

نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد در پایداری سنگ‌چین اطراف آبشکن مستغرق در قوس ۹۰ درجه

ابتسام جاسمی زرگانی^{۱*}، سید محمود کاشفی‌پور^۲ و محمود شفاعی بجهستان^۳

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز e.jasemi@yahoo.com

^۲ - استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ - استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۵

چکیده

آبشکن‌ها سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که در رودخانه‌ها به منظور ساماندهی رودخانه‌ها شامل حفاظت دیواره‌های رودخانه در برابر فرسایش، توسعه طبیعی کناره رودخانه در طرح اصلاح مسیر، حفاظت‌های خاص و موضعی سازه‌های جانبی، کشتیرانی، واحیاء سامانه زیست آبی رودخانه احداث می‌گردند. کارایی اصلی آبشکن‌های رودخانه‌ای، انحراف جریان از کناره رودخانه و هدایت آن به سمت مجرای اصلی است. نتیجه انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید در پیرامون آبشکن می‌باشد، فرآیند هیدرولیکی این جریان، توسعه حفره آبشستگی در پیرامون آبشکن می‌باشد. یکی از موارد مهم در مورد آبشکن‌ها نحوه محافظت و حفظ پایداری آن‌ها در برابر تشکیل حفره آبشستگی است. یکی از رایج‌ترین و در عین حال اقتصادی‌ترین روش‌ها، استفاده از سنگ‌چین می‌باشد. در این تحقیق هدف، بررسی تأثیر نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد آبشکن بر روی پایداری سنگ‌چین‌ها برای محافظت از آبشکن‌ها در قوس می‌باشد. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق آزمایش‌ها در یک فلوم ۹۰ درجه با $R/B=4$ صورت گرفت. از شش نوع سنگ‌چین با قطرهای ۵/۵، ۷/۹، ۱۱/۱، ۱۴/۳، ۱۷/۹ و ۲۲/۲ میلی‌متر، سه طول آبشکن معادل ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض مجرا برای چهار دبی ۲۵، ۲۹، ۳۲ و ۳۶ لیتر در ثانیه استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌داد که سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر در ارتفاع نسبی آبشکن بزرگ‌تر شکست می‌یابند و با افزایش نسبت انسداد پایداری سنگ‌چین‌ها کاهش می‌یابد. در نهایت معادله‌ای کاربردی در طراحی سنگ‌چین با توجه به ارتفاع نسبی آبشکن، نسبت انسداد و اندازه المان‌های سنگ‌چین ارائه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: آبشکن مستغرق، پایداری سنگ‌چین، ارتفاع نسبی آبشکن، قوس رودخانه.

The Effect of Relative Spur Height and Length on The Riprap Stability Around The Submerged Spur Dike in a 90° Bend

E. Jasemi Zargani^{1*}, S. M. Kashefipour² and M. Shafai Bejestan³

1* - Ph.D. Student, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

3- Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 15 June 2013

Accepted: 17 November 2013

Abstract

Spur dikes are hydraulic structures, which are built across the river from river bank towards centerline in order to protect the river bank from erosion, natural development of amending the river side, special protection of local structures, navigation and environmental rehabilitation of river. The main job of these structures is to divert the flow away from the bank and towards centerline of river. However, the velocity will increase and the complicate vortex will be formed around the spur nose and the protection of spur dikes against scouring and their stability is very important. Using riprap is the most common and economical method for spur dike protection. In this study the effect of relative height and length of the submerged spur dikes on riprap stability is investigated. The experiments were carried out in a laboratory flume with 90° bend and $R/B=4.0$. Six sizes of

ripraps including 5.5, 7.9, 11.1, 14.3, 17.9, and 22.2 mm, with three relative spur length (15%, 20% and 25% of the flume width) and four discharge (25, 29, 32 and 36 lit/s) were used. The results showed that the larger riprap failed for the higher relative spur height. With increasing the relative spur length the riprap stability decreased. Finally an experimental equation was developed based on the relative spur height and length and riprap size, which can be applied for designing of riprap size.

Keywords: Submerged spur dike, Riprap stability, Relative spur height, River bend.

در این زمینه صورت گرفته است. الوادی و همکاران^۱ (۲۰۰۱) به بررسی آبشستگی اطراف آبشکن مستغرق پرداختند و در این تحقیق تأثیر عمق جریان و ابعاد آبشکن بر روی توسعه چاله آبشستگی در آبشکن‌های عمودی مستغرق بررسی گردید و نتیجه اینکه نرخ بازشدگی تأثیر زیادی در آبشستگی دارد و افزایش این نرخ (α) باعث آبشستگی کم و فرسایش پایین دست آبشکن شد. طول زیاد آبشکن و کاهش عمق باعث افزایش آبشستگی نسبت به طول کوتاه و عمق زیاد آب شد:

$$\alpha = \frac{Bh - bd}{Bh} \quad (1)$$

که در آن B : عرض کانال، b : طول آبشکن در مقطع، h : عمق آب و d : ارتفاع آبشکن روی بستر می‌باشد. هاگر و الیوتو^۲ (۲۰۰۲) با استفاده از مجموعه وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آستانه حرکت و با کمک گرفتن از دیاگرام شیلدز به بررسی آستانه حرکت رسوبات در شرایط نزدیک به جریان یکنواخت برای رسوبات یکنواخت و غیر یکنواخت با دو جرم مخصوص مختلف پرداختند. این دو محقق با استفاده از مطالعه صورت گرفته توسط هاگر و دلجودس^۳ (۲۰۰۰) و بر اساس عدد بی بعد اندازه ذره دیاگرام شیلدز را به سه قسمت رژیم لزوج، رژیم انتقالی و رژیم توربولانت یا آشفته تقسیم کردند. ناجی^۴ (۲۰۰۵) به ارزیابی هیدرولیکی آبشکن مستغرق و غیر مستغرق پرداخت، در این آزمایش‌ها مشاهده شد نرخ آبشستگی در آبشکن ۹۰ درجه سریع‌تر از آبشکن ۶۰ درجه می‌باشد، همچنین آبشستگی اولیه در آبشکن غیر مستغرق بیش از آبشکن مستغرق مشاهده شد. گیسونی و هاگر^۵ (۲۰۰۸) بر روی نقش سنگ‌چین در محافظت آبشکن‌ها در کانال مستقیم آزمایش‌هایی را انجام دادند. آن‌ها وجود تأثیر پارامترهایی از قبیل دبی، طول آبشکن، فاصله آبشکن‌ها، ارتفاع آبشکن‌ها و نیز قطر و تعداد ردیف‌های سنگ‌چین مورد مطالعه قرار دادند. آنان رابطه‌ای را برای تعیین نوع شکست

مقدمه

آبشکن‌ها سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که از دیواره رودخانه به سمت محور جریان توسعه یافته‌اند. اهداف اصلی از کاربرد آبشکن‌ها در سامانه‌های رودخانه‌ها عبارتند از: حفاظت دیواره‌های رودخانه، توسعه طبیعی کناره رودخانه در طرح اصلاح مسیر، حفاظت‌های خاص و موضعی سازه‌های جانبی، کشتیرانی، و احیاء سامانه زیست آبی رودخانه. آبشکن‌ها می‌توانند مستغرق و یا غیرمستغرق باشند. آبشکن‌های مستغرق بیشتر در مسائل کشتیرانی و آبشکن غیر مستغرق در مسائل آبخیزداری کاربرد دارند. کارایی اصلی آبشکن‌های رودخانه‌ای، انحراف جریان از کناره رودخانه و هدایت آن به سمت مجرای اصلی است. نتیجه انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید در پیرامون آبشکن است که به صورت گسترده‌تری در پایین دست آبشکن ظاهر می‌گردد. فرایند هیدرولیکی این جریان، توسعه حفره آبشستگی در پیرامون آبشکن، و ته نشست بار رسوبی در پایین دست و کناره رودخانه است. در حالی که آبشستگی یک خطر جدی برای سازه آبشکن و در نتیجه برای رودخانه محسوب می‌شود، پدیده رسوب‌گذاری در کناره پایین دست رودخانه راهکار طبیعی تثبیت دیواره‌های رودخانه در راستای مورد نظر خواهد بود. تا کنون در خصوص جنبه‌های مختلف می‌باشد و با آبشکن‌ها تحقیقات گوناگونی صورت گرفته است به عنوان مثال بررسی وضعیت قرارگیری آبشکن‌ها، اندازه آبشکن‌ها، زاویه قرارگیری آن‌ها در مسیرهای مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد ولی تاکنون در خصوص پایداری آبشکن‌ها تحقیقات زیادی صورت نگرفته است و تحقیقات اندک موجود غالباً در مسیر مستقیم بوده است در حالی که عمده‌ترین کاربرد استفاده از آبشکن‌ها در قوس‌ها توجه به ماهیت پیچیده جریان در خم رودخانه نمی‌توان اطلاعات مربوط به کانال‌های مستقیم را برای رودخانه‌های طبیعی بکار برد. برای مقابله با آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌ها، دیواره‌ها و آبشکن‌ها روش‌های متعددی ارائه شده که یکی از ساده‌ترین و در عین حال اقتصادی‌ترین روش‌ها، استفاده از سنگ‌چین می‌باشد استفاده از سنگ‌چین به دلیل در دسترس بودن مصالح، سادگی اجرا و هزینه‌های کم بسیار متداول است. علی‌رغم مزایای عنوان شده در فوق، چنانچه طراحی سنگ‌چین به درستی صورت نگیرد، پس از مدتی به تدریج تخریب شده و اثر خود را از دست خواهد داد. با توجه به اهمیت و لزوم محافظت از سواحل تاکنون تحقیقات بسیار زیادی

- 1- Elawady *et al.*
- 2- Hager and Oliveto
- 3- Hager and Del Giudice
- 4- Nagy
- 5- Gisonni and Hager

می‌آید. امروزه معادله‌های متعددی برای منحنی آستانه حرکت شیلدز معرفی شده ولی اغلب آن‌ها پیچیده می‌باشند. یکی از این معادله‌ها توسط هاگر و دل جودس (۲۰۰۰) ارائه شده است. آن‌ها بر اساس عدد بی بعد اندازه ذره $D_* = (g' / v^2)^{1/3} d_{50}$ محدوده مورد نظر را به سه قسمت تقسیم کردند. در این رابطه $g' = [(\rho_s - \rho) / \rho] g = \rho' g$ می‌باشد. در این رابطه d_{50} : قطر متوسط رسوبات بستر و g' : شتاب ثقل مؤثر است، بر اساس رابطه هاگر و دل جودس دیگرگام شیلدز را می‌توان به صورت زیر نشان داد (هاگر و دل جودس ۲۰۰۰):

$$\begin{aligned} T_i &= 0.120 D_*^{-1/2} & D_* &\leq 10 \\ T_i &= 0.026 D_*^{1/6} & 10 < D_* < 150 \\ T_i &= 0.060 & D_* &\geq 150 \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله‌های بالا $T_i = \frac{\tau_i}{(\rho_s - \rho) g d_s} = \frac{S_f R_h}{\rho' d_{50}}$ که به عنوان تنش برشی بی بعد آستانه حرکت شناخته می‌شود. از آنجا که تخمین S_f کار بسیار مشکلی است می‌توان با استفاده از معادله مانینگ-استریکلر آن را حذف کرد:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

که در آن V : سرعت متوسط مقطع، S_f : شیب خط انرژی و R_h : شعاع هیدرولیکی می‌باشد. با توجه به رابطه استریکلر می‌توان ضریب زبری مانینگ (n) را بر حسب اندازه متوسط ذره (اندازه ذره بر حسب متر) به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{n} = 6.75 g^{1/2} d_{50}^{-1/6} \quad (4)$$

حال:

$$T_i = \frac{S_f R_h}{\rho' d_{50}} = \left(\frac{nV}{R_h^{2/3}} \right)^2 \left(\frac{R_h}{\rho' d_{50}} \right) \quad (5)$$

پس از آن عدد فرود آستانه حرکت ذره $F_d = V / (g' d_{50})^{1/2}$ شکل رابطه (۶) خواهد بود:

سنگ‌چین براساس پارامترهای آبشکن تعریف نمودند. آذین‌فر و کلز (۲۰۰۸) به پیش‌بینی پدیده برگشت آب در اثر انسداد با آبشکن مستغرق در کانال روباز پرداختند در نهایت روابطی برای پیش‌بینی سطح اول، اثر برگشت آب به دلیل وجود آبشکن مستغرق ارائه دادند. اودین و حسین (۲۰۱۱) به بررسی میدان جریان در اطراف دهانه چوگانی آبشکن مستغرق در یک بستر متحرک پرداختند، آن‌ها دریافتند که سرعت نزدیک دهانه افزایش یافته و سرعت عمود در پست‌ترین نقطه کانال بیشتر از نواحی مرتفع‌تر می‌باشد. جریان چرخشی در نزدیکی سطح قوی‌تر و در نزدیکی بستر ضعیف‌تر مشاهده شد. بختیاری و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی آبشکن و عمق کارگذاری سنگ‌چین بر روی پایداری سنگ‌چین‌ها در یک قوس ۹۰ درجه ملایم در شرایط غیر مستغرق پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش کارگذاری سنگ‌چین در عمق بیشتر موجب افزایش پایداری سنگ‌چین‌ها می‌شود، افزایش طول نسبی آبشکن و همچنین فاصله نسبی آبشکن‌ها موجب کاهش پایداری سنگ‌چین و در نتیجه پایداری آبشکن‌ها و محافظت سواحل می‌گردد. ظهیری و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی هیدرولیک جریان و پایداری سنگ‌چین اطراف آبشکن‌ها در قوس ۹۰ درجه در شرایط غیرمستغرق پرداختند، با تحلیل نتایج آزمایش‌ها، رابطه‌ای را برای طراحی سنگ‌چین در اطراف آبشکن‌ها در قوس ارائه دادند. تأثیر مشترک عوامل هندسی آبشکن و شرایط هیدرولیکی جریان در پایداری سنگ‌چین اساسی می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن^۳ و انسداد^۴ جریان بر پایداری سنگ‌چین محافظ پای آبشکن مستغرق در قوس ۹۰ درجه ملایم است.

مواد و روش‌ها

عوامل مؤثر

شیلدز (۱۹۳۶) منحنی ارائه داد که در آن عدد رینولدز ذره $T_i = \frac{\tau_i}{(\rho_s - \rho) g d_s}$ را به پارامتر انتقال یعنی $R_* = \frac{u_* d_s}{v}$ مربوط می‌سازد. در این پارامتر u_* : سرعت برشی، d_s : قطر ذره، v : لزجت کینماتیک سیال، τ_i : تنش برشی آستانه، ρ_s : جرم واحد حجم رسوبات، ρ : جرم واحد حجم مایع و g : شتاب ثقل می‌باشد. اگر چه این رابطه نقدهای زیادی را به همراه داشته ولی تا امروز به عنوان بهترین رابطه برای آستانه حرکت رسوبات به حساب

- 1- Azinfar and Kells
- 2- Uddin and Hossain
- 3- Relative spur height
- 4- Relative spur length

جاسمی زرگانی و همکاران: نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد در پایداری سنگ‌چین ...

$\beta = b/B$: نسبت طول آبشکن به عرض آبراهه یا نسبت انسداد

است که تنگ شدگی مقطع عبوری جریان را تعریف می‌نماید.

$S = s/h$: ارتفاع نسبی آبشکن می‌باشد که در آن s : ارتفاع

آبشکن و h : عمق جریان در بالادست در لحظه شکست سنگ‌چین است. ارتفاع نسبی آبشکن نشان می‌دهد زمانی که عمق جریان با ارتفاع آبشکن برابر است این پارامتر برابر ۱ و در سایر شرایط از ۱ کمتر می‌شود بنابراین حداکثر مقدار ارتفاع نسبی آبشکن با این تعریف ۱ می‌باشد.

با توجه به رابطه (۹) ملاحظه می‌گردد عامل بار هیدرولیکی در اصل بیانگر نسبت عدد فرود ذره در دو حالت بدون و با حضور سنگ‌چین و آبشکن می‌باشد.

علاوه بر عامل بار هیدرولیکی که یک عامل مؤثر در پایداری ذرات بستر می‌باشد، با استفاده از تحلیل ابعادی عامل‌های مؤثر دیگر در پایداری سنگ‌چین و رسوبات بستر به دست خواهند آمد. نظر به اینکه در این تحقیق هدف بررسی تأثیر نسبت‌های انسداد و ارتفاع نسبی آبشکن بر روی پایداری سنگ‌چین می‌باشد لذا خصوصیات مؤثر در این تحقیق عبارت خواهد بود از خصوصیات مربوط به جریان: سرعت جریان در بالادست آبشکن (V)، عمق جریان در کانال اصلی (h)، شتاب ثقل (g)، شتاب ثقل مؤثر (g')، جرم واحد حجم مایع (ρ)، لزجت سیال (μ). خصوصیات مربوط به هندسه سیستم: عرض کانال اصلی (B)، فاصله طولی آبشکن‌ها (L)، طول آبشکن (b)، ارتفاع آبشکن (s) خصوصیات مواد رسوبی: قطر متوسط ذرات رسوبی (d_{50})، چگالی رسوبات (ρ_s)، انحراف معیار رسوبات ($\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$)، قطر سنگ‌چین (d_R)، نسبت اندازه سنگ‌چین به رسوبات بستر ($\delta = d_R/d_{50}$) با استفاده از تحلیل ابعادی π باکینگهام و حذف پارامترهای ثابت و کم تأثیر گروه‌های بدون بعد زیر به دست می‌آیند:

$$f\left(\frac{d_R}{d_{50}}, \frac{b}{B}, \frac{V}{\sqrt{(G_s - 1)gd_{50}}}, \frac{V}{\sqrt{(G_s - 1)gd_R}}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{s}{h}\right) = 0 \quad (10)$$

پارامتر اول و دوم در رابطه بالا به ترتیب بیانگر نسبت اندازه سنگ‌چین به رسوبات بستر و نسبت انسداد است و پارامتر پنجم و ششم در رابطه فوق به ترتیب بیانگر عدد فرود ذره و ارتفاع نسبی آبشکن می‌باشند. یکی از پارامترهای مؤثر در هیدرولیک رسوب و پایداری رسوبات بستر عدد فرود ذره می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_d = 6.75T_i^{1/2} \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{1/6} \quad (6)$$

بر این اساس برای سه محدوده D_* که قبلاً معرفی شد معادله‌هایی بر اساس دینامیک سیال، مشخصات رسوب و عمق جریان نسبی (R_h/d_{50}) وجود خواهد داشت. در حالت رژیم جریان کاملاً آشفته $D_* \geq 150$ می‌توان نوشت:

$$F_d = 1.65 \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{1/6} \quad (7)$$

هاگر و اولیوتو (۲۰۰۲) جهت رژیم جریان آشفته نشان دادند که:

$$\left[\sigma^{-1/3} V / (g' d_{50})^{1/2}\right] = \left[1.65 (R_h / d_{50})^{1/6}\right] \quad (8)$$

σ : انحراف معیار رسوبات $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ می‌باشد، d_{84} : اندازه ذره‌ای است که ۸۴ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند و d_{16} : قطر ذره‌ای است که ۱۶ درصد ذرات از آن کوچکتر می‌باشند (انگر و هاگر ۲۰۰۶).

بر اساس نظر گیسونی و واکا (۲۰۰۵) در صورتی که مانعی در رسوبات جاسازی شده باشد، تنش برشی بحرانی بستر و یا سرعت آستانه حرکت کم می‌گردد که این کاهش تنش برشی بحرانی و سرعت آستانه حرکت به دلیل ایجاد تلاطم اضافی است. بنابراین آن‌ها مشخصات آبشکن جانبی که شامل نسبت‌های انسداد و ارتفاع نسبی آبشکن می‌باشد را مورد توجه قرار دادند، براین اساس عامل بار هیدرولیکی R_s را با در نظر گرفتن V به عنوان سرعت مقطع جریان در لحظه شکست سنگ‌چین، به صورت زیر تعریف کردند:

$$R_s = \left[\sigma^{-1/3} V / (g' d_{50})^{1/2}\right] \left[1.65 (R_h / d_{50})^{1/6} \Phi_s\right] \quad (9)$$

در معادله بالا Φ_s : مشخصات هندسی آبشکن بوده و به صورت تابعی از حاصل ضرب نسبت انسداد و ارتفاع نسبی آبشکن می‌باشد. با توجه به مطالعات انگر و هاگر (۲۰۰۶) مقدار این پارامتر در این تحقیق به صورت $\Phi_s = \left[1 - \frac{5}{6}(\beta S)\right]^{5/16}$ در نظر گرفته شد.

- 1- Unger and Hager
- 2- Gissoni and vacca
- 3- Hydraulic load factor

۷/۹، ۱۱/۱، ۱۴/۳، ۱۷/۹، ۲۲/۲، میلی‌متر و چهار محدوده دبی برای ایجاد استغراق‌های مختلف برابر با ۲۵، ۲۹، ۳۲ و ۳۶ لیتر در ثانیه انتخاب گردید، در تمامی آزمایش‌ها ضخامت لایه سنگ‌چین برابر با $2d_R$ و پوشش آن ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد آرایش آبشکن‌ها در قوس و چیدمان سنگ‌چین‌ها در اطراف آبشکن در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. نحوه انجام آزمایش‌ها به این ترتیب بود که پس از نصب آبشکن‌ها ابتدا جریان در آستانه حرکت رسوبات برقرار شد تا ناحیه بحرانی و آبشکن بحرانی مشخص گردد. آبشکنی بحرانی است که رسوبات بستر اطراف آن سریع‌تر حرکت نمایند و چاله آبستگی ایجاد گردد. سپس سنگ‌چین‌ها در اطراف آبشکن - بحرانی قرار داده شد، به‌جز آبشکن بحرانی آبشکن قبل و بعد از آبشکن بحرانی نیز با سنگ‌چین‌ها محافظت شدند. در این مرحله از انجام آزمایش‌ها ابتدا دریچه پایین دست کاملاً بسته می‌شد سپس دبی و عمق به آرامی افزایش داده می‌شد تا شرایط شکست سنگ‌چین و حرکت رسوبات بستر حاصل نشود. پس از رسیدن به دبی از پیش تعیین شده، با باز کردن دریچه عمق جریان به آرامی کم می‌گردید تا با افزایش سرعت جریان سنگ‌چین‌ها ناپایدار شده و شکست سنگ‌چین رخ دهد. معمولاً برای هر تغییر عمق تا برقراری شرایط تعادل جریان و اطمینان از پایدار شدن جریان تأمل می‌گردید. در لحظه شکست عمق در بالادست فلوم ثبت شده آزمایش به پایان می‌رسید و شرایط برای انجام آزمایش بعدی آماده می‌شد. منظور از شکست سنگ‌چین حرکت افقی و یا عمودی نزدیک‌ترین المان‌ها به آبشکن می‌باشد. در شکل (۲-ب و ج) به ترتیب سنگ‌چین‌های اطراف آبشکن قبل و پس از شکست نشان داده شده است.

نتایج و بحث اثر ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد در پایداری

سنگ‌چین

همان‌طور که در پلان آزمایش‌ها ارائه گردید سنگ‌چین‌های مورد آزمایش دارای شش اندازه نسبی ($\delta = d_R/d_{50}$) بین حداقل ۳/۶۷ تا حداکثر ۱۴/۸ بوده است. ارتفاع نسبی آبشکن ($S = s/h$) برای لحظه شکست سنگ‌چین در شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی آبشکن و اندازه‌های سنگ‌چین بین حداقل ۰/۴ تا حداکثر ۱ اندازه‌گیری گردید. آزمایش‌ها با سه نسبت انسداد ($\beta = b/B$) ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ انجام شد.

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{(G_s - 1)gd_{50}}} \quad (11)$$

پارامتر مهم دیگر که به راحتی از تحلیل ابعادی به دست می‌آید عدد فرود سنگ‌چین می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{(G_s - 1)gd_R}} \quad (12)$$

از آنجا که عدد فرود ذره بیانگر جذر نسبت‌های اینرسی به نیروهای ثقلی است، با افزایش سرعت جریان برای اندازه سنگ‌چین ثابت عدد فرود سنگ‌چین افزایش می‌یابد در نتیجه سنگ‌چین‌ها سریع‌تر حرکت کرده و ناپایدارتر می‌باشند. بنابراین عکس این رابطه بیانگر پایداری سنگ‌چین است عدد N_s به عنوان عدد پایداری سنگ‌چین به صورت عکس عدد فرود سنگ‌چین می‌باشد.

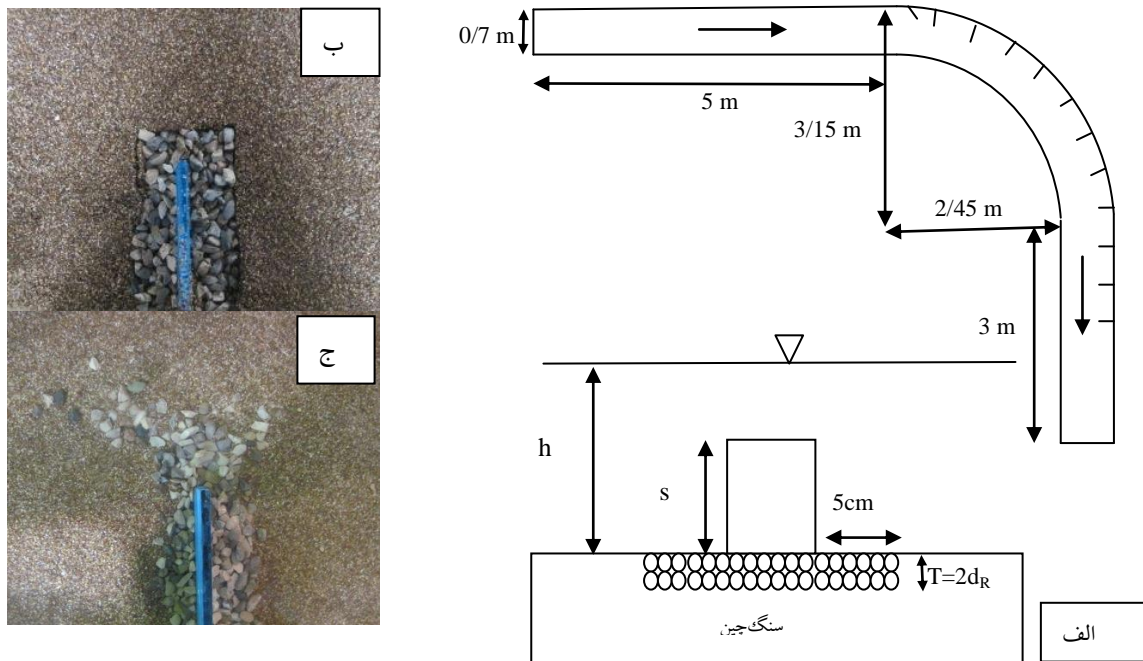
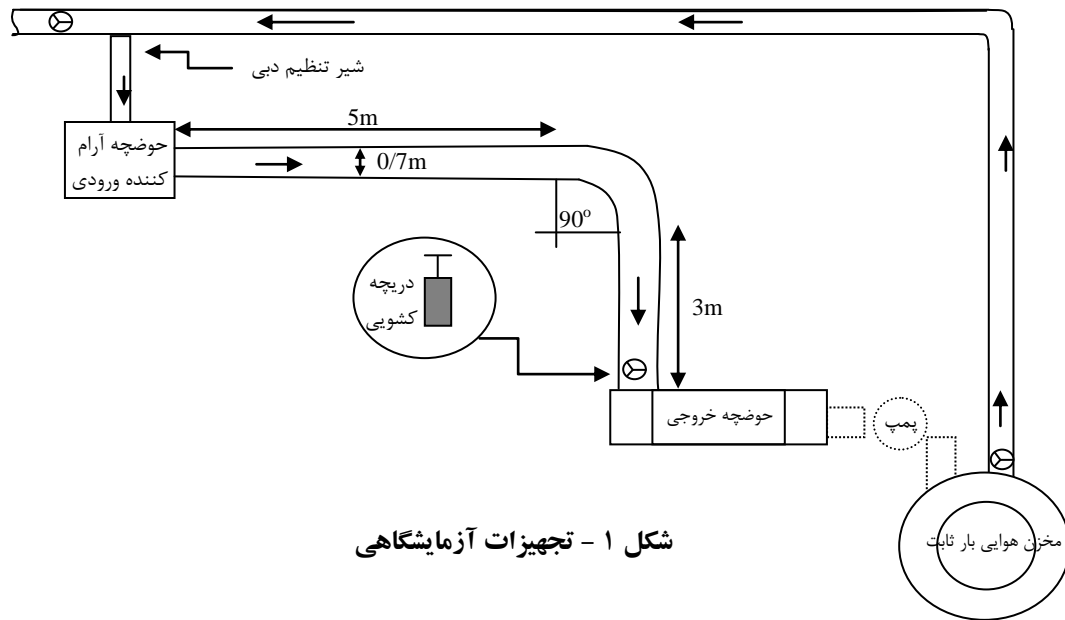
$$N_s = \frac{1}{F_R} = \frac{\sqrt{(G_s - 1)gd_R}}{V} \quad (13)$$

تجهیزات آزمایشگاهی و پلان آزمایش‌ها

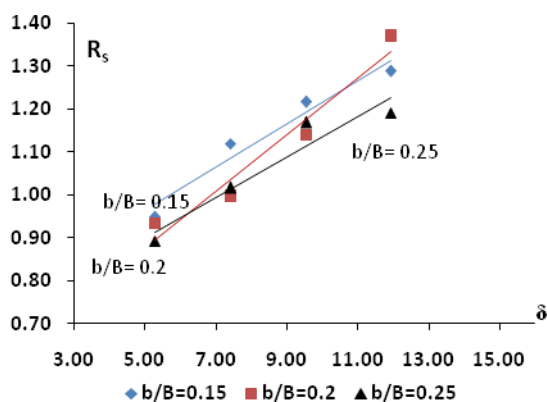
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفت. مهم‌ترین قسمت‌ها و تجهیزات موجود در آزمایشگاه شامل مخزن آرام‌کننده ورودی، مسیر مستقیم ورودی به طول ۵ متر، قوس ۹۰ درجه ملایم با طول ۳ متر و عرض ۰/۷ متر با نسبت $R/B = 4$ ، مسیر مستقیم خروجی به طول ۳ متر، دریچه کشویی، مخزن آرام‌کننده خروجی، پمپ، حوضچه مکش پمپ، مخزن تأمین بار اصلی (تانک) با بار ثابت و لوله‌های رابط و شیرآلات می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

در آزمایش‌های تحقیق حاضر در انتخاب پارامترهای مورد نیاز از استانداردهای موجود در زمینه طراحی آبشکن‌ها استفاده گردید بدین ترتیب که طول‌های مورد آزمایش در این تحقیق معادل ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال آزمایشگاهی، به ترتیب ۱۰/۵، ۱۴ و ۱۷/۵ سانتی‌متر، فاصله‌های طولی میان آبشکن‌ها در این آزمایش معادل چهار برابر طول آبشکن، شش اندازه مختلف سنگ‌چین معادل ۵/۵،

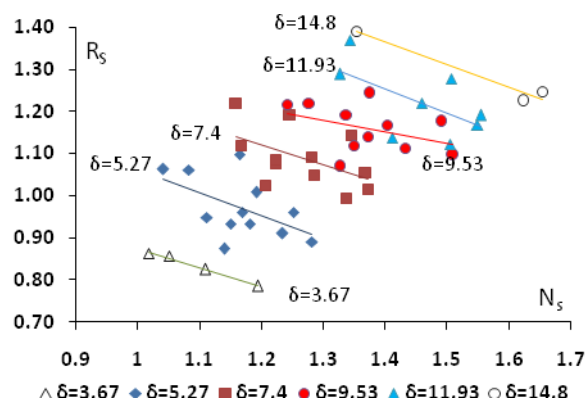
جاسمی زرگانی و همکاران: نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد در پایداری سنگ‌چین ...



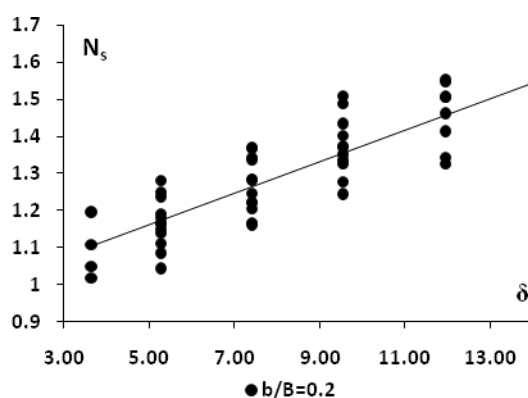
شکل ۲- الف: آرایش آبشکن در فلوم، آرایش سنگ‌چین اطراف آبشکن، ب: سنگ‌چین‌های اطراف آبشکن قبل از شکست، ج: سنگ‌چین‌های اطراف آبشکن پس از شکست



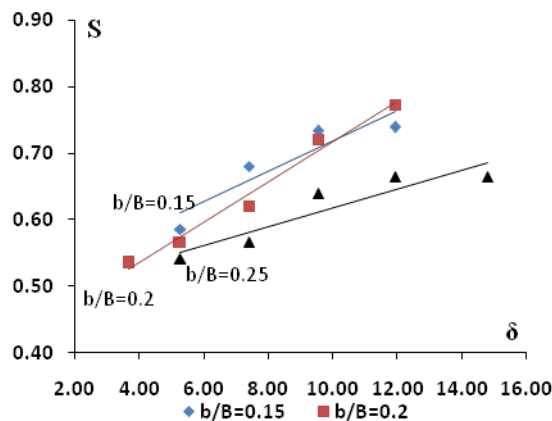
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- عامل بار هیدرولیکی سنگ‌چین (R_s) در برابر الف: عدد پایداری (N_s) در δ های مختلف، ب: نسبت اندازه سنگ‌چین در انسدادهای مختلف با دبی ۳۲ لیتر در ثانیه. ج: عدد پایداری در برابر نسبت اندازه سنگ‌چین، د: ارتفاع نسبی آبشکن در برابر نسبت اندازه سنگ‌چین در نسبت‌های انسداد مختلف در دبی ۳۲ لیتر در ثانیه

شکستند. با بیشتر شدن نسبت انسداد سرعت جریان در مقطع بیشتر شده و باعث ناپایداری هرچه بیشتر سنگ‌چین‌ها می‌شود بنابراین برای یک اندازه ثابت سنگ‌چین در نسبت انسداد بیشتر نیاز به عامل بار هیدرولیکی کمتری برای ایجاد شکست می‌باشد.

شکل (۳-ج) عدد پایداری در برابر نسبت اندازه سنگ‌چین در $\beta = 0.2$ را نشان می‌دهد همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر چه سنگ‌چین‌ها بزرگ‌تر می‌شوند تنش لازم برای حرکت سنگ‌چین‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه پایداری افزایش می‌یابد، پایداری برای سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر بیشتر است. در شکل (۳-د) در شرایطی که آبشکن مستغرق شود، یک لایه جریان چرخشی با محور افقی در امتداد طولی بدنه آبشکن و در پایین دست آن ایجاد می‌گردد. ریزش جریان همراه با تلاطم چرخشی آن، باعث آبستگي و ناپایداری

شکل (۳-الف) عامل بار هیدرولیکی سنگ‌چین را در برابر عدد پایداری در نسبت اندازه سنگ‌چین مختلف نشان می‌دهد. سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر نیاز به عامل بار هیدرولیکی بیشتری برای شکست دارند. همان‌طور که این نمودار نشان می‌دهد برای یک اندازه ذره هرچه عامل بار هیدرولیکی بیشتر باشد پایداری کمتر است. سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر پایداری بیشتری را در عامل بار هیدرولیکی بیشتر دارند و پایدار تر می‌باشند.

شکل (۳-ب) عامل بار هیدرولیکی را در برابر δ های مختلف برای نسبت‌های طولی مختلف آبشکن برای دبی ۳۲ لیتر در ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در دبی ثابت هرچه نسبت انسداد بیشتر باشد عامل بار هیدرولیکی لازم برای شکست سنگ‌چین کمتر است. سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر در عامل بار هیدرولیکی بزرگ‌تر

جاسمی زرگانی و همکاران: نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد در پایداری سنگ‌چین ...

استخراج معادلات مورد نظر با استفاده از رگرسیون غیر خطی و توسط نرم‌افزار آماری SPSS صورت پذیرفت.

تعداد آزمایش‌هایی که شکست در آن‌ها اتفاق افتاد ۵۱ آزمایش می‌باشد مدل با ۸۵ درصد داده‌ها ساخته شد و با ۱۵ درصد آن‌ها صحت سنجی گردید. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به کمک تحلیل رگرسیون غیرخطی مقادیر زیر ضرایب و توان‌های معادله‌های بالا به صورت زیر به دست آمد:

$$a = 0.769, b = 0.398, c = 0.255$$

$$d = 1.645, e = 0.658, f = 0.224$$

لذا می‌توان به صورت کلی معادله‌ها را به شکل زیر بیان نمود:

$$R_s = 0.769S^{0.398}\delta^{0.255} \quad R^2 = 0.850 \quad (16)$$

$$R_s/\Phi_s = 1.645S^{0.658}\delta^{0.224} \quad R^2 = 0.784 \quad (17)$$

برای بررسی میزان دقت روش مقادیر عامل بار هیدرولیکی به دست آمده از معادله (۱۶) برای ۱۵ درصد از داده‌ها $R_s(\rho)$ در مقابل مقدار محاسبه شده این پارامتر به کمک مقادیر اندازه‌گیری شده، معادله (۹)، $R_s(m)$ در شکل (۴-الف) ارائه شده است. در این شکل داده‌های گیسونی و هاگر (۲۰۰۸) اندازه‌گیری شده برای فاصله طولی معادل چهار برابر طول آبشکن در برابر مقادیر محاسبه شده با استفاده از معادله (۱۶) ارائه شده است. مطابق شکل همبستگی مناسبی میان مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر به دست آمده با استفاده از معادله پیشنهادی به چشم می‌خورد. دو خط چین معرف ± 15 درصد انحراف نسبی نسبت به خط ۴۵ درجه بوده که تمامی نقاط در فاصله بین این دو خط جای گرفته‌اند.

شکل (۴-ب) مقادیر اندازه‌گیری شده $R_s/\Phi_s(m)$ و محاسبه شده با فرمول (۱۷) $R_s/\Phi_s(\rho)$ این تحقیق با ۱۵ درصد باقیمانده داده‌ها و تحقیق گیسونی و هاگر (۲۰۰۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های صحت‌سنجی رابطه و گیسونی و هاگر (۲۰۰۸) همگی بین دو خط چین معرف ± 15 درصد انحراف نسبی نسبت به خط ۴۵ درجه قرار دارند. تحلیل آماری مربوط به ارزیابی معادلات (۱۶) و (۱۷) با ۱۵ درصد داده‌هایی که در توسعه این مدل استفاده نشده بودند در جدول (۱) آمده است.

سنگ‌چین‌های محافظ پای آبشکن می‌شود. هرچه ارتفاع نسبی آبشکن بیشتر می‌شود سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر شکست می‌یابند، سنگ‌چین‌های کوچک‌تر در ارتفاع نسبی آبشکن کمتر شکست پیدا می‌کنند که به عبارتی استغراق بیشتر است. هر چه نسبت طولی آبشکن بیشتر باشد به دلیل افزایش طول آبشکن محدوده بیشتری از جریان تحت تأثیر آبشکن قرار می‌گیرد زیرا با افزایش طول آبشکن درصد تنگ شدگی مقطع افزایش می‌یابد. به دنبال این افزایش مقدار اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف فشار در بالادست و پایین دست مقطع تنگ شده افزایش می‌یابد و این موجب توسعه ابعاد گردابه خواهد شد. با بیان این مطالب عدم پایداری سنگ‌چین‌ها و در نتیجه آبشکن در طول‌های بیشتر آبشکن‌ها قابل توجه می‌باشد. شکست برای نسبت انسداد بیشتر در ارتفاع نسبی آبشکن کمتر اتفاق افتاده است.

رابطه عامل بار هیدرولیکی با ارتفاع نسبی آبشکن و اندازه

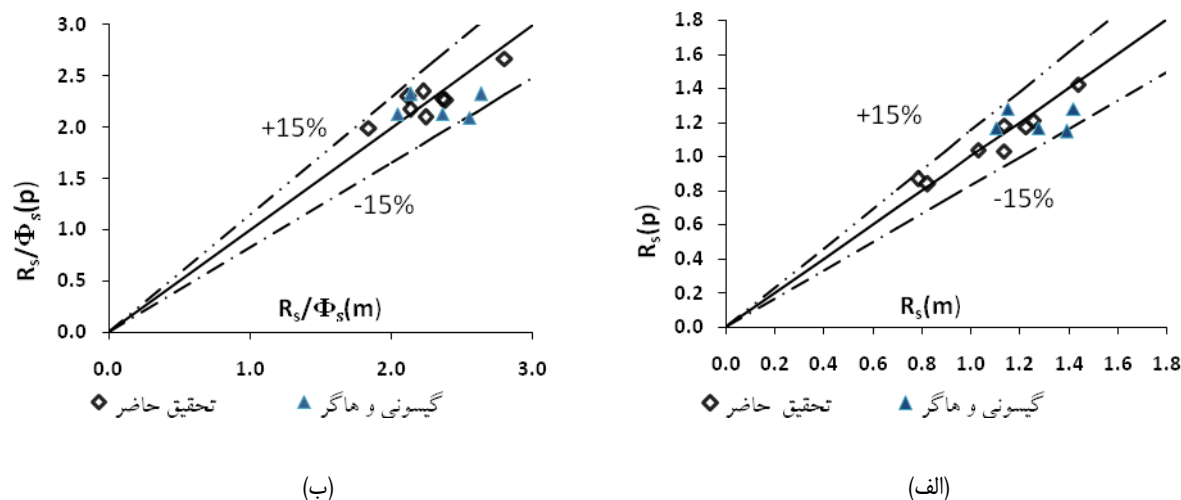
سنگ‌چین

از آنجا که هدف پایداری سنگ‌چین‌های اطراف آبشکن می‌باشد، با توجه به اهمیت عامل بار هیدرولیکی سنگ‌چین، و نقش ارتفاع نسبی آبشکن در این عامل و همچنین اندازه نسبی سنگ‌چین‌ها و در نظر گرفتن اندازه رسوبات بستر نیاز به استخراج معادله‌ای می‌باشد که بتوان از آن‌ها در پروژه‌ها و طرح‌های مهندسی رودخانه استفاده نمود و همچنین ارتباط بین اندازه سنگ‌چین‌ها و ارتفاع نسبی آبشکن‌ها را توصیف نماید. زمانی که از المان‌های سنگ‌چین اطراف آبشکن استفاده شود R_s تابعی از اندازه المان‌های سنگ‌چین خواهد بود (گیسونی و هاگر ۲۰۰۸).
تابع تعریف شده به صورت زیر می‌باشد:

$$R_s = aS^b\delta^c \quad (14)$$

در این رابطه R_s : عامل بار هیدرولیکی، S : ارتفاع نسبی آبشکن در لحظه شکست سنگ‌چین و δ : $\left(\frac{d_R}{d_{50}}\right)$ نسبت قطر سنگ‌چین می‌باشد. از آنجا که R_s بیانگر شرایط هیدرولیکی جریان و دانه‌بندی بستر می‌باشد و Φ_s تأثیر مشخصات هندسی آبشکن را که پارامتری پیچیده است در بر دارد معادله دیگری نیز می‌توان تعریف نمود که در آن Φ_s تابعی از βS می‌باشد را شامل شود. بنابراین تابعی به صورت زیر تعریف شد:

$$R_s/\Phi_s = dS^e\delta^f \quad (15)$$



شکل ۴- الف: عامل بار هیدرولیکی، ب: مقادیر R_s/Φ_s به دست آمده از معادله پیشنهادی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی

جدول ۱- آنالیزهای آماری معادله پیشنهادی

درصد خطا	جذر میانگین مربعات خطا	
۴/۱۶	۰/۰۶	$R_s = 0.769S^{0.398}\delta^{0.255}$
۵/۴۲	۰/۱۳	$R_s/\Phi_s = 1.645S^{0.658}\delta^{0.224}$

- سنگ‌چین‌های بزرگ‌تر پایداری بیشتری را در عامل بار هیدرولیکی بیشتر دارند.
 - برای یک اندازه ثابت سنگ‌چین در نسبت انسداد بیشتر نیاز به عامل بار هیدرولیکی کمتری برای ایجاد شکست می‌باشد.
 - با افزایش قطر سنگ‌چین پایداری افزایش می‌یابد.
 - شکست برای نسبت انسداد بیشتر در ارتفاع نسبی آبشکن کمتر اتفاق افتاد.
 - شکست برای المان‌های سنگ‌چین بزرگ‌تر در ارتفاع نسبی آبشکن بزرگ‌تر رخ می‌دهد، به عبارتی در استغراق کمتر.
- با افزایش طول آبشکن، پایداری سنگ‌چین‌ها و نیز آبشکن‌ها کاهش یافت. و در نهایت روابطی کاربردی بین عامل بار هیدرولیکی، ارتفاع نسبی آبشکن و نسبت اندازه المان‌های سنگ‌چین داده شد که می‌توانند تا اندازه‌ای در طراحی سنگ‌چین بکار روند.

از آنجا که R_s بیانگر خصوصیات هیدرولیکی جریان و دانه‌بندی رسوبات بستر و همراه با Φ_s نشان دهنده اثر متقابل انسداد و ارتفاع نسبی آبشکن می‌باشد و ضمناً در این رابطه از δ نیز که بیانگر خصوصیات سنگ‌چین است استفاده شده، لذا به نظر می‌رسد که روابط (۱۶) و (۱۷) بتوانند در عمل برای طراحی سنگ‌چین و پیش‌بینی آستانه شکست آن‌ها و حتی نوع شکست (غلتیدن، برشی و زیرسطحی گیسونی و هاگر (۲۰۰۸) مؤثر باشند.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر نسبت‌های ارتفاع نسبی آبشکن و انسداد آبشکن بر روی پایداری سنگ‌چین‌ها می‌باشد. به صورت کلی می‌توان مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را به صورت زیر خلاصه نمود.

منابع

- ۱- ظهیری، ج.، کاشفی‌پور، س. م.، قمشی، م. و م. شفاعةی بجستان ۱۳۹۱. تأثیر پارامترهای هندسی ریپ‌رپ بر محافظت آبشکن‌ها در قوس 90° ، مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵ (۴): ۵۸-۴۹.

- 2- Azinfar, H. and J. A., Kells. 2008 Backwater prediction due to the blockage caused by a single, submerged spur dike in an open channel: *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(8) : 1153-1157.
- 3- Bakhtiyari, M., Kashefipour, S. M., Ghomshi, M. and J. Zahiri. 2012 Effect of geometric parameters of spur dike and depth-placed riprap on its failure threshold in a 90° flume bend. *Ecology, Environment and Conservation*, 18(3) : 479-484.
- 4- Elawady, E., Michiue, M. and H. Hinokidany. 2001 Movable bed scour around submerged spur dike. *Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE*, 45: 373-378.
- 5- Gissoni, C. and W. H., Hager. 2008 Spur failure in river engineering. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(2):135-145.
- 6- Gissoni, C. and A. Vacca. 2005 Discussion of influence of turbulence on bed load sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 131(1): 72-73.
- 7- Hager, W. H. and G. Del Giudice. 2000 Discussion to movable bed roughness in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 127(7): 627-628.
- 8- Hager, W. H. and G. Oliveto. 2002. Shields' entrainment criterion in bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(5) : 538-542.
- 9- Nagy, H. M., 2005. Hydraulic evaluation of emerged and submerged spur-dikes: Temporal bed evolution and equilibrium state characteristics. *Alexandria Engineering Journal*, 44 (2): 279-290.
- 10- Shields, A. 1936 Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement. translated to English by W. P. Ott and J. C. van Uchelen, CalTech, Pasadena, CA.
- 11- Uddin, M. J., and M. M., Hossain. 2011. Investigation of flow field around submerged bell mouth groin: an experimental study. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 3(1): 55-70.
- 12- Unger, J., and W. H., Hager. 2006. Riprap failure at circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(4): 354-362.