

استخراج معیار پایداری ریپرپ در زیر جت‌های پرتابی مستطیلی شکل

رضا مؤمنی وصالیان^{۱*}، محمود شفاعی بجستان^۲، سید حبیب موسوی جهرمی^۳

۱- دانشجوی دکترای رشته ساختمانهای توزیع و انتقال آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

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

۳- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* تهران، صندوق پستی ۱۱۸-۱۴۱۴۵

rm-vesalian@yahoo.com

چکیده- یکی از معمول‌ترین روشهای استهلاک انرژی به‌ویژه در سدها، استفاده از پرتابه‌های جامی شکل است. بر اثر ریزش جت و برخورد آن با بستر رودخانه، پدیده آبشستگی رخ می‌دهد و برای کنترل این پدیده استفاده از ریپرپ می‌تواند مؤثر واقع شود. هدف اصلی این مقاله بررسی پایداری ذرات رسوبی درشت دانه یا ریپرپ است. برای این منظور، ابتدا معادله کلی شرایط آستانه حرکت و شکست ریپرپ با استفاده از آنالیز ابعادی و تحلیل پایداری ذره استخراج شد. در این معادلات پارامتر بدون بعد عدد پایداری، که با SN نشان داده می‌شود به صورت تابعی از متغیرهای دیگر نشان داده شده و سپس با انجام آزمایشهای متعدد در مدل فیزیکی در شرایط هیدرولیکی و با اندازه‌های رسوب متفاوت، نتایج تحلیل شده است. در این بررسیها تغییرات SN نسبت به تک‌تک متغیرها بررسی شده و مدل‌های خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی شرایط شکست ریپرپ به‌دست آورده شده‌اند. همچنین با انجام آزمایشهایی معیار مناسب مصالح برای جلوگیری از خروج مصالح بستر از فضای بین قطعات ریپرپ ارائه شده است.

کلید واژگان: معیار پایداری، ریپرپ، جت ریزشی، پرتابه جامی شکل.

۱- مقدمه

یا با سرریزهای شوت^۲ منتهی به جام پرتاب کننده^۳ یا با سرریزهای روزنه‌ای یا دریچه‌های مستقر در ترازهای پایین سد انجام می‌شود. انتخاب نوع سرریز مشکل مهمی نیست، بلکه مسأله اصلی آن است که جریان سیلاب به نحوی تخلیه شود که پدیده آبشستگی در پایین‌دست سازه رخ ندهد یا آبشستگی محدود باشد. جریان آب به صورت جت آزاد پراثری ریزش کرده و در محلی در پایین‌دست سد به بستر رودخانه برخورد می‌کند^۴. در این محل، حرکت مواد بستر به دلیل عدم استهلاک کامل انرژی جت،

در سالهای اخیر نیاز به کاهنده‌های انرژی به منظور استهلاک انرژی جت آب ناشی از سیلابهایی که از روی سدها عبور می‌کنند، مورد توجه قرار گرفته است. آبهای اضافی مخازن سدها به‌وسیله سرریز به یک سیستم استهلاک انرژی یا ناحیه‌ای در پایین‌دست رودخانه انتقال داده می‌شود. برای تخلیه سیلاب از کنار یا از روی سدها، روشهای متعددی وجود دارد. این کار معمولاً با سرریزهای آزاد آبشاری^۱ مستقر در تراز نزدیک به تاج سد

2. Chute Spillway
3. Flip Bucket
4. Plunging Jet

1. Overflow Spillway

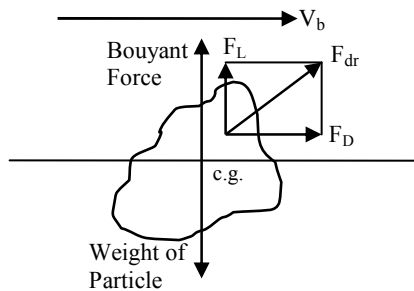
تحلیل پایداری ذرات رسوبی و تحلیل ابعادی، با به‌کارگیری تئوری باکینگهام استخراج و سپس ضرایب این معادله با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آماری به‌دست آمده است.

۲- مبانی نظری

۲-۱- استخراج رابطه کلی بر مبنای تحلیل

پایداری ذره رسوبی

ذره‌ای را در نظر بگیرید که در بستر کانالی قرار دارد و جریان آب از روی آن عبور می‌کند (شکل ۱). خطوط جریان، در حین عبور از روی ذره از یکدیگر جدا شده و منطقه‌ای را در پشت ذره به‌وجود می‌آورند که فشار آب در آنجا کمتر از فشار آب در جلوی ذره است. بنابراین اختلاف فشار در دو طرف ذره باعث به‌وجود آمدن نیرویی می‌شود که از طرف آب به ذره وارد و موجب حرکت آن می‌شود. این نیرو که در شکل ۱ با F_D نشان داده شده، به نیروی رانش^۴ موسوم است. جهت این نیرو هم‌جهت با حرکت آب است.



شکل ۱ نیروهای وارد بر ذره در جریان آب

نیروی دیگری که از سوی آب بر ذره وارد و موجب حرکت آن به سمت بالا می‌شود نیروی بالابرنده^۵ است که با F_L نشان داده شده است. برآیند دو نیروی F_D و F_L موجب حرکت ذره می‌شود که در شکل ۱ با F_{dr} نشان داده شده است. از طرفی نیروی مقاوم در مقابل حرکت

باعث ایجاد حفره آبشستگی شده و در نهایت ممکن است منجر به شکست سرریز شود. یکی از مرسوم‌ترین روشهای استهلاک انرژی، ایجاد استخر عمیق^۱ در محل برخورد جت با بستر رودخانه است. این امر نیازمند تخمین ابعاد استخر است. میسن و آروموگان (۱۹۸۵) مجموعه‌ای از روابط را جمع‌آوری و بر روی آنها تجزیه و تحلیل‌هایی ارائه کردند. از جمله این روابط، روابط شوکلیچ (۱۹۲۸)، ورونس (۱۹۳۷)، گایجر (۱۹۳۹)، اگنرگر (۱۹۴۴)، هارتونگ (۱۹۵۷)، دامبل (۱۹۶۶)، اسمیت (۱۹۶۷)، تاراموویچ (۱۹۷۸) بود. محققان دیگری نیز پدیده آبشستگی را مطالعه کرده‌اند که می‌توان به این موارد اشاره کرد: هافمن (۱۹۹۸)، بوهرر و همکاران (۱۹۹۸)، راجاراتنام و همکاران (۲۰۰۱)، راجاراتنام و مازورک (۲۰۰۳)، هگر و کانپا (۲۰۰۳)، درگاهی (۲۰۰۳)، هگر و مینور (۲۰۰۵)، عظمت اله و همکاران (۲۰۰۵)، پاگیلارا و همکاران (۲۰۰۶)، قدسیان و همکاران (۱۳۷۷)، فرهودی و ناصحی (۱۳۷۸)، قدسیان و همکاران (۱۳۸۰)، نصیری صالح و منتظر (۱۳۸۰) و مؤمنی وصالیان (۱۳۸۵).

به رغم مطالعات زیاد درباره آبشستگی ناشی از جت، اطلاعات اندکی در باره پایداری ذرات و به‌ویژه در خصوص مکانیزم آستانه حرکت^۲ یا آستانه شکست ذرات^۳ در دسترس است. البته بلایسدل و اندرسون (۱۹۹۱) و شفاعی بجستان و آلبرتسون (۱۹۹۳) در خصوص آستانه حرکت ذرات در زیر جت‌های مدور مطالعاتی را انجام داده‌اند، اما در زمینه جت‌های مستطیلی شکل، تاکنون مطالعه‌ای انجام نشده است. لذا شناخت این مکانیزم و قانونمند کردن آن برای تثبیت مصالح آبرفتی، با استفاده از پوشش ریپرپ بسیار ضروری و هدف اصلی این مقاله است. در این مطالعه ابتدا معادله کلی برای آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات رسوبی در پایین دست جت‌های مستطیلی با استفاده از دو روش

1. Plunge Pool
2. Incipient Motion
3. Incipient Failure

4. Drag Force
5. Uplift Force

با توجه به مطالب فوق، در این مطالعه نیز سعی شده تا V_b با متغیر دیگری نظیر سرعت جت در محل نفوذ به آب یا V_p مرتبط شود، زیرا می‌توان V_p را با استفاده از معادله انرژی با تقریب قابل قبولی تعیین کرد. برای رسیدن به این هدف، از نظریه جت‌های مستغرق استفاده شده است. در جت‌های مستغرق معمولاً لایه اختلاط بین دو جریانی که با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کنند، اتفاق می‌افتد. این ناپیوستگی در جریان ناپایدار است و عرض ناحیه اختلاط در پایین‌دست توسعه پیدا می‌کند. جت مستغرق، با دو محدوده مشخص می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. در ناحیه در حال تکامل، سرعت حداکثر جریان با سرعت انتشار برابر است و هسته مرکزی جت متلاشی نشده و در ناحیه تکامل یافته، سرعت حداکثر جریان کاهش می‌یابد. این ناحیه در محدوده فاصله $6b_u > x$ ایجاد می‌شود. توزیع سرعت در این ناحیه از روابط زیر به دست می‌آید:

$$u = u_m \exp(-72\eta), \quad \frac{u_m}{U_1} = 6 \frac{b_u}{x} \quad (4)$$

و برای جت‌های مسطح:

$$u = u_m \exp(-56\eta), \quad \frac{u_m}{U_1} = \sqrt{6 \frac{b_u}{x}} \quad (5)$$

که در آنها b_u قطر لوله در جت‌های مدور یا ضخامت جت در جت‌های مسطح در $x=0$ ، u سرعت متوسط در جهت x ، u_m بیشینه سرعت در هر بخش x یا سرعت در امتداد محور مرکزی، U_1 سرعت انتشار در $x=0$ و $\eta = z/x$ (z فاصله عمودی از محور مرکزی جت) است (هافمن و ورهیج، ۱۹۹۷).

با جایگزینی پارامترهای تعریف شده می‌توان نوشت:

$$\frac{V_b}{V_p} = k \sqrt{\frac{b_u}{P_L}} \quad (6)$$

که در آن V_b معادل u_m ، V_p معادل U_1 ، P_L معادل x و k ضریب ثابت است.

ذره، وزن اشباع ذره است. در آستانه حرکت ذره، باید نسبت نیروی محرک به مقاوم عدد ثابتی باشد. با این استدلال می‌توان شرایط آستانه حرکت ذره را به صورت زیر بدست آورد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴):

$$\frac{V_b}{\sqrt{g(S_s - 1)d_s}} = C \quad (1)$$

در این رابطه V_b سرعت در نزدیکی‌های بستر فرسایش‌پذیر، g شتاب ثقل، S_s چگالی نسبی ذرات، برابر $\frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ ، d_s نماینده اندازه ذرات بستر و C ضریب ثابتی است که اگر از یک حد بحرانی بیشتر شود، ذرات به حرکت در می‌آیند. عبارت سمت چپ این رابطه به نام عدد فرود ذره^۱، عدد ذره^۲ یا عدد پایداری^۳ شناخته می‌شود که در واقع نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم است.

کاربرد این رابطه به دلیل وجود سرعت در مجاورت بستر، مشکل است و محققان سعی کرده‌اند که سرعت بستر، با سرعت متوسط جریان در کانالها یا سرعت خروجی جت‌ها مرتبط شود. از جمله می‌توان به مطالعات شفاعی بجستان و آلبرتسون (۱۹۹۳) برای جت‌های مدور اشاره کرد:

$$\frac{V}{\sqrt{g(S_s - 1)d_s}} = C \left(\frac{H}{D} \right) \quad (2)$$

که در آن H ارتفاع محور جت تا سطح پایاب، D قطر جت و V سرعت خروجی جت است. هفکس و پوره (۱۹۶۷) چنین نشان دادند که:

$$\frac{V}{\sqrt{g(S_s - 1)d_s}} = C \left(\frac{P_L}{D} \right) \quad (3)$$

که در آن P_L طول نفوذ در استخر و برابر $\frac{h_t}{\sin \theta}$ ، h_t عمق پایاب، θ زاویه برخورد جت با سطح آب و V سرعت خروج جریان از لوله است.

1. Densimetric Froude Number
2. Sediment Number
3. Stability Number

که در آن b ضخامت جت در پرتابه است.

با جاگذاری V_b از معادله ۶ در معادله ۱، معادله ۷ به دست می‌آید:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g(S_s - 1)d_s}} = c \left(\frac{P_L}{b_u} \right)^{1/2} \quad (7)$$

سرعت در لحظه نفوذ به پایاب، با در نظر گرفتن سرعت در پرتابه و اعمال رابطه انرژی و با صرف نظر کردن از افت انرژی به صورت نظری، از رابطه $V_p = (V^2 + 2g\Delta Z)^{1/2}$ قابل محاسبه است، که در آن V سرعت در پرتابه و ΔZ اختلاف ارتفاع بین پرتابه و سطح پایاب است. به دلیل هوادهمی جریان در حین پرتاب، اندازه‌گیری یا تخمین ضخامت جت (b_u) در لحظه ورود به پایاب دشوار است. لذا اگر ضخامت جت در پرتابه در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت:

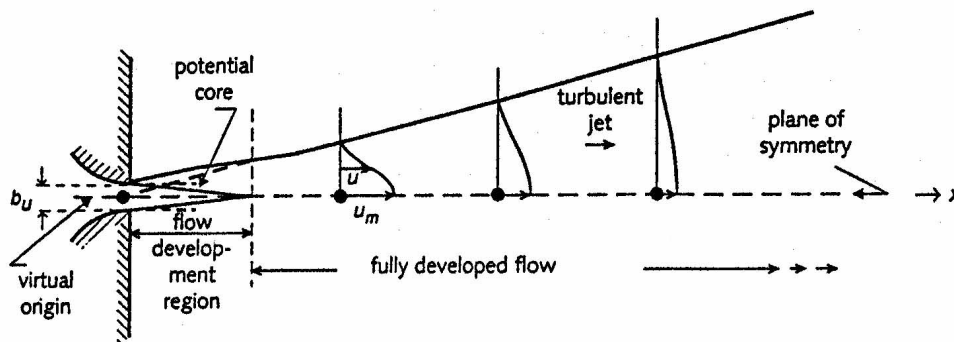
$$\frac{V_p}{\sqrt{g(S_s - 1)d_s}} = f \left(\frac{P_L}{b} \right) \quad (8)$$

۲-۲- استخراج رابطه کلی بر مبنای تحلیل ابعادی

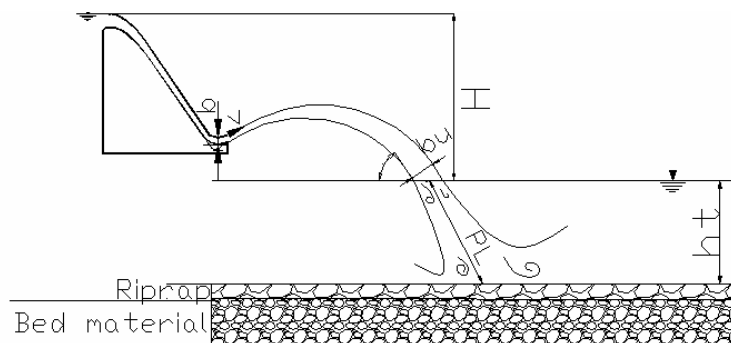
شکل ۳ طرح کلی تحقیق را نشان می‌دهد. متغیرهای متعددی بر مسأله پایداری ذرات در زیر جت‌ها مؤثرند، از جمله: q دبی واحد عرض، ρ_s جرم حجمی مصالح بستر، ρ_w جرم حجمی آب، d_s قطر ذرات، μ لزجت آب، P_L طول نفوذ جت، b ضخامت جت در پرتابه، H ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب مخزن و پایاب، R شعاع پرتابه جامی شکل و ϕ زاویه پرتاب پرتابه جامی شکل.

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$f(q, \rho_s, \rho_w, P_L, d_s, g, b, H, R, \theta, \phi, \mu) = 0 \quad (9)$$



شکل ۲ مشخصات جریان جت (Hoffmans and Verheij, 1997)



شکل ۳ شمای کلی جت پرتابی و پارامترهای مؤثر

طراحی ریپرپ با استفاده از رابطه ۱۱ نیازمند محاسبه V_p است. از طرفی استفاده از دبی واحد عرض در محل پرتابه به جای V_p در شرایطی آسان‌تر است که در نتیجه می‌توان رابطه زیر را استخراج کرد:

$$\frac{q_c}{b\sqrt{g(S_s-1)d_s}} = f\left(\frac{q_c}{\sqrt{gP_L^3}}, \frac{P_L}{b}, \frac{P_L}{H}, \frac{P_L}{d_s}\right) \quad (12)$$

که در آن q_c مقدار دبی بحرانی در واحد عرض در شرایط آستانه شکست ریپرپ می‌باشد.

در این مقاله قطر میانه ذرات به عنوان نماینده اندازه ذرات در نظر گرفته شده است ($d_s=d_{50}$).

۳- مواد و روشها

برای رسیدن به اهداف این مقاله یعنی قانونمندی شرایط آستانه شکست ذرات رسوبی در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل، مدل فیزیکی مطابق شکل ۴ ساخته شد. این مدل مخزنی مکعبی به ابعاد $1 \times 1 \times 2.2$ متر (طول \times عرض \times ارتفاع) دارد که سه وجه آن با مصالح بنایی ساخته شده و وجه دیگر آن سکویی به ارتفاع ۱ متر است که ارتفاع این سکو با احداث قاب فلزی به 2.2 متر رسیده و سرریز بر روی این سکو نصب شده است. آب توسط لوله فلزی ۶ اینچی از منبع به مخزن مدل پمپ شده و برای کنترل جریان، یک شیر ۶ اینچ فلزی بر روی آن نصب شده است. سرریز از نوع اوجی است و در انتهای شوت دارای پرتابه جامی شکل می‌باشد. اسکلت از جنس چوب است و بر روی آن صفحه‌ای فلزی کوبیده شده است. مشخصات این سرریز براساس معیارهای سازمان احیای اراضی امریکا (U.S.B.R, 1976) طراحی شده است. عرض سرریز 0.25 متر، ارتفاع آن 0.75 متر و شعاع انحنای باکت 0.1 متر است. جریان عبوری از روی سرریز به داخل یک فلوم پرتاب می‌شود. طول فلوم ۶ متر است. یک وجه فلوم به‌طورکامل با مصالح بنایی ساخته شده است. ۴ متر از وجه دیگر، قابی فلزی و شیشه‌ای است تا بتوان داخل فلوم را دید و ۲ متر انتهایی

با انتخاب سه متغیر تکراری و با به‌کار بردن تئوری باکینگهام، رابطه بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$f\left(\frac{Vb}{v}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{q}{\sqrt{gP_L^3}}, \frac{P_L}{d_s}, \frac{P_L}{H}, \frac{P_L}{R}, \frac{P_L}{b}, \theta, \phi\right) = 0 \quad (10)$$

از ترکیب متغیرهای $\frac{P_L}{b}$ و $\frac{\rho_s}{\rho_w}$ ، $\frac{q}{\sqrt{gP_L^3}}$ ، $\frac{P_L}{d_s}$ متغیر

بدون بعد $\frac{V}{\sqrt{g(S_s-1)d_s}}$ به دست می‌آید که در آن

V سرعت جت است. سرعت جت می‌تواند سرعت جت در باکت (V)، سرعت جت در لوله‌نظـه نفوذ به

پایاب (V_p) یا سرعت در مجاورت بستر (V_b) باشد. این

متغیر اگر به شکل $\frac{V_b}{\sqrt{g(S_s-1)d_s}}$ نوشته شود،

همان عدد فرود ذره است که قبلاً با روش تحلیل پایداری ذرات رسوبی استخراج شد.

متغیر $\frac{Vb}{v}$ عدد رینولدز است که در این پژوهش به دلیل

وجود تلاطم جریان، بی‌تأثیر است. R ، ϕ و θ نیز در این تحقیق مقادیری ثابت بوده و تغییر نمی‌کنند و لذا در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین برای متغیرهای بدون بعد می‌توان تابع زیر را تعریف کرد:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g(S_s-1)d_s}} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gP_L^3}}, \frac{P_L}{b}, \frac{P_L}{H}, \frac{P_L}{d_s}\right) \quad (11)$$

عدد پایداری است و با SN مشخص می‌شود.

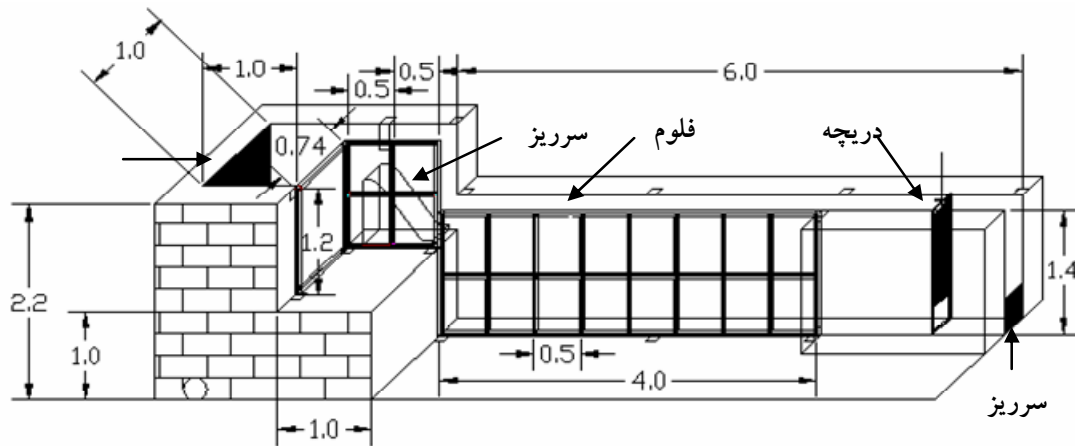
SN به عنوان تابعی از متغیرهای بدون بعد در شرایط خاصی از حرکت ذرات قابل بررسی است. در این مقاله این شرایط به دو شکل تعریف می‌شود. ابتدا شرایط آستانه حرکت که شرایطی است که قطعات ریپرپ در جای خود تکان بخورند اما جابه‌جایی نداشته باشند و دیگری آستانه شکست است، یعنی شرایطی که اولین قطعات ریپرپ حرکت کرده و مصالح تحت پوشش ریپرپ بیرون بیایند.

فلوم W.S.C نصب شده و منحنی دبی-اشل سرریز بر اساس آن به دست آمده است. محدوده تغییرات دبی ۵ تا ۲۰ لیتر در ثانیه بوده است.

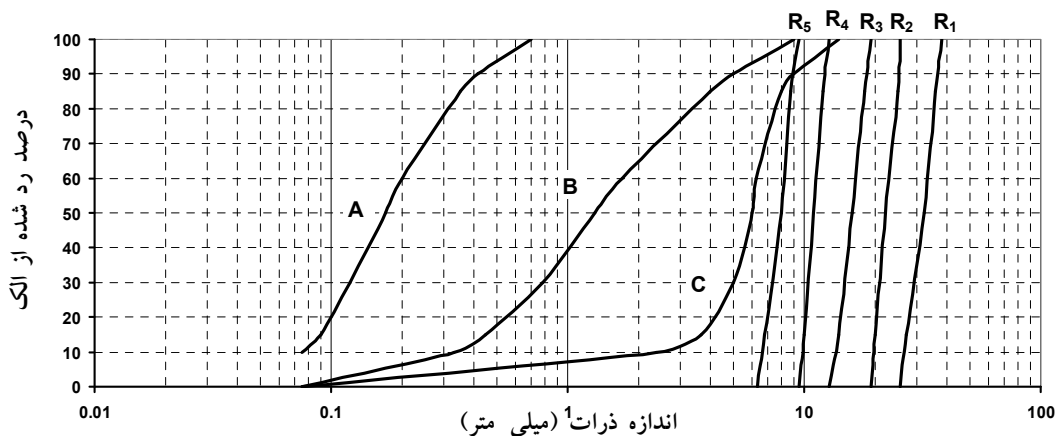
از سه نوع مصالح غیریکنواخت که با نامهای A، B، و C نام گذاری شده، به عنوان مصالح بستر و از پنج نوع مصالح یکنواخت که از R_1 تا R_5 نام گذاری شده اند به عنوان مصالح ریپرپ استفاده شده است. شکل ۵ منحنیهای دانه بندی مصالح بستر و ریپرپ را نشان می دهد. جدول ۱ نیز مشخصات مصالح بستر را نشان می دهد. در این جدول σ_p انحراف استاندارد هندسی و γ_s وزن مخصوص ذرات است.

نیز با مصالح بنایی ساخته شده است. شیشه مورد استفاده از نوع لمینت با ضخامت ۸ میلی متر است. عرض فلوم همان عرض سرریز و برابر ۰/۲۵ متر و ارتفاع فلوم برابر ۱/۴ متر است.

به منظور کنترل سطح آب داخل فلوم از دریچه ای کشویی استفاده شده است. این دریچه با ابعاد $۱ \times ۰/۲۵$ متر (ارتفاع \times عرض) در انتهای فلوم نصب شده است. برای کاهش انرژی موجود روی دریچه، ارتفاع آب در پایین دست دریچه افزایش داده شده است. این کار با نصب سرریزهای مستطیلی در انتهای فلوم انجام می شود. برای اندازه گیری جریان در کانال پایین دست مدل، یک



شکل ۴ امتداد طولی مدل فیزیکی این پژوهش (طولها بر حسب متر)



شکل ۵ منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در آزمایشها

جدول ۱ مشخصات مصالح بستر

مصالح	σ_g	γ_s
A	۱/۹۷	۲/۷۳
B	۲/۹۵	۲/۷۴
C	۱/۴۵	۲/۶۲

ریپرپ R_1 به دلیل بزرگی اندازه در هیچ آزمایشی شکسته نشد، لذا آزمایشهای ریپرپ با مصالح R_2 تا R_5 انجام شد.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- نمودارهای پراکندگی متغیرهای بدون بعد

در مقابل SN_{if}

شکل ۶ نمودارهای پراکندگی متغیرهای بدون بعد در مقابل SN_{if} (عدد پایداری در لحظه شکست ریپرپ) را برای مصالح مختلف ریپرپ نشان می‌دهد. از نمودارهای پراکندگی مشخص می‌شود که تغییرات SN بر اثر تغییرات متغیرهای بدون بعد، در هر یک از مصالح R_2, R_3, R_4 و R_5 قویاً خطی است. البته در متغیر $\frac{q}{\sqrt{gP_L^3}}$ پراکندگی

کمی بیشتر است. از طرفی با تغییر اندازه ریپرپ از مصالح R_2 تا R_5 ، ضمن حفظ شکل ارتباط، داده‌ها بر روی نمودار جابه‌جا شده و پراکندگی بین داده‌ها ایجاد شده است. لذا با احتساب تمامی داده‌ها، نه تنها ارتباط خطی ضعیف شده، بلکه ارتباط معنادار مشخصی مشاهده نمی‌شود. بنابراین مدل‌های تک متغیره قوی برای پیش‌بینی SN به دست نمی‌آید، ضمن این‌که با توجه به متغیرهای به دست آمده مدل‌های تک متغیره، پوشش کاملی بر روی پارامترهای دخیل در پدیده نیز ندارند، لذا مدل‌های چندمتغیره برای پیش‌بینی SN مطرح می‌شود. جدول ۲ ضرایب همبستگی بین SN_{if} و متغیرهای دیگر را نشان می‌دهد.

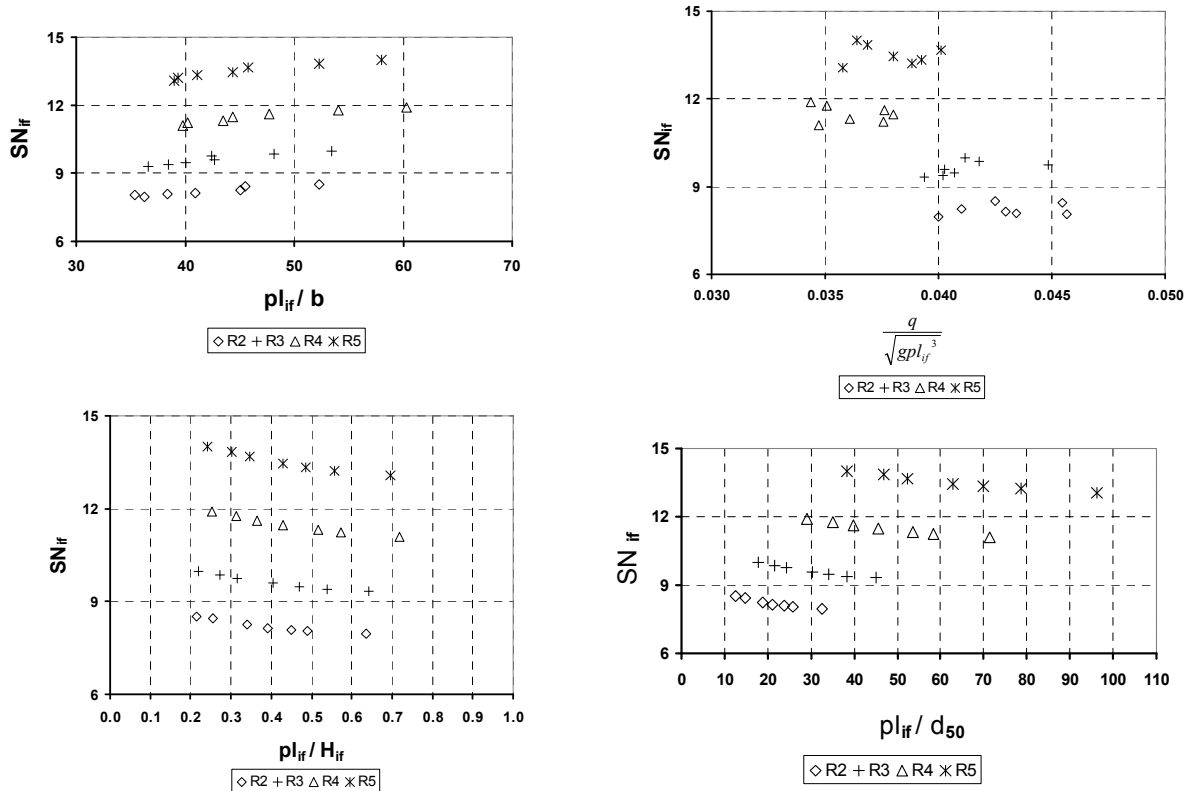
اعداد جدول حاکی از ارتباط خطی ضعیف بین SN_{if} و متغیرهای دیگر است.

جدول ۲ ضرایب همبستگی بین SN_{if} و متغیرهای بی بعد

	$\frac{P_{Lif}}{b}$	$\frac{P_{Lif}}{d_{50}}$	$\frac{q}{\sqrt{gP_{Lif}^3}}$	$\frac{P_{Lif}}{H_{if}}$
SN_{if}	۰/۳۶۸	۰/۷۰۵	-۰/۶۹۴	۰/۰

۴- روش انجام آزمایشها

ابتدا لایه‌های به ضخامت ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر از مصالح A، B یا C در کف فلوم به عنوان مصالح بستر ریخته می‌شود. سطح آن با ماله صاف و با الوار کوبیده می‌شود، سپس لایه‌های از مصالح ریپرپ انتخاب شده به ضخامت $2d_0$ بر روی آن ریخته می‌شود و پس از پخش یکنواخت، کوبیده می‌شود. آنگاه با بستن دریچه و برقراری جریان کم، فلوم از آب پر می‌شود تا عمق پایاب بالا بیاید و از حرکت ذرات ریپرپ جلوگیری شود. سپس توسط شیر کنترل، دبی مورد نظر تنظیم شده و جت به داخل فلوم رها می‌شود. پس از اطمینان از تنظیم دبی، عمق پایاب به آهستگی کاهش می‌یابد. برای این منظور دریچه پایین دست به تدریج و آرام‌آرام، با فواصل زمانی باز شده و پس از هر بار کاهش عمق پایاب، شرایط جریان برای مدتی ثابت نگه داشته و حرکت مصالح رسوبی مشاهده می‌شود. کاهش عمق پایاب تا زمانی که آستانه حرکت و سپس آستانه شکست ذرات مشاهده شود ادامه می‌یابد. همزمان با شکست ریپرپ، مصالح بستر خارج شده و جریان داخل فلوم گل‌آلود می‌شود. رقوم سطح آب در شرایط آستانه حرکت و آستانه شکست یادداشت می‌شود. برای اندازه‌گیری زاویه برخورد جت با پایاب، عکسهای دیجیتالی با قدرت تفکیک بالا از آزمایشها تهیه و سپس این عکسها به نرم‌افزار اتوکد منتقل و با به‌کارگیری قابلیت‌های این نرم‌افزار، زاویه برخورد جت با پایاب اندازه‌گیری می‌شود. برای مقاصد عملی، این زاویه با ترسیم مماس بر منحنی مسیر حرکت جت در نقطه برخورد به پایاب قابل محاسبه است. از شاخص if برای مشخص کردن شرایط آستانه شکست استفاده شده است.

شکل ۶ نمودارهای پراکندگی SN_{if} در مقابل متغیرهای بدون بعد

روابط ۱۳ و ۱۴ شرایط شکست ریپرپ را نشان می‌دهند، لذا می‌توان از این روابط برای طراحی ریپرپ استفاده کرد. این روابط برای کنترل در سازه‌های موجود نیز به کار می‌روند، به طوری که اگر شرایط جریان، خصوصیات هندسی پرتابه و مصالح رسوبی طوری باشد که رابطه ۱۳ یا ۱۴ برقرار گردد، مصالح در حال فرسایش بوده و باید مصالح با اندازه درشت‌تری استفاده شود.

۳-۵- مدل پیش‌بینی دبی بحرانی پرتابه در آستانه شکست ریپرپ

با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبلی ذکر شد، می‌توان به جای V_p از دبی در واحد عرض در محل پرتابه استفاده کرد. در این صورت با استفاده از داده‌های این مطالعه مدل‌های متعددی بررسی شد که در نهایت رابطه ۱۵ به دست آمد:

۲-۵- مدل‌های پیش‌بینی شرایط شکست ریپرپ

به منظور بررسی شرایط شکست ریپرپ، مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی متعددی بررسی شد که از بین آنها، مدل‌های زیر به دلیل برازش بهتر انتخاب شد:

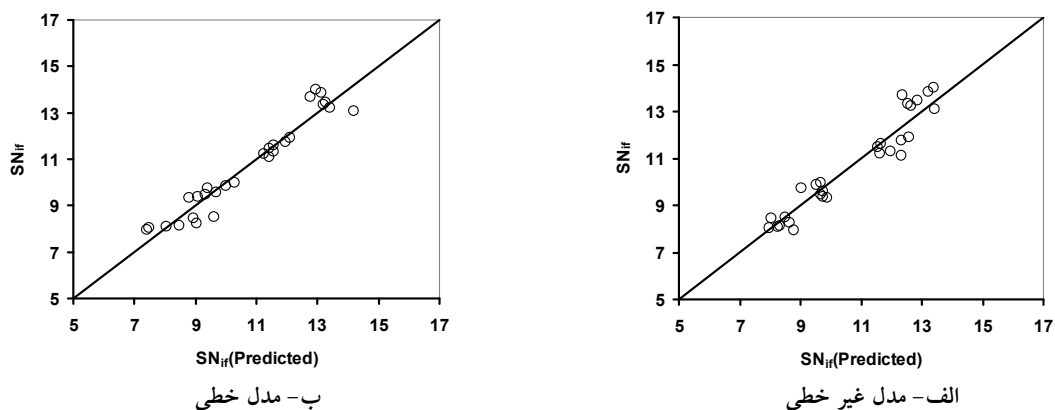
$$SN_{if} = 16.649 + 0.108 \left(\frac{P_{lif}}{d_{50}} \right) - 11.185 \left(\frac{P_{lif}}{H_{if}} \right) - 141.34 \left(\frac{q}{\sqrt{gp_{lif}^3}} \right) \quad (13)$$

$$R^2 = 0.93$$

$$SN_{if} = 0.167 \left(\frac{P_{lif}}{d_{50}} \right)^{0.337} * \left(\frac{P_{lif}}{b} \right)^{0.777} \quad (14)$$

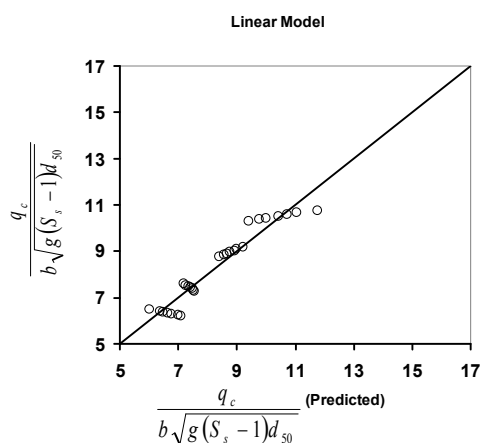
$$R^2 = 0.92$$

در شکل ۷ پیش‌بینی‌های مدل‌ها با مشاهدات مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هم مدل خطی و هم مدل غیرخطی در پیش‌بینی شرایط شکست موفق هستند، اما متغیرهایی که به کار می‌برند متفاوتند. استفاده از همان متغیرهای مدل خطی برای مدل غیرخطی نتیجه مناسبی به دست نداد.

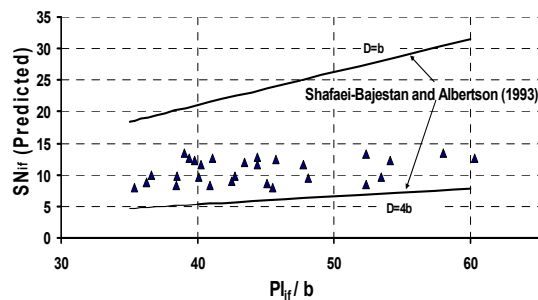


شکل ۷ مقایسه پیش‌بینی مدل‌های خطی و غیرخطی شرایط شکست ریپرپ با مشاهدات

عدد پایداری در جت‌های دایره‌ای بیشتر است و این می‌تواند به دلیل اختلاف ماهیت و هندسه جت‌های استفاده شده در دو تحقیق و نیز استفاده از پارامتر b به جای D باشد.



شکل ۸ مقایسه پیش‌بینی دبی بحرانی با مقادیر مشاهدات



شکل ۹ مقایسه نتایج با رابطه ۱۶

$$\frac{q_c}{b\sqrt{g(s_s - 1)d_{50}}} = 7.394 + .097\left(\frac{P_{lif}}{d_{50}}\right) - 7.174\left(\frac{P_{lif}}{H_{lif}}\right) \quad (15)$$

$$R^2=0.92$$

اگر شدت جریان در پرتابه از شدت جریان محاسبه شده بزرگتر شود، شکست ریپرپ اتفاق خواهد افتاد. کاربرد معادله ۱۵ نیز مانند روابط ۱۳ و ۱۴ است، با این تفاوت که از این رابطه می‌توان با توجه به مصالح رسوبی بستر و شرایط هندسی پرتابه، برای تعیین حداکثر دبی در واحد عرض پرتابه استفاده کرد، به طوری که اگر دبی در واحد عرض از آن بیشتر باشد، مواد بستر در حال فرسایش بوده و لازم است از ریپرپ استفاده شود. در شکل ۸ پیش‌بینی‌های رابطه ۱۵ با مشاهدات مقایسه شده است. شفاعی و آلبرتسون (۱۹۹۳) رابطه زیر را برای شرایط شکست ریپرپ در زیر جت‌های مدور ارائه کردند:

$$SN_{if} = 0.525\left(\frac{P_{lif}}{D}\right) \quad R^2=0.82 \quad (16)$$

که در آن D قطر لوله است.

شکل ۹ پیش‌بینی‌های نتایج را با رابطه ۱۶ مقایسه می‌کند. پیش‌بینی‌ها از رابطه ۱۴ به دست آمده و از $\frac{P_{lif}}{b}$ به عنوان مشخصه هندسی جت به جای $\frac{P_{lif}}{D}$ در رابطه ۱۶ استفاده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر دو حالت مقدار عدد پایداری با افزایش نسبت $\frac{P_{lif}}{b}$ زیاد می‌شود، البته مقادیر

اندازه مصالح بستر است، از این رو، هر چند ممکن است اندازه مصالح ریپرپ در محل خود پایدار باشد، اما فرار مصالح ریزتر از بین خلل و فرج مصالح ریپرپ، موجب تشکیل چاله فرسایشی و شکست ریپرپ می‌شود. از این رو ضروری است که بین دو لایه مصالح، مصالحی با دانه‌بندی خاص قرار گیرد تا از فرار مصالح ریزتر جلوگیری کند. برای این منظور آزمایشهای جداگانه‌ای انجام شد.

مقادیر $\frac{d_{15(riprap)}}{d_{85(bed\ material)}}$ برای ترکیبهای مختلف محاسبه و در جدول ۴ درج شده است. در اینجا منظور از $d_{85(bed\ material)}$ مصالح دانه‌بندی شده‌ای است که زیر لایه ریپرپ قرار می‌گیرند. از بررسی اعداد این جدول، معیار $\frac{d_{15(riprap)}}{d_{85(bed\ material)}} \leq 2$ برای طرح ریپرپ بدون شست‌وشوی مصالح بستر به دست می‌آید. این معیار برای جت‌های مدور برابر همین مقدار به دست آمده است (شفاعی بجستان و آلبرتسون، ۱۹۹۳).

در مقایسه با کانالهای رو باز که در آنها این معیار کوچکتر از ۵ به دست آمده نتیجه می‌شود که ابعاد ریپرپ در زیر جت‌ها باید به ابعاد مصالح لایه زیر ریپرپ نزدیک‌تر باشد و چنانچه نسبت ابعاد بزرگتر از ۲ باشد، ضروری است با در نظر گرفتن همین معیار، اندازه لایه میانی طراحی شود. دلیل آن را می‌توان این‌گونه توضیح داد که جت در برخورد با قطعات ریپرپ به جت‌های کوچک‌تر تجزیه می‌شود. این جت‌های ثانویه قادر خواهند بود از خلل و فرج بین قطعات ریپرپ عبور کرده و به مصالح بستر برسند و آنها را متأثر سازند. ذرات بستر، تحت تأثیر انرژی این جت‌ها از جای خود حرکت کرده و از فضای بین قطعات ریپرپ خارج می‌شوند.

با توجه به اینکه در سرریزها معمولاً عمق جریان در مقابل پهنای جریان کوچک است، می‌توان شعاع هیدرولیکی را برابر عمق جریان فرض کرد و چون در کانالهای روباز $D=4R$ - که در آن R شعاع هیدرولیکی است - رابطه $D=4R$ با فرض $D=4b$ نیز در شکل ۹ ترسیم شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشات حاضر بین دو حالت فوق قرار می‌گیرد.

۴-۵- بررسی کیفی عملکرد ریپرپ پس از شکست

به منظور بررسی کیفی عملکرد ریپرپ بعد از شکست، با کاهش بیشتر سطح آب، آزمایش ادامه یافت. خروج بیشتر مصالح بستر و حرکت قطعات ریپرپ، تحت تأثیر انرژی بیشتر، پشته پایین‌دست را گسترش می‌دهد. این پشته، مخلوطی از مصالح بستر و ریپرپ است که در مقایسه با شرایط بدون ریپرپ، مقاومت بیشتری در مقابل شست‌وشو و حرکت دارد و کنترل‌کننده پیشرفت آبشستگی است. بنابراین، نقش ریپرپ در آبشستگی با شکست آن خاتمه نیافته و نقش ثانویه آن، تثبیت پشته پایین‌دست، افزایش عمق پایاب و استهلاک انرژی است. اگر دبی جریان افزایش داده شود، محل برخورد جت به سمت پایین‌دست جابه‌جا می‌شود. در این حالت، جت به پشته پایین‌دست برخورد می‌کند و چون این پشته، مخلوطی از مصالح ریز و درشت است، در مقابل آبشستگی مقاومت بیشتری دارد، به طوری که در نهایت در مقایسه با شرایط بدون ریپرپ، مصالح کمتری به سمت پایین‌دست حمل شده و فرسایش کمتری ایجاد می‌شود. این شرایط در نمونه‌های واقعی که در آنها دبی سیل با زمان تغییر می‌کند، رخ می‌دهد.

۵-۵- طرح ریپرپ بدون شست‌وشوی مصالح بستر^۱

بر اساس مطالبی که در بخش ۵-۲ و ۵-۳ به آنها اشاره شد، معمولاً اندازه ریپرپ طراحی شده بسیار بزرگ‌تر از

جدول ۴ مقادیر $\frac{d_{15(Riprap)}}{d_{85(Bed\ material)}}$ و خروج مصالح برای ترکیبهای مختلف ریپرپ و مصالح بستر

مصالح بستر			ریپرپ
C	B	A	
خروج مصالح بستراتفاق افتاد	۳/۴	۶/۷۵	۷۷
خروج مصالح بستراتفاق نیفتاد	۲/۵	۵	۵۷
خروج مصالح بستراتفاق نیفتاد	۱/۶	خروج مصالح بستراتفاق افتاد	۳/۱
خروج مصالح بستراتفاق نیفتاد	۱/۳	خروج مصالح بستراتفاق افتاد	۲/۵
خروج مصالح بستراتفاق نیفتاد	۰/۷۸	خروج مصالح بستراتفاق نیفتاد	۱/۵۷

مدلهای تک متغیره، به دلیل عدم پوشش کامل بر روی پارامترهای مؤثر در پدیده، برای پیش‌بینی شرایط شکست مناسب نیستند.

مدلهای چند متغیره خطی و غیرخطی در پیش‌بینی شرایط شکست ریپرپ موفق هستند.

مدلی خطی در پیش‌بینی دبی بحرانی در پرتابه در شرایط شکست ریپرپ به دست آمد. چنانچه شدت جریان در پرتابه از دبی بحرانی محاسبه شده بیشتر شود، شکست ریپرپ اتفاق می‌افتد.

نشست ریپرپ بر اثر خروج مصالح بستر از فضای بین قطعات ریپرپ بررسی شد و معیار

برای نزدیکی مصالح بستر به قطعات ریپرپ به دست آمد.

$$\frac{d_{15(Riprap)}}{d_{85(bed\ material)}} \leq 2$$

عملکرد ریپرپ در کنترل آبشستگی با شکست آن خاتمه نمی‌یابد و نقش ثانویه آن از نظر تثبیت پشته پایین دست، افزایش عمق پایاب و استهلاک انرژی، کاهش محدوده آبشستگی، کاهش حرکت رسوبات به پایین دست قابل بررسی است. لذا چنانچه ریپرپ به دلیل مسائل اجرایی از جمله استحصال، حمل، بارگیری، تخلیه، اجرا یا مسائل اقتصادی، برای سیل‌های کوچک تر از سیل طرح، طراحی شود، با فرض شکست در سیل‌های بزرگ تر، باز هم کنترل کننده آبشستگی خواهد بود.

در واقع، در مقایسه با کانالهای رو باز- که جریان فقط از روی مصالح عبور می‌کند- در اینجا نیروهایی توسط جت‌های تجزیه شده در جهات مختلف به مصالح بستر وارد می‌شوند که می‌توانند آنها را ناپایدار کرده و از جای خود حرکت دهند.

۶- نتیجه گیری

از این پژوهش نتایج زیر حاصل شد:

حرکت ذرات در زیر جت‌ها تابعی از نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم (SN) است و اگر این نسبت از حدی بیشتر باشد، ذرات در حرکت هستند.

SN به عنوان تابعی از متغیرهای بدون بعد شدت جریان، ضخامت جت، ارتفاع ریزش و طول نفوذ جت بررسی شد. شدت جریان، ضخامت جت و ارتفاع ریزش در میزان انرژی موجود برای حرکت نقش دارند و اندازه ذرات، تعیین کننده میزان مقاومت در برابر حرکت است. طول نفوذ جت که متأثر از عمق پایاب و زاویه برخورد جت با پایاب است، در میزان استهلاک انرژی نقش دارد.

در هر اندازه ریپرپ، تغییرات SN نسبت به متغیرهای بدون بعد، خطی است. با تغییر اندازه ریپرپ، داده‌ها (ضمن حفظ شکل خطی ارتباط)، در روی نمودار جابه‌جا می‌شوند.

۷- فهرست علائم

σ_g	انحراف استاندارد هندسی برابر $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$	A	سطح تصویر شده ذره بر بستر کانال
U	لزجت سینماتیکی	b	ضخامت جت در پرتابه جامی شکل
ΔZ	اختلاف ارتفاع بین پرتابه با سطح پایاب	b_u	ضخامت جت در لحظه نفوذ به پایاب
		C	ضریب ثابت
		d_s	اندازه ذرات
		d_{50}	اندازه ای از ذرات که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک ترند.
		F_D	نیروی رانش
		F_{dr}	برآیند نیروهای محرک
		F_L	نیروی بالابرنده
		g	شتاب ثقل
		H	ارتفاع ریزش، برابر اختلاف ارتفاع سطح آب مخزن و پایاب
		h_t	عمق پایاب
		k	ضریب ثابت
		P_L	طول نفوذ جت در استخر
		q	دبی در واحد عرض پرتابه جامی شکل
		q_c	دبی واحد عرض بحرانی در پرتابه در لحظه شکست
		R	شعاع پرتابه جامی شکل
		SN	عدد پایداری
		SN_{if}	عدد پایداری در لحظه شکست ریپرپ
		S_s	چگالی ذره
		V	سرعت جت در پرتابه جامی شکل
		V_b	سرعت جت در مجاورت بستر
		V_p	سرعت جت در لحظه نفوذ به پایاب
		ϕ	زاویه پرتاب پرتابه جامی شکل
		γ	وزن مخصوص آب
		γ_s	وزن مخصوص ذرات رسوبی
		μ	لزجت دینامیکی آب
		θ	زاویه برخورد جت به پایاب
		ρ_w	جرم حجمی آب
		ρ_s	جرم حجمی ذرات رسوبی

۸- منابع

[۱] شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۴). هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. چاپ سوم، ص. ۴۷۰.

[۲] فرهودی، ج. و ناصحی، م. (۱۳۷۸). "پروفیل آبشستگی در پایین دست آبشارهای قائم". دومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ص. ۷۸-۷۱.

[۳] قدسیان، م. آذرفرانبه، ا. و عباسی، ع. ا. (۱۳۷۷). "تعیین حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد". مجموعه مقالات پنجمین سمینار مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران، ایران، اهواز، ص. ۳۷۲-۳۷۸.

[۴] قدسیان، م. و عباسی، ع. ا. (۱۳۸۰). "بررسی آزمایشگاهی تغییرات توپوگرافی بستر در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد". دومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ص. ۸۷-۹۳.

[۵] مؤمنی وصالیان، ر. (۱۳۸۵). "تجزیه و تحلیل و بررسی آبشستگی توسط جت آبشاری در پایین دست سدها با استفاده از مدل فیزیکی". رساله دکتری. واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، ایران، تهران.

[۶] نصیری صالح، ف. و منتظر، غ. (۱۳۸۰). "تعیین ابعاد حفرة آبشستگی پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد با روش شبکه عصبی مصنوعی". سومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران، تهران، ص. ۳۰۱-۳۰۸.

- [14] Hoffmans, G.J.C.M. (1998). "Jet scour in equilibrium phase". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 124(5), pp. 430-437.
- [15] Hoffmans, G.J.C.M., and Verheij, H.J. (1997). *Scour Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 205.
- [16] Mason, P. J. and Arumugan, K. (1985). "Free jet scour below dams and flip bucket". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 111(2), pp. 220-235.
- [17] Pagliara, S., Hager, W.H, and Minor, H. E.; (2006). "Hydraulic of plunge pool scour". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 132(5), pp. 450-461.
- [18] Rajaratnam, N. and Mazurek, K. A. (2003). "Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 129(3), pp. 225-229.
- [19] Rajaratnam, N., Mazurek, K. A. and Sego, D. C. (2001). "Scour of soil by submerged circular turbulent impinging jets". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 127(7), pp. 598-606.
- [20] Shafai-Bajestan, M. and Albertson, M. L. (1993). "Riprap criteria below pipe outlet". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 119(2), pp. 181-200.
- [21] U.S. Bureau of Reclamation (1976). *Design of Gravity Dams*. pp. 553.
- [7] Azmathullah, H. Md., Deo, M. C. And Deolalikar, P. B. (2005). "Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 131(10), pp. 898-908.
- [8] Blaisdell, F. W. and Anderson, C. L. (1991). "Pipe plunge pool energy dissipater". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 117(3), pp. 303-323.
- [9] Bohrer, J. G., Abt, S. R. and Wittler, R. J. (1998). "Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 124(10), pp. 1043-1048.
- [10] Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring. 2nd Hydraulics structures design manual*. International Association for Hydraulic Research. A. A. Balkema, Rotterdam/Brook eld., pp. 125.
- [11] Dargahi, B. (2003). "Scour development downstream of a spillway". *Journal of Hydraulic Research*. 41(4), pp. 417-426.
- [12] Hager, W. H. and Minor, H. E. (2004). "Plunge pool scour in prototype and laboratory". *Proc. of International Hydraulics of Dam and River Structures*. April 29-28, Tehran; Iran, pp. 165-172.
- [13] Hager, W. H. and Canepa, S. (2003). "Effect of jet air content on plunge pool scour". *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 129(5), pp. 358-365.