

مطالعه آزمایشگاهی پایداری مصالح سنگچین بستر در محل تلاقی رودخانه‌ها

الهام قنبری عدیوی^{1*}، محمود شفاعی بجزستان² و مرتضی ساقی³

تاریخ دریافت: 91/9/07 تاریخ پذیرش: 92/2/14

¹ دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

² استاد، عضو هیئت علمی گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

³ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Elhamgh44@gmail.com

چکیده

اتصال کانال‌ها به همدیگر پدیده‌ای است که در اکثر سیستم‌های رودخانه‌ای و کانال‌های آبیاری و زهکشی دیده می‌شود و در آن دو جریان کانال اصلی و فرعی با هم برخورد می‌کنند. به دلیل تغییر در مقدار و جهت سرعت، مقدار دبی جریان و دبی رسوب پدیده‌هایی چون فرسایش در بستر، فرسایش سواحل و بالاخره رسوبگذاری در پائین‌دست محل تلاقی اتفاق می‌افتد. این امر باعث ایجاد خسارت به ابنیه مجاور و همچنین تغییر ریخت شناسی رودخانه می‌شود. یکی از راه‌های جلوگیری و کنترل فرسایش استفاده از ریپرپ یا سنگچین در محل تلاقی می‌باشد که تا کنون در این زمینه معیار طراحی ارائه نشده است. از این رو در این مطالعه آزمایش‌هایی با اندازه ذرات سنگ مختلف (D_{50}) و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف به منظور تعیین عوامل مؤثر بر پایداری سنگچین‌ها در شرایط آستانه حرکت ذرات و آستانه شکست (حالتی که تقریباً تمامی ذرات سنگچین شروع به حرکت می‌کنند) انجام شده است. عدد پایداری ($S.N$)، که عامل تعیین پایداری سنگچین می‌باشد به ازای چند اندازه ذره با چگالی‌های مختلف (G_s)، و در نسبت دبی‌های (Q_r) مختلف (نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی قبل از تلاقی)، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص گردید که با افزایش نسبت دبی، عدد پایداری کاهش پیدا می‌کند و به ازاء مقادیر یکسان نسبت دبی، با کاهش اندازه ذرات سنگچین عدد پایداری کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش چگالی صرف نظر از تأثیر سایر متغیرها عدد پایداری افزایش می‌یابد. در نهایت رابطه‌ای با دقت قابل قبول ($R^2=0/86$) برای برآورد عدد پایداری استخراج گردید.

واژه‌های کلیدی: پایداری، تلاقی رودخانه‌ها، سنگچین، فرسایش

Laboratory Study of Stability in the Riprap Materials of bed at the Confluence of Rivers

E Ghanbari Adivi^{1*}, M Shafae Bajestan² and M Saghi³

Received: 27 November 2012 Accepted: 4 May 2013

¹Ph.D Student, Dept. of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

²Prof., Dept. of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

³M.Sc Dept. of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

*Corresponding Author Email: Elhamgh44@gmail.com

Abstract

Channel confluence is a common feature of the most irrigation and drainage channels and river systems, where tributary conflicts the main channel. Due to complex flow patterns - because of variation of magnitude and direction of flow velocity, flow and sediment discharge - bed erosion, shoreline erosion and accumulation of sediment at the downstream of river confluence are common processes. This phenomenon causes damage of the adjacent structures and changes river morphology. A common practice to prevent and control bed erosion at river confluence is to use a cover of stone or riprap. Criterion for design of stone has not been developed in the past, therefore in this study, some stone sizes (D_{50}) with different specific gravity under different hydraulic conditions have been tested to determine the factors that affect the stability of riprap at the threshold and failure conditions. The stability number (SN), which is a decisive factor for riprap stability has been studied for some different stone sizes (D_{50}), specific gravity (G_s) and flow discharge ratio (Q_r). It was found that with increasing flow rate, the stability number decreased; also it revealed that the stability number decreased by decreasing particle size of riprap for a constant discharge ratio (Q_r). Apart from the effects of the other variables, the stability number (SN) increased, as the specific gravity of stone (G_s) decreased. Finally, a relationship with an acceptable accuracy ($R^2 = 0.86$) was determined to estimate the stability number (SN).

Keywords: Erosion, Riprap, River confluence, Stability

مقدمه

محل تلاقی به محدوده‌ای گفته می‌شود که جریان آب دو رودخانه در آنجا به همدیگر می‌پیوندد. تغییر نیمرخ سطح آب و عمق جریان، نحوه توزیع سرعت، تنگ‌شدگی مجرای عمومی، افت انرژی و بوجود آمدن پرش هیدرولیکی از جمله مهمترین متغیرهای هیدرولیکی در این محل می‌باشد. این محل به عنوان ناحیه‌ای با الگوهای پیچیده از حرکت جریان سه بعدی و همچنین مکان بیشترین اغتشاش جریان در سیستم‌های رودخانه‌ای شناخته شده است (جباری صاحب‌اری 1386). شرایط جریان در صورت وجود بستر فرسایش‌پذیر بسیار پیچیده تر می‌شود شکل بستر در این ناحیه به علت بوجود آمدن جریان‌های ثانویه و افزایش تنش‌برشی ناشی از تنگ‌شدگی جریان تغییر می‌یابد و حفره‌های آب‌شستگی و محل‌های رسوبگذاری در بستر جریان بوجود می‌آید. این مسئله باعث وارد شدن خسارت به سازه‌های مسیر جریان شده و راندمان انتقال آب را کاهش می‌دهد. پیش‌بینی محل و تعیین میزان فرسایش و رسوبگذاری و نحوه تغییر شکل بستر می‌تواند در حفاظت و نگهداری بستر کانال‌ها، ساماندهی رودخانه‌ها و احداث سازه‌های هیدرولیکی موثر باشد (بایرون و همکاران 1996). شیلدز (1936) اولین کسی بود که مطالعات بنیادی برای یافتن رابطه‌ای در آستانه حرکت ذرات انجام داد. شیلدز (1936) بعد از انجام آزمایش‌های زیادی شروع حرکت ذرات کروی یکنواخت را وابسته به اندازه ذره (D_s)، لزجت مایع (μ)، وزن مخصوص مایع (γ)، وزن مخصوص ذره (γ_s) و تنش برشی جریان در آستانه حرکت ذره (τ_c)، تشخیص داد. شیلدز (1936) θ_c را پارامتر بحرانی و Re^* را عدد رینولدز مرزی نامگذاری کرده است. برای تعیین θ_c ، شیلدز آزمایش‌هایی برای مواد رسوبی با قطرهای مختلف در یک کانال آزمایشگاهی صورت داده است. تغییرات θ_c در

مقابل Re^* در لحظه آغاز حرکت ذره در دیاگرامی بنام دیاگرام شیلدز رسم گردیده است که در مشخص کردن فرسایش بستر کانال یا رودخانه و طراحی کانال پایدار بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایسباخ (1936) در مورد پایداری سنگ در محل سنگچین تحقیقاتی را انجام داده و معادله‌ای برای تعیین سرعت متوسطی که می‌تواند سنگریزه را حرکت دهد، ارائه کرده است. استراب (1953) از ترکیب فرمول مانینگ و رابطه شیلدز با رابطه استریکلر، رابطه‌ای را برای آستانه حرکت ذرات بدست آورد. ماینورد (1987) برای ذرات سنگی واقع در بستر کانال و شرایط آستانه حرکت رابطه‌ای را بر حسب سرعت بحرانی بیان داشت. نیل (1968) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و بر اساس سرعت بحرانی به بررسی شرایط آستانه حرکت پرداخت. ال‌ضعیمی (1991) برحسب سرعت بحرانی به تعیین اندازه ذره پایدار در آستانه حرکت ذرات بر اساس عمق جریان در محل سنگچین و چگالی ذرات سنگچین پرداخته است. قبادیان و شفافی بجزستان (2007) به بررسی الگوهای فرسایش و رسوب گذاری در محل تلاقی رودخانه‌ها با استفاده از مدل فیزیکی پرداختند. ایشان با انجام 73 آزمایش تاثیر عواملی چون نسبت دبی کانال فرعی به دبی کل، نسبت پهنای کانال فرعی به کانال اصلی، زاویه اتصال و عدد فرود ذره در پایین‌دست اتصال بر روی فرسایش و رسوبگذاری را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش نسبت دبی، کاهش نسبت پهنای و افزایش زاویه اتصال باعث افزایش حداکثر عمق فرسایش بستر و ارتفاع نهایی پشته رسوبی می‌شود در حالی که افزایش عدد فرود ذره در پایاب باعث افزایش حداکثر عمق فرسایش بستر و کاهش ارتفاع پشته رسوبی می‌شود. شفافی بجزستان و همتی (2008) برای بررسی الگوی فرسایش در تلاقی رودخانه‌ها و تاثیر پارامترهایی مانند نسبت اختلاف رقوم بستر دو

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

با توجه به مشاهدات و روابط موجود عوامل مؤثر در پایداری سنگچین در تقاطع رودخانه‌ها، تابعی از هیدرولیک جریان، مشخصات سنگچین و خصوصیات هندسی کانال می‌باشد (گورام و همکاران 1997).

مشخصات هیدرولیکی جریان

دبی کانال اصلی در بالادست محل تلاقی (Q_1)، دبی کانال فرعی (Q_2)، دبی کانال اصلی در پایین‌دست محل تلاقی (Q_3)، عمق جریان کانال اصلی در بالادست محل تلاقی (y_u)، عمق جریان کانال فرعی (y_b)، عمق جریان کانال اصلی در پایین‌دست محل تلاقی (y_t)، چگالی آب (ρ_w)، ویسکوزیته دینامیکی سیال (μ)، نیروی کشش سطحی آب (σ)، شتاب ثقل (g).

مشخصات سنگچین

قطر متوسط ذرات سنگچین (D_{50})، جرم مخصوص ذرات سنگچین (ρ_s)، انحراف معیار هندسی توزیع دانه-بندی سنگچین (σ_g)، زاویه ایستایی ذرات سنگچین (ϕ)، فاکتور شکل (F_s).

خصوصیات هندسی کانال

شیب کف کانال در محل تلاقی (S_0)، پهنای کانال اصلی در بالادست محل تلاقی (B_1)، پهنای کانال فرعی (B_2)، پهنای کانال اصلی در پایین‌دست محل تلاقی (B_3)، زبری بستر (n)، زاویه اتصال (θ).

با توجه به موارد مذکور، بطور کلی عوامل مؤثر بر پایداری سنگچین در محل تلاقی رودخانه‌ها را می‌توان بصورت رابطه تابعی زیر نوشت.

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, y_t, y_u, y_b, g, \mu, \rho_w, \sigma, B_1, B_2, B_3, \theta, S_0, n, D_{50}, \rho_s, \phi, F_s, \sigma_g) = 0 \quad [1]$$

با توجه به اینکه n (ضریب زبری مانینگ) تابعی از قطر متوسط ذرات سنگچین D_{50} (زبری مطلق) بستر می-

کانال به عرض کانال اصلی، نسبت عرض کانال فرعی به کانال اصلی، نسبت دبی کانال فرعی به دبی کل آزمایش-هایی را انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش اختلاف رقوم بستر دو کانال در نسبت دبی‌های بیشتر از 0/74 حداکثر عمق فرسایش و تپه رسوبگذاری افزایش و پشته رسوبی افزایش می‌یابد. برقی و جباری (2010) برای بررسی فرسایش موضعی در تقاطع کانال‌ها و تاثیر متغیرهایی چون زاویه تلاقی، نسبت عرض کانال فرعی به کانال اصلی، نسبت دبی کانال فرعی به دبی کل و نسبت سرعت متوسط پایین دست تلاقی به سرعت آستانه پایین‌دست آزمایش‌هایی را انجام دادند. آزمایش‌ها برای سه زاویه تلاقی مختلف 70، 50، 90 درجه، دو نسبت عرض 0/5 و 1، سه نسبت دبی 0/25، 0/5 و 0/8 و دو نسبت سرعت 0/5 و 0/8 انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که موقعیت حداکثر عمق فرسایشی با گذشت زمان به سمت دیواره بیرونی کانال و بالادست کانال اصلی پیشروی می‌کند. همچنین با کاهش عرض شاخه فرعی، افزایش نسبت دبی و افزایش زاویه تلاقی عمق چاله فرسایشی افزایش می‌یابد. ولیزادگان (1377) با استفاده از یک کار آزمایشگاهی روی مدل فیزیکی، با ارتفاع ثابت سرریز، رابطه‌ای را برای تعیین معیار حفاظت پائین‌دست حوضچه-های آرامش ارائه نمود که در این رابطه با داشتن عدد فرود می‌توان قطر سنگچین که در برابر جریان ثابت می‌ماند را انتخاب نمود. با توجه به بررسی منابع موجود و تحقیقاتی که در زمینه تلاقی رودخانه‌ها نیاز می‌باشد، هدف اصلی این مطالعه بررسی عوامل مؤثر بر میزان پایداری سنگچین مورد استفاده برای کنترل چاله فرسایشی ایجاد شده در محل تلاقی رودخانه‌ها و در نتیجه کنترل رسوب منتقل شده به سمت پایین‌دست محل تلاقی است.

پائین دست تلاقی y_t ، می‌باشند می‌توان y_u و y_b را نیز حذف کرد. از طرفی $S.N = V_t / \sqrt{(g(Sg-1)D_{50})}$ عدد فرود ذره یا عدد پایداری می‌باشد (V_t سرعت جریان در پائین‌دست تلاقی، D_{50} اندازه متوسط ذرات رسوب، S_g چگالی ویژه ذرات سنگچین)، که از ادغام سه گروه بدون بعد $(Fr_3, \frac{y_t}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho})$ از رابطه 3 بدست آمد. با توجه به اینکه پارامترهای Fr_3 و $S.N$ هر دو تأثیر نیروی ثقل بر هیدرولیک جریان را نشان می‌دهند و همچنین نظر به اهمیت $S.N$ در آنالیز پایداری ذرات، لذا در این تحقیق از اثر Fr_3 صرف‌نظر شده است. با این توضیحات رابطه 3 بصورت رابطه 4 تبدیل می‌شود:

$$S.N = g(Q_2/Q_1, y_t/D_{50}) \quad [4]$$

در رابطه 4 با استفاده از تحلیل ابعادی، عدد پایداری تابعی از نسبت‌های بدون بعد چهار کمیت (Q_2, y_t, D_{50}, Q_1) بدست آمد اما بایستی بهترین نسبت یا نسبت‌های بدون بعد مبنای آزمایش‌ها قرار داده شود. با استفاده از نرم افزار DataFit نسبت‌هایی از این کمیت‌ها که بهترین همبستگی با عدد پایداری را نشان داده به عنوان بهترین رابطه، مبنای تدوین این تحقیق قرار گرفته شد.

قابل ذکر است که، نسبت دبی کانال‌ها یکی از متغیرهای بسیار مهم هیدرولیک اتصال کانال‌ها می‌باشد و بر شرایط جریان و الگوی فرسایش و رسوبگذاری بستر تأثیر زیادی دارد. نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی و نسبت دبی کانال اصلی به کانال فرعی دو روش رایج تعریف نسبت دبی می‌باشند که در آزمایش‌های پایداری سنگچین مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این تحقیق از نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی در بالادست محل اتصال استفاده شده و با علامت (Q_r) ، طبق رابطه 5 تعریف می‌شود.

$$Q_r = Q_2/Q_1 \quad [5]$$

باشد، با استفاده از قطر متوسط ذرات سنگچین می‌توان از دخالت دادن n صرف‌نظر نمود. همچنین با توجه به تغییرات جزئی ذرات سنگچین و فرض یکنواخت بودن آن می‌توان از تأثیر زاویه ایستایی ϕ و فاکتور شکل ذرات رسوبی F_s صرف‌نظر نمود. در این تحقیق پهنای کانال اصلی در بالادست محل تلاقی B_1 ، پهنای کانال فرعی B_2 و پهنای کانال اصلی در پایین‌دست محل تلاقی B_3 در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر B می‌باشد. مقادیر انحراف معیار هندسی برای کلیه سنگچین‌های آزمایش شده در این تحقیق $\sigma_g < 1/5$ بوده و در نتیجه ذرات سنگچین یکنواخت بوده و می‌توان از تأثیر σ_g هم صرف‌نظر نمود (شفاعی بجستان 1378). در تمام آزمایش‌ها پارامتر شیب کف کانال S_0 ثابت می‌باشد. در نتیجه از این پارامتر نیز صرف‌نظر شده است. همچنین در این تحقیق زاویه تلاقی θ ثابت و برابر 60 درجه می‌باشد.

بنابراین می‌توان رابطه تابعی 1 را به صورت رابطه تابعی 2 نوشت:

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, y_t, y_u, y_b, g, \mu, \rho_w, \sigma, B, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad [2]$$

با بکارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه تابعی 2 به صورت رابطه بدون بعد 3 تبدیل می‌گردد.

$$f(Fr_3, We_3, Re_3, \frac{Q_2}{Q_1}, \frac{y_t}{y_u}, \frac{y_t}{y_b}, \frac{y_u}{y_b}, \frac{y_t}{D_{50}}, \frac{y_u}{D_{50}}, \frac{y_b}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}) = 0 \quad [3]$$

در رابطه 3، Fr_3 عدد فرود در مقطع پایین‌دست اتصال، We_3 عدد وبر در مقطع پایین‌دست اتصال و Re_3 عدد رینولدز در مقطع پایین‌دست اتصال می‌باشند. از آنجایی‌که در مدل کانال‌های روباز ابعاد به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تأثیر نیروهای کشش سطحی و لزجت سیال بسیار کم است، بنابراین از تأثیر اعداد رینولدز و وبر صرف‌نظر می‌شود. همچنین عمق جریان در بالادست تلاقی، y_u و عمق کانال فرعی y_b ، متأثر از عمق جریان در

تجهیزات آزمایشگاهی

کانال اصلی دارای طول کلی 9 متر و پهناى مفید کانال 0/35 متر می‌باشد. ارتفاع کانال از کف متغیر می‌باشد بطوریکه 2 متر ابتدای کانال دارای ارتفاع مفید 0/7 متر و 7 متر بقیه دارای ارتفاع مفید 0/40 متر می‌باشد. کانال فرعی در طول 2/8 و پهناهای متغیر 0/35 (در محل تلاقی با کانال اصلی) و 0/25 متر (در ابتدای کانال فرعی) ساخته شده است. ارتفاع آن در تمام طول یکسان و برابر 0/40 متر می‌باشد (پهنا و یا ارتفاع متغیر در این کانال‌ها به منظور امکان تغییر نسبت دبی‌ها استفاده شده است). کف و جدارهای کانال اصلی و فرعی از شیشه 10 و 6 میلی‌متری ساخته شده است. (شکل 2).

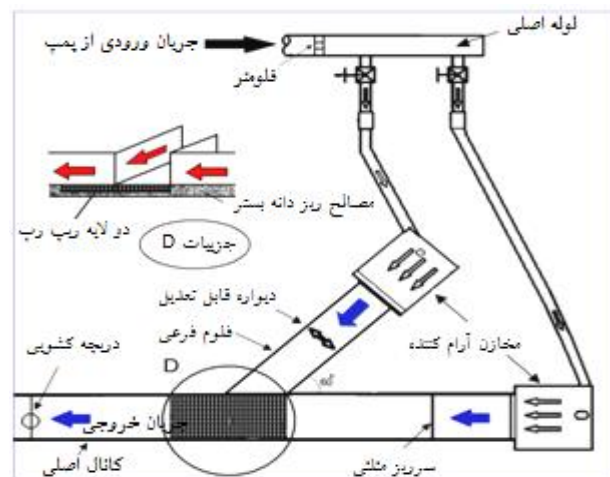


شکل 2-کانال اصلی و نحوه اتصال آن به کانال فرعی.

روش انجام آزمایش‌ها

قبل از هر گونه آزمایشی ابتدا باید فلوم آزمایشگاهی اصلاح گردد. برای این کار ابتدا 7 سانتیمتر از رسوبات ریزدانه در کف فلوم ریخته و تسطیح می‌شود. سپس همانطور که در شکل (1، جزئیات D) نشان داده شده است در محل اتصال شاخه اصلی به فرعی به ارتفاع $(2D_{50})$ ریپرپ مورد نظر، از رسوبات ریزدانه برداشته و بجای آن ریپرپ را قرار داده و مسطح شده است. در این تحقیق از دو نوع مصالح با چگالی‌های (G_s) ، 2/65 و 1/61 استفاده گردیده که برای مصالح سنگی با چگالی ذرات (G_s) ، برابر 2/65 در اندازه‌های با قطر میانگین (D_{50}) برابر 3/53، 7/14، 11/11، 15/87 و 22/22 میلیمتر، و برای

در این تحقیق با استفاده از یک کار آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی و هیدرولیکی در آزمایشگاه دانشگاه شهید چمران، به بررسی پایداری تا حد شرایط آستانه حرکت و آستانه شکست سنگچین (حالتی که تقریباً تمامی ذرات سنگچین شروع به حرکت می‌کنند) در تقاطع رودخانه‌ها و بررسی اثراتی که نسبت دبی‌های مختلف بر پایداری سنگچین‌ها و تغییرات عمق پایاب بر آستانه حرکت می‌گذارد پرداخته شده است. این مطالعه براین فرضیه استوار می‌باشد که با افزایش اندازه سنگچین در محل آبشستگی در تلاقی رودخانه‌ها، قدرت فرسایشی جریان کم یا به عبارتی مقاومت سنگ در برابر تنش‌های برشی بالا افزایش یافته، که در نتیجه میزان پایداری سنگچین بالا رفته و از آبشستگی جلوگیری به عمل می‌آید. تجهیزات آزمایشگاهی بکار رفته در این تحقیق شامل حوضچه مکش، ایستگاه پمپاژ و متعلقات، مخزن تأمین هد، مخازن فرعی (آرام کننده جریان)، وسایل اندازه‌گیری و تنظیم دبی و عمق جریان می‌باشد. طرح کلی این تجهیزات بصورت کامل در شکل 1 ارائه شده است.

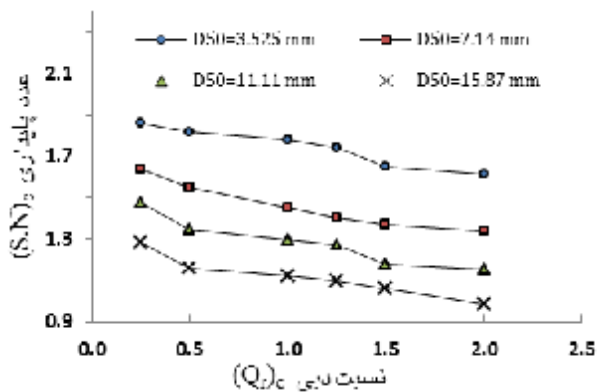


شکل 1- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق.

دریچه حالت شکست رخ نداد بنابراین در شکل 4 این اندازه‌ها نمایش داده نشده است. همچنین در مورد سایر گرافها، در مورد اندازه 22/22 میلیمتر در همین دبی کل ذرات حرکتی نداشته و در آستانه حرکت قرار نگرفتند (شکل 3). همچنین در دبی کل 30 لیتر بر ثانیه و برای ذرات سنگچین با اندازه قطر 15/87 میلیمتر در نسبت دبی-های 0/25 و 0/5 حالت شکست رخ نداده است (شکل 6). همچنین در همین دبی کل و اندازه ذرات 22/22 میلیمتر در تمام نسبت دبی‌های مورد آزمایش حالت شکست مشاهده نگردید.

تأثیر نسبت دبی (Q_r) بر عدد پایداری (S.N)

یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر پایداری ذرات سنگچین نسبت دبی شاخه فرعی به اصلی در بالادست تلاقی (Q_r) می‌باشد. در این تحقیق اثر شش نسبت دبی در دبی‌های کل 25 و 30 لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. اشکال 3 تا 8 تأثیر نسبت دبی را بر پایداری سنگچین‌ها در آستانه حرکت (S.N)_c و آستانه شکست (S.N)_f نشان می‌دهد.



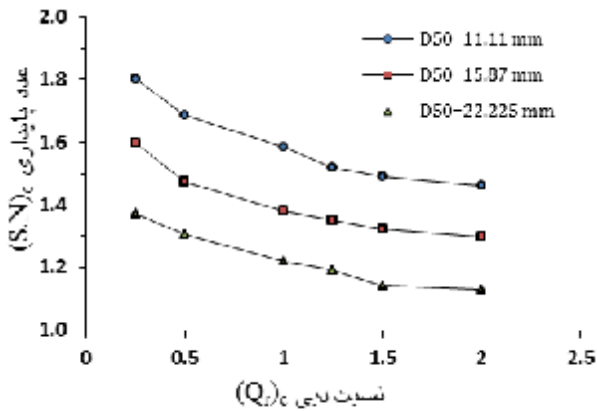
شکل 3- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه حرکت ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s). ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s)

مصالح با چگالی ذرات (G_s)، برابر 1/61 در اندازه‌های با قطر میانگین (D_{50})، برابر 11/11، 15/87 و 22/22 میلیمتر آزمایش شده است. در این تحقیق دبی‌های کل (Q_t)، 25 و 30 لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و در هر دبی‌کل، از شش نسبت دبی (Q_r)، 0/25، 0/5، 1، 1/25، 1/5 و 2 برای هر اندازه سنگچین (D_{50})، آزمایش تکرار گردیده است در مورد مصالح با چگالی 1/61 از دبی کل 25 لیتر بر ثانیه استفاده شده است. قابل ذکر است که شیب فلوم در این آزمایش‌ها ثابت انتخاب گردید و نیاز به تنظیم آن در هر آزمایش نمی‌باشد. در این تحقیق، لحظه مشاهده شروع حرکت اولین ذرات سنگچین بعنوان آستانه حرکت و لحظه-ای که تقریباً تمامی ذرات سنگچین شروع به حرکت می‌کنند بعنوان آستانه شکست در نظر گرفته شد، که برای این دو حالت تأثیر نسبت دبی کانال فرعی به اصلی در بالادست تلاقی (Q_r)، چگالی ذرات سنگچین (G_s) و نسبت ($\frac{y_f}{D_{50}}$)، بر عدد پایداری (S.N) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه نتایج این بررسی‌ها به تفکیک ارائه شده است.

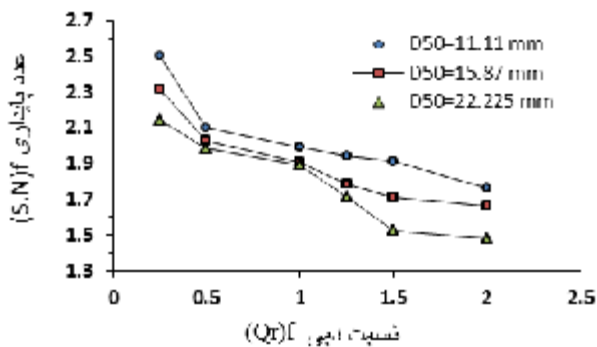
نتایج و بحث

در سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده عمق جریان در بالادست تلاقی کانال اصلی و کانال فرعی متأثر از عمق-جریان در پایین‌دست تلاقی کانال اصلی بوده، با کاهش و افزایش عمق جریان پایین‌دست تلاقی کانال اصلی، عمق جریان در بالادست تلاقی کانال اصلی و کانال فرعی کاهش و افزایش می‌یابد.

پس از برقراری جریان و شروع آزمایش مشاهده گردید که برای ذرات سنگچین با چگالی 2/65، اندازه 15/87 و 22/22 میلیمتر، در دبی کل 25 لیتر بر ثانیه فقط در نسبت دبی برابر 2، ذرات سنگچین به مرحله شکست رسیده‌اند و برای سایر نسبت دبی‌ها با باز کردن کامل

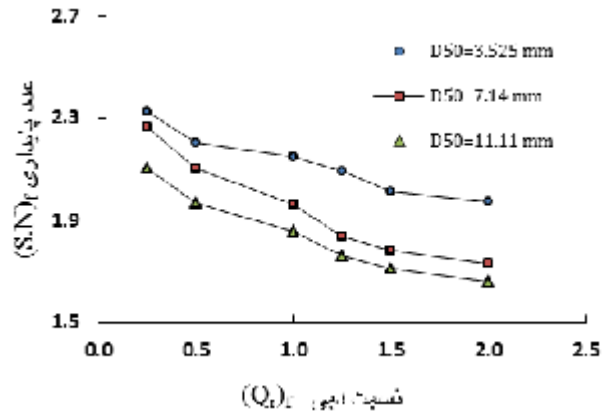


شکل 7- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه حرکت ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

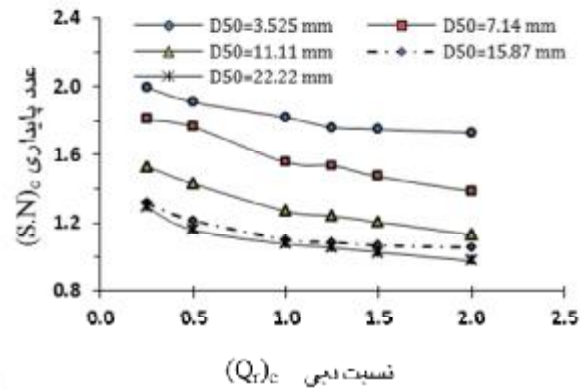


شکل 8- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه شکست ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

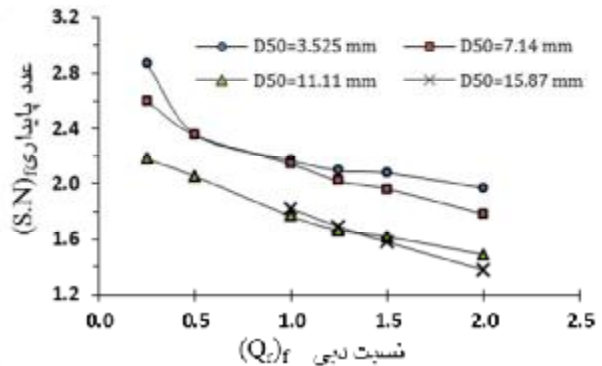
همانگونه که در این اشکال نشان داده شده است، صرف نظر از تأثیر اندازه ذرات سنگین (D_{50})، با افزایش نسبت دبی (Q_r)، عدد پایداری ($S.N$)، کاهش می یابد. زیرا با افزایش نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی قبل از تلاقی، مومنتم و سرعت جریان در کانال فرعی افزایش یافته و برآیند نیروهای وارد بر ذرات بستر در محل تلاقی تغییر می کند، این امر نقشی کمکی در حرکت ذرات ایفا کرده و بنابراین آستانه حرکت ذرات (یا آستانه شکست) در سرعت (V_t) کمتری اتفاق می افتد و بر اساس رابطه عدد پایداری، با کاهش V_t ، عدد پایداری کاهش می یابد. همچنین در یک (Q_r)، ثابت مشاهده گردید که علیرغم بالاتر



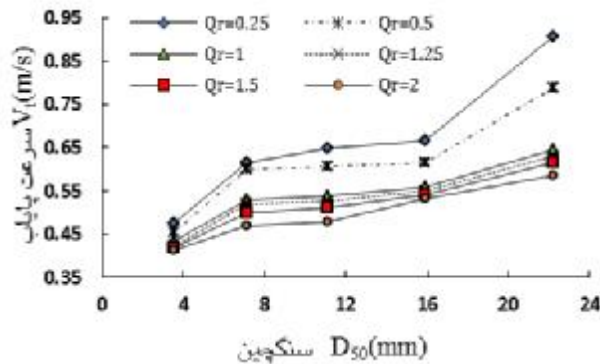
شکل 4- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه شکست ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s).



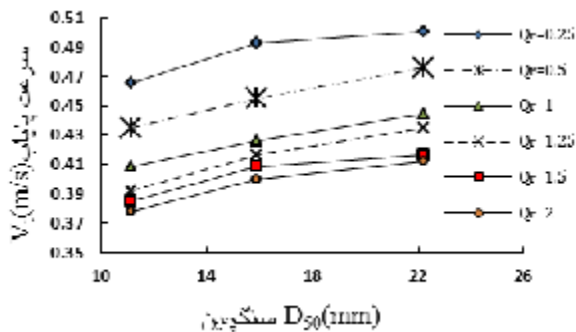
شکل 5- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه حرکت ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).



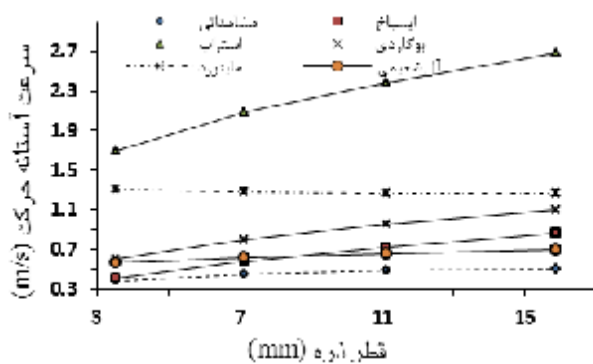
شکل 6- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Q_r در آستانه شکست ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).



شکل 10- تغییرات اندازه متوسط ذرات سنگچین در برابر سرعت پایین دست تلاقی ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).



شکل 11- تغییرات اندازه متوسط ذرات سنگچین در برابر سرعت پایین دست تلاقی ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

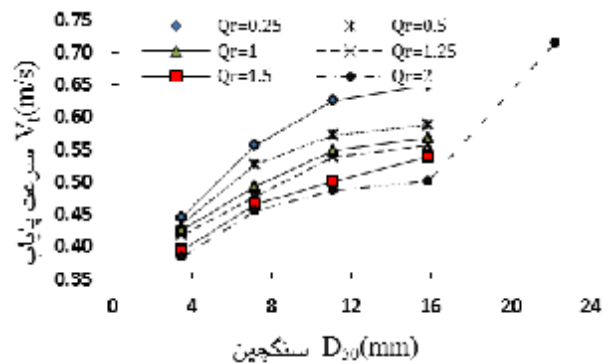


شکل 12- مقایسه سرعت آستانه حرکت مشاهداتی با روابط تجربی.

در شکل 12 مقایسه‌ای بین سرعت آستانه حرکت مشاهداتی با روابط تجربی آستانه حرکت سایر محققین،

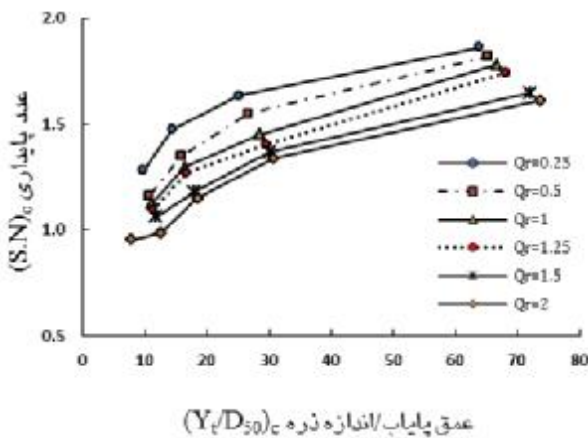
بودن سرعت آستانه حرکت (یا آستانه شکست) در ذرات با قطر بزرگتر، عدد پایداری روند کاهشی داشته، زیرا تأثیر افزایش قطر ذره بیش از تأثیر افزایش سرعت آستانه حرکت ثبت شده برای آن ذره بوده، در نتیجه موجب کاهش عدد پایداری شده است.

تأثیر سرعت پایاب (V_t) بر قطر ذرات سنگچین (D_{50}) به منظور مشاهده تأثیر سرعت آب پایین دست تلاقی روی اندازه قطر ذرات سنگچین که در آستانه حرکت قرار می‌گیرد با توجه به اشکال 9 تا 11، مشاهده می‌شود که در هر نسبت دبی ثابت Q_r ، با افزایش سرعت پایاب، اندازه قطر سنگچین که در آستانه حرکت قرار گرفته است افزایش می‌یابد. همچنین به ازاء هر اندازه قطر سنگچین ثابت، با کاهش نسبت دبی شاخه فرعی به شاخه اصلی در بالادست Q_r ، سرعت جریان در پایین دست تلاقی جهت آستانه حرکت ذرات افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه نسبت دبی افزایش یابد، آستانه حرکت ذرات سنگچین در سرعت کمتری رخ می‌دهد.

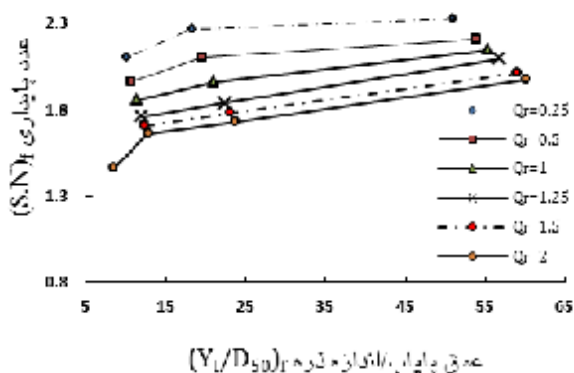


شکل 9- تغییرات اندازه متوسط ذرات سنگچین در برابر سرعت پایین دست تلاقی ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s).

باشد) عدد پایداری افزایش یافته است زیرا هرچه قطر ذره کمتر باشد نیروی مقاوم ناشی از وزن ذره کمتر شده و سرعت آستانه حرکت مخصوص آن قطر ذره خاص کاهش می‌یابد، منتهی از آنجا که قطر ذره نیز کاهش می‌یابد در این شرایط آزمایشگاهی مشاهده گردید که در نهایت نسبت سرعت آستانه حرکت ذره به قطر ذره (که همان عدد پایداری است) روندی کاهشی دارد.



شکل 13- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه حرکت ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s).



شکل 14- تغییرات S.N بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه شکست ($G_s = 2.65$, $Q_t = 25$ lit/s).

ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی روابط، به ازای قطر ذرات مختلف سرعت آستانه حرکت بیشتری را نسبت به سرعت آستانه حرکت مشاهده شده در این آزمایش‌ها برآورد می‌کنند، زیرا این روابط در شرایط بدون کانال فرعی بدست آمده‌اند. وجود جریان در کانال فرعی و نیروی ناشی از آن به حرکت ذره در محل تلاقی کمک نموده و باعث کاهش مقدار سرعت آستانه حرکت نسبت به حالت بدون کانال فرعی می‌گردد.

در ادامه روابط مورد استفاده در جدول 1 آورده

شده است.

جدول 1- روابط تجربی سرعت آستانه حرکت.

$V_c = 1.7(g(G_s - 1)d)^{0.5} \left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{-0.405}$	ایسباخ (1936)
$V_c = 8.45(G_s - 1) \left(\frac{d}{D_s}\right)^{1/3} D_s^{0.5}$	استراب (1953)
$V_c = 1.7(g(G_s - 1)d)^{0.5} \left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{-0.405}$	بوگاردی (1968)
$V_c = \sqrt{gd}(G_s - 1)^{0.5} \left(\frac{D_{50}}{0.3d}\right)^{2/5}$	ماینورد (1987)
$V_c = 0.75(g(G_s - 1)D_{50})^{0.5} \left(\frac{D_{50}}{d}\right)^{-0.34}$	آلضعیمی (1991)

تأثیر نسبت $(\frac{Y_t}{D_{50}})$ بر عدد پایداری (S.N)

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری

سنگچین $(\frac{Y_t}{D_{50}})$ می‌باشد. در این تحقیق اثر شش

نسبت دبی (Q_t)، در دبی‌های کل 25 و 30 لیتر بر ثانیه در

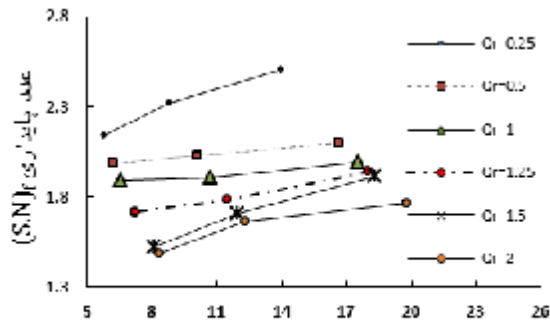
نظر گرفته شده است. اشکال 13 تا 18 تأثیر نسبت $(\frac{Y_t}{D_{50}})$

را بر پایداری سنگچین در آستانه حرکت و

آستانه شکست نشان می‌دهد.

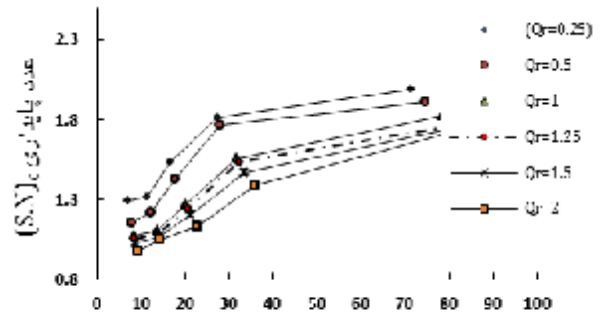
طبق اشکال 13 تا 18 در یک (Q_t)، ثابت مشاهده

گردید که با افزایش $(\frac{Y_t}{D_{50}})$ (که بیانگر کاهش قطر ذره می



شکل 18- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه شکست ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

شکل 18- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه شکست ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

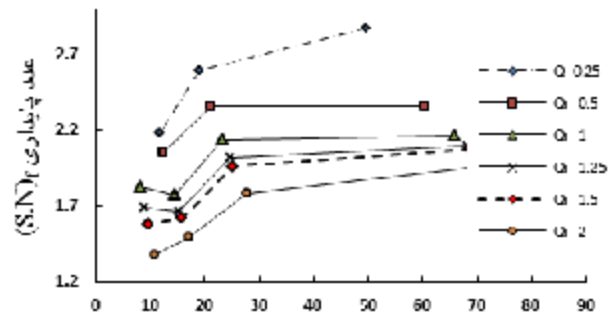


شکل 15- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه حرکت ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).

شکل 15- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه حرکت ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).

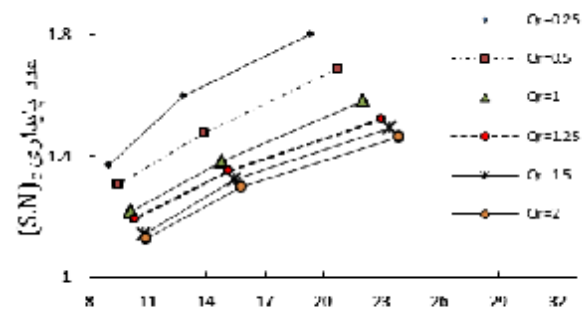
تأثیر چگالی (G_s) بر عدد پایداری ($S.N$)

برای بررسی تأثیر چگالی (G_s)، بر عدد پایداری ($S.N$)، آزمایش‌هایی در نسبت دبی‌های مختلف (Q_t)، در اندازه ذرات (D_{50})، برابر 11/11 و 15/87 و 22/23 میلیمتر با چگالی‌های 2/65 و 1/61 انجام شد که در اشکال 19 تا 22 نتیجه این آزمایش‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش چگالی (G_s)، صرف نظر از تأثیر سایر متغیرها عدد پایداری افزایش می‌یابد. زیرا هرچه چگالی ذره کمتر باشد نیروی مقاوم ناشی از وزن ذره کمتر شده و سرعت آستانه حرکت مخصوص آن ذره نیز خاص کاهش می‌یابد، در این حالت چگالی (G_s)، ذره نیز کاهش می‌یابد و در نهایت در شرایط آزمایشگاهی موجود مشاهده گردید که در یک اندازه ثابت از قطر ذره، نسبت سرعت آستانه حرکت ذره به چگالی ذره (که بیانگر عدد پایداری است) روندی افزایشی دارد بنابراین در شرایط آزمایشگاهی موجود تأثیر کاهش چگالی بیش از تأثیر کاهش سرعت آستانه حرکت بر پایداری ذره می‌باشد. همچنین در یک اندازه ثابت از قطر ذره و در یک چگالی ثابت با افزایش نسبت دبی (Q_t) عدد پایداری ($S.N$)، کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی قبل از تلاقی، مومنتم و سرعت جریان در کانال فرعی افزایش یافته و برآیند نیروهای وارد بر ذرات



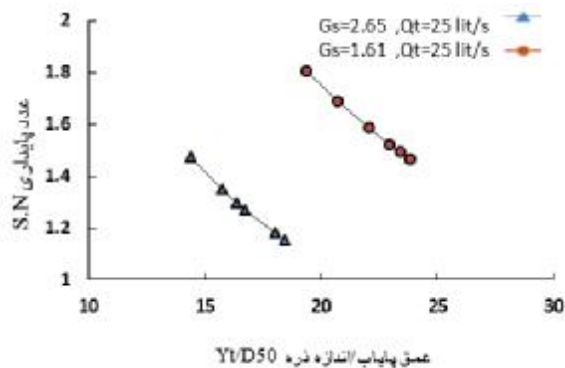
شکل 16- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه شکست ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).

شکل 16- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه شکست ($G_s = 2.65$, $Q_t = 30$ lit/s).

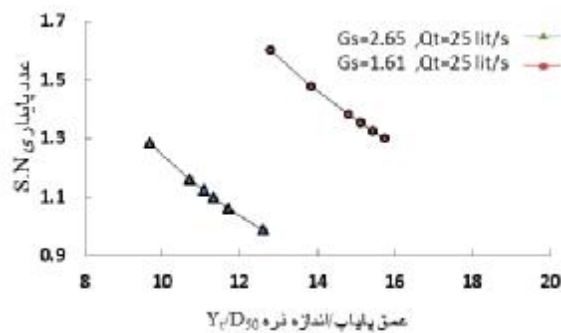


شکل 17- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه حرکت ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).

شکل 17- تغییرات $S.N$ بر حسب تغییرات Y_t/D_{50} در آستانه حرکت ($G_s = 1.61$, $Q_t = 25$ lit/s).



شکل 21- تغییرات عدد پایداری در مقابل تغییرات عمق پایاب به اندازه زره در چگالی‌های مختلف ($D_{50} = 11.1 \text{ mm}$).

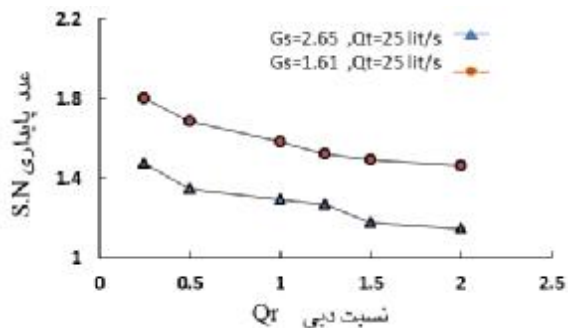


شکل 22- تغییرات عدد پایداری در مقابل تغییرات عمق پایاب به اندازه زره در چگالی‌های مختلف ($D_{50} = 15.8 \text{ mm}$).

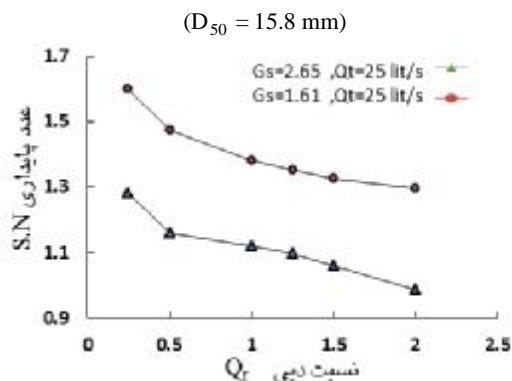
بستر در محل تلاقی تغییر می‌کند این امر نقش کمکی در حرکت ذرات ایفا کرده، بنابراین آستانه حرکت ذرات (یا آستانه شکست) در سرعت (V_i) کمتری اتفاق می‌افتد و بر اساس رابطه عدد پایداری، با کاهش V_i و ثابت بودن سایر پارامترها در این بخش از آزمایش‌ها، عدد پایداری کاهش می‌یابد.

نتایج رگرسیون

بین عدد پایداری (متغیر وابسته) و هر یک از پارامترهای بدون بعد (متغیرهای مستقل) از طریق نرم-افزار DataFit، یک ارتباط آماری مشخص و ضرائب تعیین گردید. برای این تحلیل رگرسیونی 80% داده‌ها برای استخراج معادله و 20% باقیمانده جهت صحت سنجی معادله استفاده شده است که نتایج این تحلیل در جداول 2 و 3 در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست نشان داده شده است.



شکل 19- تغییرات عدد پایداری در مقابل تغییرات نسبت ذره در چگالی‌های مختلف ($D_{50} = 11.1 \text{ mm}$).



شکل 20- تغییرات عدد پایداری در مقابل تغییرات نسبت ذره در چگالی‌های مختلف ($D_{50} = 15.8 \text{ mm}$).

جدول 2- معادلات بدست آمده جهت تخمین عدد پایداری (آستانه حرکت).

تعداد پارامتر مستقل	شماره معادله	رابطه	ضریب همبستگی R ²	میانگین مربعات خطا MSE
1	[6]	$(S.N)_c = 1.374(Q_r)_c^{(-0.104)}$	0/17	0/238
1	[7]	$(S.N)_c = 0.751(Y_t/D_{50})_c^{0.202}$	0/63	0/158
2	[8]	$(S.N)_c = 0.722(Y_t/D_{50})_c^{0.209} \cdot (Q_r)_c^{(-0.119)}$	0/86	0/309

جدول 3- معادلات بدست آمده جهت تخمین عدد پایداری (آستانه شکست).

تعداد پارامتر مستقل	شماره معادله	رابطه	ضریب همبستگی R ²	میانگین مربعات خطا MSE
1	[9]	$(S.N)_f = 1.91(Q_r)_f^{(-0.163)}$	0/61	0/187
1	[10]	$(S.N)_f = 1.498(Y_t/D_{50})_f^{8.979}$	0/18	0/272
2	[11]	$(S.N)_f = 1.423(Y_t/D_{50})_f^{0.101} \cdot (Q_r)_f^{(-0.169)}$	0/84	0/121

استخراج معادله و 20% باقیمانده جهت صحت سنجی معادله استفاده شده است. در این شکل‌ها دو حد بالا و پایین 80 درصد اعتماد نیز ترسیم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود اکثر نقاط در این محدوده قرار دارند که نشان دهنده دقت نسبی روابط فوق می‌باشد.

مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج محققین پیشین (مقایسه ضرائب a و m بدست آمده با ضرائب دیگر محققین) در روش سرعت بحرانی، برای تعیین آستانه حرکت، رابطه 12 بصورت کلی مورد استفاده محققین مختلف قرار گرفته است (a و m ضرائب ثابت و d عمق جریان، مشابه پارامتر y_t در این تحقیق).

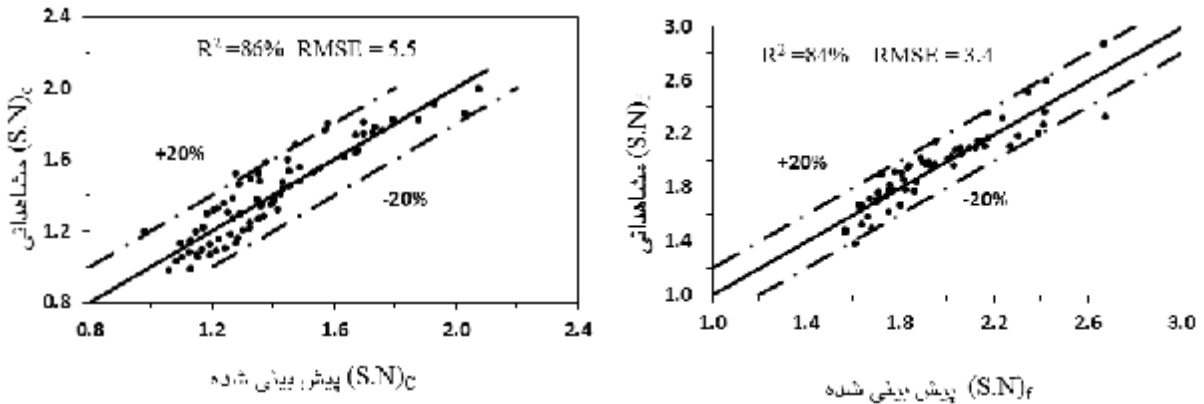
از تعریف عدد پایداری در قبل داریم:

$$\frac{V}{[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}} = a \left(\frac{d}{D_s}\right)^m \rightarrow \frac{V}{[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}} = S.N \quad [12]$$

$$\rightarrow S.N = a \left(\frac{y_t}{D_{50}}\right)^m$$

استخراج رابطه نهایی پیش بینی پایداری ذرات سنگچین، با در نظر گرفتن تأثیر همزمان نسبت دبی کانال فرعی به اصلی در بالادست تلاقی (Q_r) و نسبت (Y_t/D_{50}) برای دستیابی به رابطه‌ای که با در نظر گرفتن تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر، اندازه ذرات سنگچین (D_{50}) را پیش‌بینی نماید و یا با داشتن اندازه ذرات سنگچین میزان پایداری آن سنگچین را پیش بینی نماید از نتایج کلیه آزمایش‌های انجام شده استفاده گردید. داده‌های بدست آمده با روش معادله‌گیری چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار DataFit-9 و MINITAB-14 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در پایان پس از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، روابط زیر استخراج شد که قبلاً در جداول 2 و 3 معادله هر یک از آنها ارائه شده است (روابط 8 و 11). به منظور بررسی دقت روابط 8 و 11 در اشکال 23 و 24 مقادیر $(S.N)$ اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر بدست آمده از روابط فوق ترسیم شده است. در اینجا برای تحلیل رگرسیونی 80% داده‌ها در

در جدول 4 مقادیر ضرایب تعیین شده توسط محققین پیشین، ارائه شده است.



شکل 23-S.N مشاهداتی و پیش بینی شده با رابطه 8. شکل 24-S.N مشاهداتی و پیش بینی شده با رابطه 11.

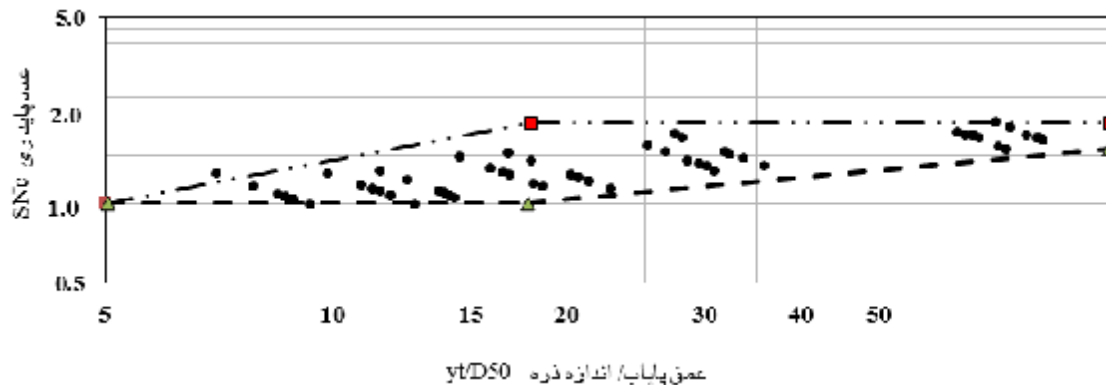
جدول 4- ضرائب α و m در رابطه 9.

می (2003)	الضعیمی (1991)	ماینورد (1987)	بوگاردی (1968)	نیل (1968)	نویسنده
0/125	0/75	3/33	1/7	1/58	a
0/47	0/24	0/10	0/095	0/1	m

و 0/202 می باشند که ضرائب با توجه به جدول 4 نزدیک به ضرائب الضعیمی (1991) می باشد.

$$(S.N)_c = 0.751(Y_t/D_{50})_c^{0.202} \quad [13]$$

شکل 25 نمودار لگاریتمی تغییرات عدد پایداری در آستانه حرکت در برابر $(\frac{Y_t}{D_{50}})$ را به ازای همه ی دبی های آزمایشی نشان می دهد. خط پوش حد بالا و پایین داده ها نیز در این شکل ترسیم شده است. در این صورت ضرائب a و m در رابطه 13 در این تحقیق بترتیب 0/751



شکل 25- نمودار لگاریتمی تغییرات عدد پایداری (S.N) در برابر $(\frac{y_t}{D_{50}})$ در دبی‌های کل 25 و 30 لیتر بر ثانیه.

حرکت ذرات کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش چگالی، به ازای شرایط هیدرولیکی ثابت، نیاز به سنگچین با قطر بزرگتر می‌باشد. در مقایسه، نتایج رابطه پیشنهادی این تحقیق در تعیین میزان پایداری با نتایج رابطه پیشنهادی ال‌ضیعی در شرایط آستانه حرکت مطابقت قابل قبولی را نشان می‌دهد. همچنین تحلیل آماری نشان می‌دهد معادله بدست آمده از نتایج این تحقیق از ضریب همبستگی بالا (0/86) برخوردار است که می‌تواند برای پیش بینی اندازه ذره پایدار و یا تعیین میزان پایداری یک ذره با اندازه مشخص در محل تلاقی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

عدد پایداری افزایش یافته است زیرا هرچه قطر ذره کمتر باشد نیروی مقاوم ناشی از وزن ذره کمتر شده و سرعت آستانه حرکت مخصوص آن قطر ذره‌ی خاص کاهش می‌یابد، منتهی از آنجا که قطر ذره نیز کاهش می‌یابد در این شرایط آزمایشگاهی مشاهده گردید که در نهایت نسبت سرعت آستانه حرکت ذره به قطر ذره (که همان عدد پایداری است) روندی کاهشی دارد. در هر نسبت دبی ثابت Q_r ، با افزایش سرعت پایاب، اندازه قطر سنگچین که در آستانه حرکت قرار گرفته است افزایش می‌یابد و پایداری سنگچین افزایش می‌یابد. به ازاء هر اندازه قطر سنگچین ثابت، با افزایش دبی کل Q_r ، سرعت آستانه

منابع مورد استفاده

- جباری صاحب‌باری آ، 1386. بررسی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در تقاطع کانالها با زوایای اتصال مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف.
- شفاعی بجستان م، 1387. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ولیزادگان ا، 1377. تعیین معیار حفاظت بستر پایین‌دست حوضچه‌های آرامش با استفاده از سنگچین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

Biron P, Best J and Roy AG, 1996. Effect of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. Journal of Hydraulic Engineering 122(3): 676 – 682.

Bogardi JL, 1968. Incipient sediment motion in region of critical mean velocity. Technical Act Academic scientific Hungarian, Budapest 62(2): 1 – 24.

Borghai SM and Jabbari A, 2010. Local scour at open channel junction. Journal of Hydraulic Research 48(4): 538-542.

El-Zaemey AKS, 1991. Sediment transport over deposited bed in sewers. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne.

Ghobadian R and Shafai Bejestan M, 2007. Investigation of sediment patterns at river confluence. Journal of Applied Sciences 7(10): 1372-1380.

- Gurram SK, Karki KS and Hager WH, 1997. Subcritical junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 123(5): 447-455.
- Isbash SV, 1936 . Construction of dam by depositing rock in running water. Pp. 123-136. Second Congress on Large Dams, Communication No.3, Washington D.C.
- Neill CR, 1968. Note on initial movement of coarse uniform bed material. *Journal of Hydraulic Research IHAR* 6: 137-176.
- May RWP, 2003. Preventing sediment deposition in inverted sewer siphons. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 135(3): 283-290.
- Maynord ST, 1987. Stable riprap for open channel flows. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Shafai Bejestan M and Hemmati M, 2008. Scour depth at river confluence of unequal bed level. *Journal of Applied Sciences* 8(9): 1766-1770.
- Shields A, 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement . English translation by WP Ott and JC Van Uchelen, publication 167, California Institute of Technology.
- Straub LG, 1953. Some observation for sorting of river sediments. *Trans American Geophysical Union* 16(1): 463-467.