حفاظت از خاکریز مجاور به کار برده می‌شوند. از دیگر دلایل استفاده از این نوع سازه، اتصال یکپارچه مجرا به سازه انرژی‌گیر پایین دست و یا کانال طبیعی می‌باشد. این دیواره‌ها اگر در ورودی کالورت‌های لوله‌ای به کار برده شوند تأثیری روی میزان ضریب دبی جریان عبوری نخواهند داشت اما در کالورت‌های جعبه‌ای مؤثر می‌باشند [1]. در استفاده از دیواره‌های جانبی باید دقت شود که این سازه نسبت به خط مرکزی جریان با زاویه‌ای به کار برده شود که علاوه

نمودند که سرعت خروجی شاخص اولیه برای تخمین پتانسیل فرسایش‌پذیری می‌باشد [4]. آیدا و تونسن (۱۹۹۱) با بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای با  $\epsilon$  سطح مقطع متفاوت و در  $\epsilon$  نوع رسوب با دانه‌بندی متفاوت نشان دادند که عمق آبشستگی عموماً با افزایش نسبت  $Q/(WD^{3/2})$  افزایش می‌یابد و علت آن را این‌گونه بیان نمودند که افزایش دبی منجر به افزایش سرعت جریان می‌شود و بنابراین قدرت آبشستگی افزایش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش عرض کالورت ( $W$ ) و کاهش نسبت  $B/W$ ، ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و دلیل آن را این‌گونه بیان نمودند که با افزایش عرض کالورت گرداب‌هایی که در مرزهای جانبی جت جریان در حال گسترش هستند عمدتاً از طریق برخورد با کناره کانال از بین می‌روند.  $B$  عرض کانال پایین دست و  $Q$  دبی عبوری از کالورت می‌باشد. آیدا و تونسن (۱۹۹۱) همچنین با بررسی تأثیر عمق پایاب ( $y_t$ ) بر میزان آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که در صورتی که  $y_t/D < 0.2$  باشد در این شرایط عمق پایاب کم است و عمق آبشستگی با کاهش عمق پایاب کاهش می‌یابد و اگر  $y_t/D > 1$  باشد عمق پایاب تأثیر غیرمستقیم بر عمق آبشستگی دارد [5]. ابت و همکاران (۱۹۸۷) با بررسی تأثیر شکل کالورت بر ابعاد آبشستگی در پایین دست کالورت با مقطع مربعی، مستطیلی و دایره‌ای، نسبت‌های بی‌بعد ابعاد حفرة آبشستگی را به شدت جریان  $D.I^* = Q/A (g R_H)^{0.5}$  ارتباط دادند و به این نتیجه رسیدند که شکل کالورت به‌طور قابل توجهی هندسه آبشستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به‌گونه‌ای که ابعاد آبشستگی در هر سه مقطع متفاوت می‌باشد. در این رابطه،  $A$  سطح مقطع کالورت،  $R_H$  شعاع هیدرولیکی جریان و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد [6]. ابت و همکاران (۱۹۸۴) با بررسی تأثیر اندازه رسوبات بر پارامترهای آبشستگی در پایین دست کالورت رابطه زیر

مشاهده می‌شود. بنابراین باتوجه به پیچیده بودن هیدرولیک جریان در کالورت و امکان ایجاد شرایط هیدرولیکی مختلف و به تبع آن تأثیر داشتن زاویه دیواره جانبی در الگوی جریان و مکانیسم آبستگی در خروجی کالورت، تأثیر هم‌زمان این دو پارامتر بر میزان آبستگی نیازمند بررسی می‌باشد. همچنین باتوجه به هزینه بالای اجرا و ساخت پوشش حفاظ و همچنین حوضچه‌های آرامش در پایین دست این‌گونه سازه‌ها به منظور کنترل آبستگی، تخمین ماکزیمم عمق و طول آبستگی و همچنین الگوی رسوب گذاری در این نواحی به منظور حداقل کردن هزینه‌ها ضروری می‌باشد اما تاکنون پژوهشی که به طور خاص به بررسی این پارامترها پرداخته باشد صورت نگرفته است. در این پژوهش سعی شده است با به کارگیری تیپ ۱ و ۴ هیدرولیکی در طبقه بندی چو (۱۹۵۹)، تأثیر زوایای دیواره جانبی در پایین دست کالورت با دو مقطع دایره‌ای و مستطیلی در کاهش پارامترهای آبستگی بررسی شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

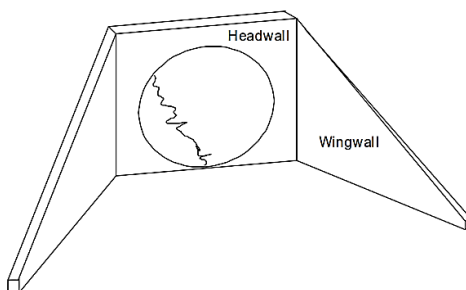
بر اهداف ذکر شده کمترین آشفستگی و جدایی جریان در پایین دست کالورت ایجاد نماید و جریان با توزیع یکنواخت تری به سمت پایین دست گسترش یابد. اگر دیواره جانبی در خروجی کالورت منطبق بر خطوط جریان (Stream Line) باشد آبستگی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و گرداب‌های (Vortex Shedding) ناشی از تغییرات ناگهانی در گرادیان فشار رفع می‌شوند، به عبارت دیگر دیواره منطبق بر خطوط جریان از جداسازی جریان جلوگیری می‌کند و به این ترتیب باعث کاهش آشفستگی جریان می‌شود [9]. ضرایب افت برای انواع زاویه دیواره جانبی ورودی در جدول (۱) آورده شده است. دیواره‌های جانبی زاویه دار بسیار کارآمدتر از دیواره‌های جانبی موازی هستند و استفاده از حداقل زاویه عملی دیواره جانبی این مزیت را دارد که منطقه مورد نیاز برای حفاظت در برابر آبستگی را کاهش دهد [10]. به منظور عملکرد بهتر دیواره‌های جانبی باید موازی یا عمود بر خط مرکزی جریان نباشند و از لحاظ هندسی باید مشابه باشند [11]. تصویری از دیواره جانبی همراه با دیواره پیشانی در شکل (۲)



شکل ۱ انواع مختلف تیپ‌های هیدرولیکی درون کالورت [2]

جدول ۱ ضریب افت برای انواع دیواره جانبی ورودی [10]

ضریب افت	نوع دیواره جانبی
۰/۴	دیواره با زاویه ۳۰ تا ۷۵ درجه
۰/۲	تاج لبه تیز
۰/۲	تاج لبه گرد
۰/۵	دیواره با زاویه ۱۰ تا ۲۵ درجه
۰/۵	تاج لبه تیز
۰/۵	بدون دیواره جانبی
۰/۷	دیواره جانبی صفر درجه تاج لبه تیز



شکل ۲ نمایی از دیواره جانبی و دیوار پیشانی در خروجی کالورت

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی شیشه‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز انجام شد. فلوم دارای ابعادی به طول ۱۶ متر، عرض ۷۰ سانتی‌متر و شیب طولی ۰/۰۰۲۷ می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده‌است. مدل آزمایشگاهی کالورت در دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای و از جنس پلکسی‌گلاس انتخاب شد. مدل با مقطع مستطیلی دارای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر، طول ۱۸۰ سانتی‌متر و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. مدل با مقطع دایره‌ای دارای قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۱۸۰ سانتی‌متر، در دبی ۶ لیتر بر ثانیه بررسی شد. دیواره‌های جانبی و دیواره پیشانی از جنس ورق گالوانیزه انتخاب شدند که زاویه نصب دیواره‌های جانبی در بالادست ثابت و برابر ۳۰ درجه به منظور کاهش افت ورودی انتخاب شد و در خروجی از ۵ زاویه متغیر

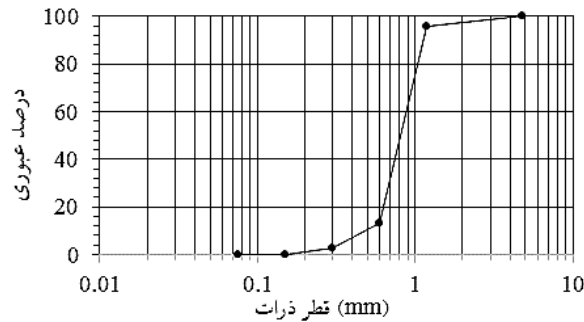
۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به خط مرکزی جریان به صورت متقارن و مشابه استفاده شد. دیواره پیشانی نیز به صورت عمود بر مقطع کالورت نصب داده شد. مدل کالورت با شیب ۰/۰۰۵ و در فاصله ۸ متری از بالادست داخل فلوم آزمایشگاهی قرار داده شد. به منظور فراهم آوردن ضخامت لازم برای رسوب‌ریزی، کالورت به اندازه ۲۰ سانتی‌متر از کف فلوم بالا آورده شد و بستری مصنوعی با قرار دادن صفحاتی در بالادست و پایین دست در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ایجاد شد و بلافاصله در خروجی کالورت به طول ۲ متر، عمق ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۷۰ سانتی‌متر رسوبات ماسه‌ای ریخته شد. عمق رسوبات با توجه به مطالعات آبی‌دانه و همکاران (۱۹۹۱) در نظر گرفته شد. از رسوبات ماسه به قطر متوسط  $d_{50} = 0.78 \text{ mm}$  و چگالی  $G_s = 2.63$  استفاده شد که براساس منحنی دانه‌بندی که در شکل (۴) نشان داده شده‌است انحراف

زمان آزمایش ۵ ساعت به دست آمد. با توجه به این که تیپ‌های هیدرولیکی مختلفی درون کالورت اتفاق می‌افتد در ابتدا آزمایش‌هایی صورت گرفت تا مشخص شود که امکان ایجاد کدام یک از تیپ‌ها در شرایط آزمایشگاه وجود دارد. بنابراین در دبی ثابت، ایجاد دو تیپ ۱ و ۴ هیدرولیکی فراهم شد. بنابراین تأثیر تیپ‌های هیدرولیکی ۱ و ۴ همراه با زوایای مختلف دیواره جانبی در دو کالورت با مقطع مستطیلی و دایره‌ای به عنوان متغیرهای آزمایش بر آبشستگی بررسی گردید. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دبی به مقدار کم برقرار می‌شد تا شکل رسوبات به هم نریزد. پس از آن که عمق جریان افزایش می‌یافت مقدار دبی تا مقدار مورد نظر اضافه می‌شد. با تنظیم سرریز انتهایی عمق آب مورد نظر در ورودی و خروجی کالورت برقرار می‌شد. لازم به ذکر است که در تیپ ۴ هیدرولیکی استغراق دهانه خروجی منبای اندازه‌گیری بود و تمامی آزمایش‌ها در کالورت مستطیلی با استغراق دهانه خروجی ۱/۳۳ سانتی‌متر و در کالورت دایره‌ای با استغراق دهانه خروجی ۱/۲ سانتی‌متر انجام پذیرفت. در تیپ ۱ هیدرولیکی عمق پایاب ملاک قرار داده شد. در پایان هر آزمایش پروفیل گودال آبشستگی و همچنین میزان رسوب‌گذاری با استفاده از دستگاه زبری-سنج با دقت ۱ میلی‌متر برداشت می‌شد.

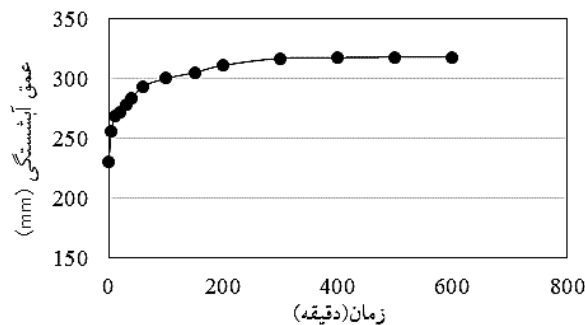
معیار ذرات  $\sigma = 1.25$  می‌باشد که نشانگر یکنواخت بودن دانه‌بندی ماسه مطابق با معیار شفاعی بجمستان (۱۳۹۰) می‌باشد که بیان نمودند در صورتی که انحراف معیار ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد رسوبات دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد [12]. بنابراین دانه‌بندی ماسه به گونه‌ای است که ماکزیمم آبشستگی در آن ایجاد می‌شود. سیستم تأمین آب به صورت گردش بود که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای مدت طولانی فراهم می‌کرد. به منظور آرام کردن جریان ورودی، در ابتدای فلوم، مخزنی وجود داشت که با باز کردن شیر ورودی آب وارد آن می‌شد و سپس وارد فلوم می‌گردید و پس از توسعه یافتگی در فاصله ۸ متر بالادست وارد کالورت می‌شد. به منظور تنظیم عمق جریان از یک سرریز استفاده شد که در انتهای فلوم قرار داشت و برای کنترل دبی از یک دبی‌سنج خودکار الکتریکی با دقت ۰/۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. برای به دست آوردن زمان آزمایش‌ها از معیار کومار و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شد که مدت زمانی که پس از آن در یک بازه سه‌ساعته تغییرات عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر باشد به عنوان زمان تعادل معرفی کردند [13]. بنابراین آزمایشی بدون محدودیت زمانی و در شرایط هیدرولیکی آزمایش، در کالورت بدون دیواره جانبی (تست شاهد) انجام گرفت و با ثبت تغییرات آبشستگی در برابر زمان که در شکل (۵) نشان داده شده است مدت



شکل ۳. نمایی از فلوم استفاده شده



شکل ۴ منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده



شکل ۵ منحنی زمان تعادل

همچنین نوع سازه انرژی‌گیر پایین‌دست ضروری می‌باشد. در ادامه به بررسی تأثیر زوایای دیواره جانبی بر طول و عمق آبشستگی و همچنین بر ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین‌دست گودال آبشستگی پرداخته شده‌است.

**بررسی ماکزیمم عمق گودال آبشستگی.** ماکزیمم عمق آبشستگی در هر دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی در زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه در شکل (۶) نشان داده شده‌است و با میزان آبشستگی در حالت بدون دیواره جانبی (زاویه ۹۰ درجه) مقایسه شده‌است. با مقایسه میزان آبشستگی به دست آمده در دو مقطع دایره‌ای و مقطع مستطیلی در حالت بدون دیواره جانبی (تست شاهد) مشاهده می‌شود که در کالورت با مقطع دایره‌ای میزان آبشستگی بیشتری حاصل شده‌است. میزان آبشستگی ارتباط مستقیم با سرعت جریان در خروجی کالورت دارد که این در مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع

## بحث و نتایج

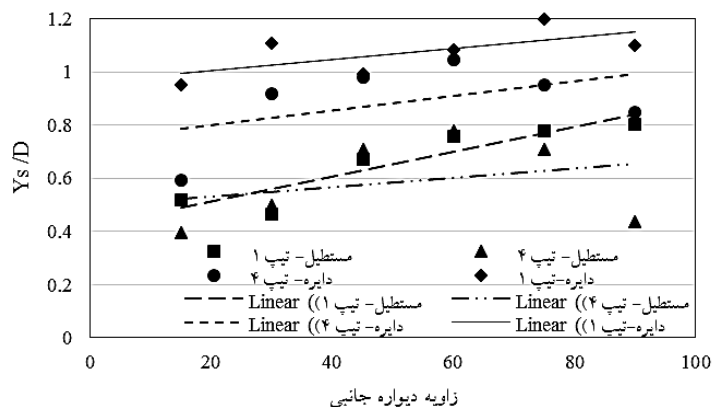
سطح مقطع کالورت از سطح مقطع کانال طبیعی کوچک‌تر است، بنابراین سرعت جریان در کالورت نسبت به کانال بیشتر می‌باشد. انقباض جریان در ورودی و واگرایی جریان در خروجی سبب وقوع آبشستگی موضعی در ورودی و خروجی کالورت می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که با برخورد جت خروجی از کالورت به بستر در همه زوایای دیواره جانبی، در شروع آزمایش‌ها آبشستگی با نرخ بیشتری شروع می‌شود که با گذشت زمان ابعاد گودال آبشستگی توسعه پیدا می‌کند و رسوبات شسته شده توسط جریان آب در پایین‌دست گودال آبشستگی تجمع می‌یابند؛ سپس نرخ افزایش عمق آبشستگی کاهش پیدا می‌کند زیرا که با توسعه گودال آبشستگی و افزایش عمق آب درون گودال از سرعت جریان درون گودال کاسته می‌شود و تنش برشی وارد شده به بستر کاهش می‌یابد، بنابراین نرخ افزایش عمق آبشستگی کاهش پیدا می‌کند. تخمین ماکزیمم عمق و طول گودال آبشستگی در برآورد طول حفاظت و

نواحی می‌باشد. این گرداب‌ها عامل ایجاد آبستتگی در این ناحیه کالورت می‌باشند [15]، بنابراین زاویه ۱۵ درجه با کاهش عرض ناحیه تشکیل گردابه‌ها نسبت به زوایای دیگر عملکرد بهتری در کاهش آبستتگی نشان داده‌است. در تیپ ۱ هیدرولیکی در مقطع مستطیلی کاربرد دیواره جانبی در همه زوایا باعث کاهش عمق آبستتگی شده‌است که زاویه ۳۰ درجه با کاهش ۴۶٪ بهترین عملکرد را در کاهش ماکزیم عمق آبستتگی نشان داده‌است و سپس زاویه ۱۵ درجه با کاهش ۳۵/۳٪ عملکرد خوبی را نشان داده‌است. در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱، روند منظمی مشاهده نمی‌شود ولی با مقایسه تأثیر زاویه‌ها مشاهده می‌شود که در این حالت نیز زاویه ۱۵ درجه با کاهش ۱۳/۶٪ نسبت به بقیه زوایا در کاهش آبستتگی بیشتر مؤثر بوده‌است. بنابراین نوع مقطع کالورت نسبت به زاویه دیواره جانبی تأثیر بیشتری در میزان آبستتگی نشان داده‌است به گونه‌ای که در همه زوایای دیواره جانبی بیشترین عمق آبستتگی در مقطع دایره‌ای مشاهده می‌شود.

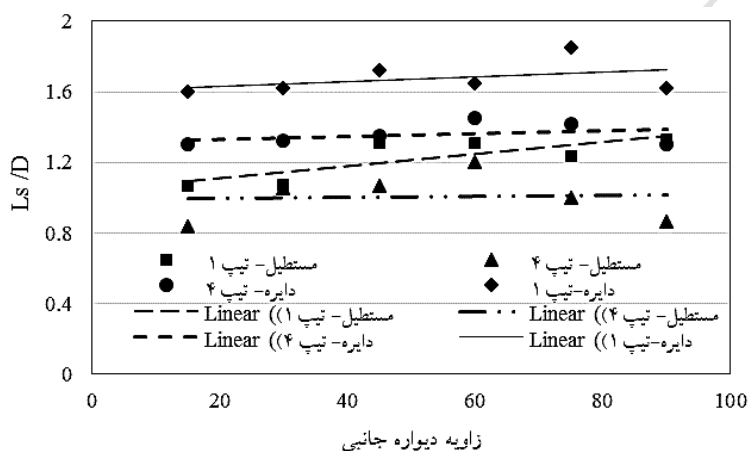
باتوجه به مطالعاتی که توسط محققان صورت گرفته‌است، دیواره جانبی با زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه (با زاویه بهینه ۴۵ درجه) توصیه شده‌است [11, 16]. زوایای ذکر شده براساس کاهش میزان افت و همچنین بهبود ظرفیت انتقال در مجرای آبی به‌عنوان بهینه پیشنهاد شده‌اند. در این پژوهش با بررسی میزان آبستتگی در خروجی کالورت، زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه بهینه مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که باتوجه به مطالعات کرنوی و همکاران (۲۰۰۷) دیواره با زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به بقیه زوایا انطباق بیشتری بر خطوط جریان داشته‌است، بنابراین کمترین میزان آبستتگی را ایجاد نموده‌است. لازم به ذکر می‌باشد که درصدهای آبستتگی محاسبه‌شده نسبت به تست شاهد (زاویه ۹۰ درجه) صورت گرفته‌است.

مستطیلی بیشتر می‌باشد. در مقطع مستطیلی به دلیل چهار گوشه بودن و عریض تر بودن شکل مقطع نسبت به دایره-ای، جریان خروجی از کالورت به صورت گسترده‌تری توزیع می‌یابد به گونه‌ای که جریان به صورت سطحی‌تر (عمق کمتر) شکل می‌یابد که دارای سرعت کمتری و در نهایت فرسایش کمتری نسبت به دایره‌ای می‌باشد [14]. همچنین با مقایسه میزان آبستتگی حاصل شده در دو تیپ ۱ و ۴ هیدرولیکی مشاهده می‌شود که میزان آبستتگی در خروجی هر دو کالورت دایره‌ای و مستطیلی، در تیپ ۱ هیدرولیکی بیشتر به دست آمده‌است. در تیپ ۱ جریان به صورت آزاد و با عمق کمتر و سرعت بیشتری از کالورت خارج می‌شود بنابراین میزان آبستتگی بیشتری را ایجاد می‌کند. ساداتی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی عددی الگوی جریان درون کالورت ماکزیم سرعت را در خروجی مجرا مشاهده کردند [15]. با بررسی تأثیر زوایای دیواره جانبی بر آبستتگی مشاهده می‌شود که دیواره جانبی با زاویه ۱۵ درجه نسبت به خط مرکزی جریان، بهترین عملکرد را در کاهش حداکثر عمق آبستتگی نشان داده‌است به جز در کالورت با مقطع مستطیلی در تیپ ۱ هیدرولیکی که در زاویه ۳۰ درجه عملکرد بهتری نسبت به بقیه زاویه‌ها در کاهش آبستتگی نشان داده‌است. در تیپ ۴ هیدرولیکی در هر دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای کاربرد دیواره جانبی در همه زوایا به جز در زاویه ۱۵ درجه، تأثیر افزایشی در عمق آبستتگی نشان داده‌است که دیواره با زاویه ۱۵ درجه باعث کاهش آبستتگی به میزان ۳۰٪ در کالورت دایره‌ای و ۱۰٪ در کالورت مستطیلی شده‌است. همچنین زاویه ۶۰ درجه بیشترین تأثیر را در افزایش عمق آبستتگی نشان داده‌است به گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای باعث افزایش عمق آبستتگی به میزان ۳۰٪ و در مقطع مستطیلی باعث افزایش عمق آبستتگی به میزان ۸۰٪ شده‌است. در پایین دست کالورت و در گوشه‌های خروجی سرعت‌های منفی ایجاد می‌شود که نشانگر تشکیل گردابه‌ها در این





شکل ۶ تغییرات عمق آبشستگی در خروجی کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای



شکل ۷ تغییرات طول آبشستگی در خروجی کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای

دایره‌ای تیپ ۱ به مقدار ۱۴/۲٪، کالورت دایره‌ای تیپ ۴ به مقدار ۱۱/۵٪، کالورت مستطیلی تیپ ۴ به مقدار ۴۴٪ افزایش می‌باشد. کمترین طول آبشستگی در همه حالت‌ها در زاویه ۱۵ درجه دیواره جانبی به دست آمده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود کالورت با مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مستطیلی باعث ایجاد طول آبشستگی بیشتری شده است که این در تیپ ۱ هیدرولیکی نسبت به تیپ ۴ بیشتر می‌باشد.

ابت و همکاران (۱۹۸۷) با بررسی تأثیر شکل کالورت در الگوی آبشستگی اظهار داشتند که الگوی آبشستگی در حالت مستطیلی به‌طور قابل توجهی با الگوی آبشستگی در کالورت دایره‌ای متفاوت می‌باشد [6] که در پژوهش حاضر نیز همین مشاهده شده است. در کالورت دایره‌ای به دلیل بیشتر بودن سرعت در ناحیه خروجی،

### بررسی طول گودال آبشستگی

تغییرات طول گودال آبشستگی در زوایای مختلف دیواره جانبی در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در کالورت با مقطع دایره‌ای تغییرات طول آبشستگی نسبت به مقطع مستطیلی کمتر است و در هر دو مقطع با افزایش زاویه دیواره جانبی از ۱۵ تا ۶۰ درجه، طول آبشستگی افزایش پیدا کرده است به‌گونه‌ای که در زاویه ۶۰ درجه بیشترین طول آبشستگی اتفاق افتاده است. به جز در کالورت دایره‌ای در تیپ ۱ ماکزیمم طول آبشستگی در زاویه ۷۵ درجه ایجاد شده است. در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ در همه زوایای دیواره جانبی طول آبشستگی نسبت به تست شاهد کاهش پیدا کرده است. ماکزیمم مقادیر طول آبشستگی نسبت به تست شاهد به ترتیب در کالورت

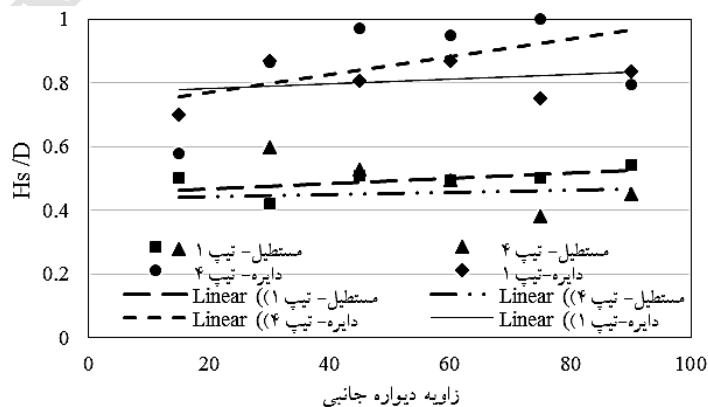
گودال آبستگي دارای عمق و طول بیشتری در مقایسه با مقطع مستطیلی شده است که در تپ ۱ هیدرولیکی به دلیل شکل گیری عمق کمتر آب نسبت به تپ ۴، میزان آبستگي بیشتر به دست آمده است. بنابراین کاربرد مقطع مستطیلی در کالورت نسبت به مقطع دایره ای ارجحیت دارد.

**بررسی ارتفاع رسوب گذاری**

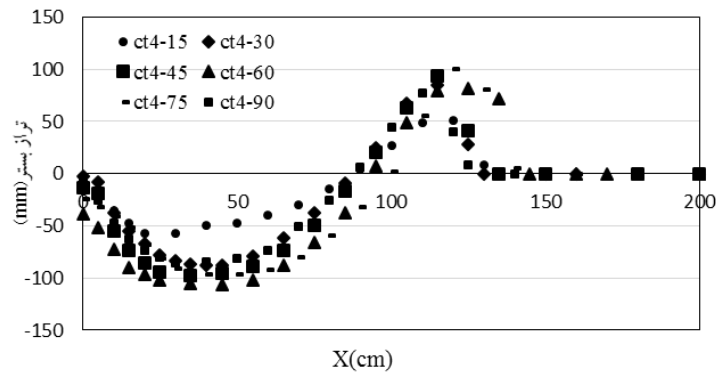
رسوبات جدا شده از گودال آبستگي پس از جابه جایی، در نقطه ای در پایین دست گودال آبستگي بسته به مقدار سرعت و عمق جریان انباشته می شوند. مقایسه حداکثر ارتفاع رسوب گذاری در زوایای مختلف دیواره جانبی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است برخلاف ماکزیم عمق و طول آبستگي که در کالورت با مقطع دایره ای در تپ ۱ هیدرولیکی رخ داده بود در اینجا ماکزیم ارتفاع رسوب گذاری در تپ ۴ مقطع دایره ای اتفاق افتاده است که در زاویه ۷۵ درجه به میزان ۲۵/۸٪، باعث افزایش ارتفاع رسوب گذاری نسبت به شاهد شده است. به طور کلی روند ثابت و منظمی بر الگوی رسوب گذاری نسبت به تغییر زاویه دیواره جانبی مشاهده نمی شود ولی در همه حالت ها، دیواره جانبی با زاویه ۱۵ درجه به دلیل کاهش عمق گودال آبستگي، ماکزیم ارتفاع رسوب گذاری را کاهش داده است به گونه ای که در کالورت با مقطع دایره ای در تپ ۴ هیدرولیکی به میزان ۲۷٪ و در تپ ۱ به میزان ۱۶/۲٪ ارتفاع رسوب گذاری کاهش یافته است که این در داده شده است.

کالورت با مقطع مستطیلی در تپ ۴، ۳۷/۸٪ و در تپ ۱ به میزان ۷/۴٪ کاهش می باشد. مطابق با مشاهدات قبلی در اینجا نیز مقطع دایره ای به دلیل میزان آبستگي بیشتر در ناحیه خروجی، نسبت به مقطع مستطیلی باعث رسوب گذاری بیشتری در پایین دست گودال آبستگي شده است که این در تپ ۴ هیدرولیکی نسبت به تپ ۱ بیشتر می باشد. نجفی و قدسیان (۱۳۸۳) اظهار داشتند که ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر از عمق پایاب تأثیر می پذیرد و می توان بیان کرد که زمانی که عمق پایاب کم می باشد رسوبات به صورت یکنواخت جلوی گودال آبستگي پخش و ته نشین می شوند ولی زمانی که عمق پایاب بیشتر باشد رسوبات به صورت تپه ای در پایین دست گودال آبستگي تشکیل می شوند [17].

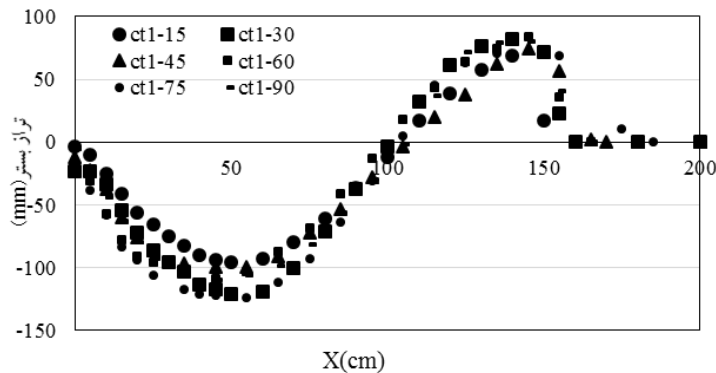
بنابراین با توجه به این که عمق پایاب در تپ ۴ هیدرولیکی بیشتر از تپ ۱ می باشد ارتفاع رسوب گذاری در این حالت بیشتر از تپ ۱ به دست آمده است. در شکل های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نیم رخ های طولی آبستگي که بیانگر ماکزیم عمق آبستگي، ماکزیم ارتفاع رسوب گذاری و طول گودال آبستگي می باشد در هر دو کالورت دایره ای و مستطیلی نسبت به زاویه های مختلف دیواره جانبی نشان داده شده است. در شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب خطوط هم تراز بستر در تپ ۱ کالورت دایره ای و مستطیلی به عنوان نمونه آورده شده است و در شکل های ۱۵ و ۱۶ پروفیل گودال آبستگي ایجاد شده به صورت شماتیک در دو مقطع دایره ای و مستطیلی نشان داده شده است.



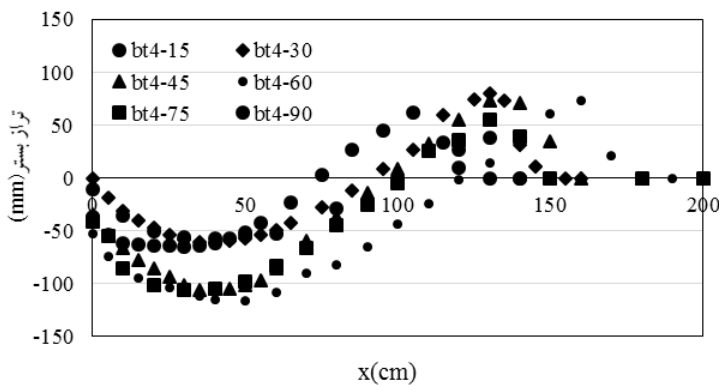
شکل ۸ تغییرات ماکزیم ارتفاع رسوب گذاری در پایین دست کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره ای



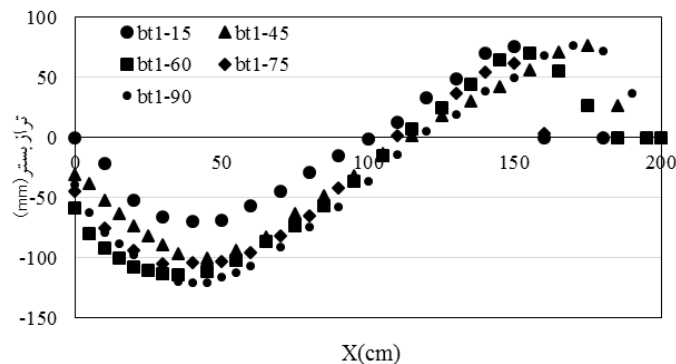
شکل ۹ مقایسه نیمرخ‌های مختلف آبستگي در کالورت دایره‌ای، تیپ ۴



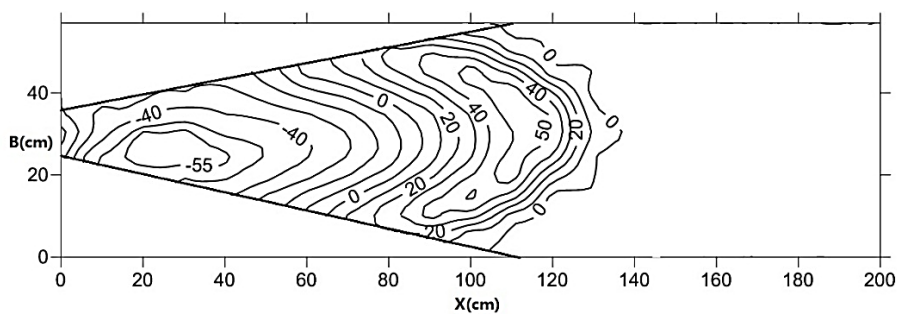
شکل ۱۰ مقایسه نیمرخ‌های مختلف آبستگي در کالورت دایره‌ای، تیپ ۱



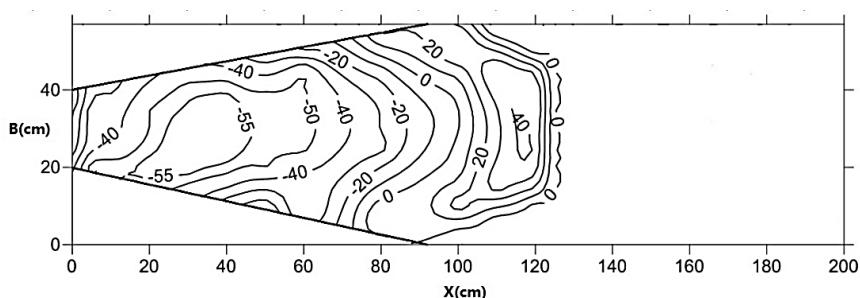
شکل ۱۱ مقایسه نیمرخ‌های مختلف آبستگي در کالورت مستطیلی، تیپ ۴



شکل ۱۲ مقایسه نیمرخ‌های مختلف آبستگي در کالورت مستطیلی، تیپ ۱



شکل ۱۳ خطوط هم‌تراز بستر در کالورت دایره‌ای تیپ ۴ با زاویه ۱۵ درجه



شکل ۱۴ خطوط هم‌تراز بستر در کالورت مستطیلی تیپ ۴ با زاویه ۱۵ درجه



شکل ۱۵ هندسه چاله آبستنگی پایین دست کالورت دایره‌ای



شکل ۱۶ هندسه چاله آبستنگی پایین دست کالورت مستطیلی

منطبق با خطوط جریان باشد ساخته شود تأثیر کاهش در میزان آبستنگی از نظر عمق و طول آبستنگی و همچنین الگوی رسوب‌گذاری دارد. نتایج زیر از پژوهش حاضر به دست آمد:

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که استفاده از دیواره جانبی در پایین دست کالورت در میزان آبستنگی ایجاد شده در خروجی کالورت مؤثر می‌باشد و در صورتی که با زاویه مناسبی که

## واژگان لاتین

H <sub>w</sub>	عمق آب در بالادست کالورت	۱- ابعاد گودال آبشستگی در پایین دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد، به گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای در تیب ۱ هیدرولیکی، عمق آبشستگی به میزان ۳۵٪ نسبت به مستطیلی افزایش داشته‌است که این در تیب ۴ هیدرولیکی به میزان ۹۵٪ مشاهده شد.
D	ارتفاع کالورت	۲- میزان عمق و طول گودال آبشستگی در تیب ۱ هیدرولیکی نسبت به تیب ۴ در هر دو کالورت دایره‌ای و مستطیلی به میزان بیشتری به دست آمد.
Q	دبی عبوری از کالورت	۳- ارتفاع رسوب گذاری در مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مستطیلی بیشتر به دست آمد که این در تیب ۴ هیدرولیکی نسبت به تیب ۱ به میزان بیشتری مشاهده شد.
W	عرض کالورت	۴- دیواره با زاویه ۱۵ درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبشستگی و همچنین ارتفاع رسوب گذاری در پایین دست می شود که میزان کاهش عمق آبشستگی در کالورت مستطیلی با تیب ۱ هیدرولیکی به میزان ۳۵/۳٪ نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین زاویه ۳۰ با کاهش ۴۶٪ آبشستگی بهترین عملکرد را در کالورت مستطیلی با تیب ۱ نشان داد.
B	عرض کانال پایین دست	
y <sub>t</sub>	عمق پایاب	
A	سطح مقطع کالورت	
g	شتاب ثقل	
R <sub>H</sub>	شعاع هیدرولیکی کالورت	
y <sub>s</sub>	ماکزیم عمق آبشستگی	
W <sub>s</sub>	ماکزیم عرض آبشستگی	
L <sub>s</sub>	ماکزیم طول آبشستگی	
V <sub>s</sub>	ماکزیم حجم آبشستگی	
σ	انحراف معیار ذرات	
d <sub>50</sub>	متوسط قطر ذرات	

## مراجع

۱. حسینی، س.م.، ابریشمی، ج.، «هیدرولیک کانال‌های باز»، چاپ بیست و هفتم، تعداد صفحات: ۶۱۳، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۰).
2. Chow, V. T., "Open Channel Hydraulic", Mc Graw. Hill Book Company, Ing, (1959).
3. Yoo, D. H. and Lee, S., "Direct Determination of the Width or Height for a Box Culvert Applying Dimensionless Equations", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 1302-1307, (2012).
4. Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Hunt, J. H. and Miller, A. C., "Hydraulic Design of Safe Bridge", U.S. Department of Transportation, FHWA-HIF-12-018, (2012).
5. Abida, H. and Townsend, R. D., "Local Scour Downstream of Box-Culvert Outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 425-440, (1991).
6. Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K. and Donnell, C. A., "Influence of Culvert Shape on Outlet Scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 393-400, (1987).
7. Abt, S. R., Kolberdanz, R. L. and Mendoza, C., "Unified Culvert Scour Determination", *Journal of*

- Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 10, pp. 1475-1479, (1984).
8. Crookston, B. M. and Tullis, B. P. M., "Scour Prevention in Bottomless Arch Culvert", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 27(2), pp. 213-225, (2012).
9. Kerenyi, K., Jones, J. S. and Stein, S., "Bottomless Culvert Scour Study: Phase 2 Laboratory Report, FHWA-HRT-07-026, Federal Highway Administration, D.C, (2007).
10. Thompson, P. L. and Klingore, R. T., "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels", *Federal Highway Administration*, D.C. FHWA-NHI-06-086, (2006).
11. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. US department of transportation-federal highway transportation, *Hydraulic Engineering Circular No. 14*, Third Edition, (2006).
۱۲. شفاعی بجستان، م.، «هیدرولیک رسوب»، چاپ سوم، تعداد صفحات: ۴۷۰، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۴).
13. Kumar, V., Vittal, N. and Ranga Raju, K. G., "Reduction of Scour around Bridge Piers Using Slots and Collars", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1302-1305, (1999).
14. Drainage Design Manual., Colorado Department of Transportation, (2017).
۱۵. ساداتی، ف.، هاشمی، م.، زمردیان، س.م.ع.، «بررسی عددی الگوی جریان در مجرا و پایین دست کالورت در حالت مستغرق»، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۳).
16. Blaisdel, F. W., "The SAF Stilling Basin," U.S. Government Printing Office, (1959).
۱۷. نجفی، ج.، قدسیان، م.، «بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفرة آبستنگی پایین دست کالورت لوله‌ای»، نشریه دانشکده فنی، دوره ۳۸، شماره ۲، صص. ۳۲۹-۳۳۸، (۱۳۸۳).