

مطالعه انتقال بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

پوریا آسیابان^۱، ابراهیم امیری تکلدانی^{۲*} و محمد حسین امید^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تهران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تهران amiri@ut.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۱

چکیده

ملاحظات زیست‌محیطی موجب شده است که در طراحی سازه‌های کنترل در مسیر رودخانه‌ها، استفاده از سازه‌های نفوذپذیر به طور گسترده‌ای مورد استقبال مهندسين رودخانه قرار گیرد. سازه‌های نفوذپذیر نظیر سدهای پاره‌سنگی می‌توانند با فراهم نمودن امکان عبور رسوبات از داخل بدنه خود، شرایط هیدرولیکی مناسب‌تری برای عبور جریان در پایین دست خود ایجاد نموده در نتیجه تغییرات زیست‌محیطی ناشی از احداث این سازه‌ها به حداقل می‌رسد. علیرغم انجام مطالعات وسیع در خصوص هیدرولیک جریان عبوری از داخل محیط‌های متخلخل ریزدانه، مطالعات انجام شده در خصوص محیط‌های متخلخل درشت‌دانه به مراتب کمتر بوده و در این میان مطالعات بسیار کمی در خصوص عبور بار بستر از داخل منافذ سدهای پاره‌سنگی انجام شده است. در این تحقیق به منظور فراهم آوردن شرایط مناسب برای عبور بار بستر از داخل بدنه سدهای پاره‌سنگی، تاثیر تعبیه یک لایه در کف رودخانه که نسبت به لایه‌های بالایی دارای دانه‌بندی درشت‌تری می‌باشد مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. با استفاده از تحلیل ابعادی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی حاصله، رابطه‌ای برای تخمین بار بستر عبوری از داخل مصالح درشت‌دانه ارائه شد. از آنجا که برخی از روابط موجود قادر به پیش‌بینی مقدار بار بستر عبوری از مصالح درشت‌دانه نمی‌باشند، ضمن ایجاد تغییراتی در فرم روابط، کارایی آنها در خصوص تخمین بار بستر عبوری از این نوع مصالح بررسی شد. میانگین خطای نسبی رابطه جدید ارائه شده بر مبنای تحلیل ابعادی ۶۴/۷ درصد و میانگین خطای نسبی رابطه میر-پیتر و مولر توسعه داده شده ۱۰۱ درصد بود. هم‌چنین مشاهده شد که ایجاد لایه‌بندی در سد پاره‌سنگی در دامنه آزمایش‌های انجام شده در شرایط آزمایشگاهی موجود دبی بار بستر را به طور معنی‌داری افزایش نداده و لازم است تمهیدات دیگری نظیر تعبیه لایه میانی در نظر گرفته شود.

کلید واژه‌ها: سد پاره‌سنگی، بار بستر، لایه‌بندی.

Investigation of Bed Load Transport Through Rockfill Dam

P. Asiaban¹, E. Amiri Tokaldani^{2*} and M.H. Omid³

1-M.Sc. Student of Hydraulic Structures, University of Tehran

2*-Associate Professor of Hydraulic Structures, University of Tehran

3-Professor of Hydraulic Structures, University of Tehran

Received: 2 July 2014

Accepted: 1 December 2014

Abstract

Due to environmental considerations, using permeable control structures in rivers have been widely welcomed by engineers working on different aspects of rivers. Impermeable structures such as rockfill dams could provide more suitable hydraulic conditions for flow discharge within rivers by allowing sediments pass through their body so that the environmental impacts at structures downstream may be reduced to its lowest rate. Although there are a large number of researches carried out on the hydraulics behavior of the flow passing through fine and coarse materials, there is, however, a few studies on passing bed load through dam body of rockfill structures. In this experimental research, to provide suitable condition for bed load to pass through dam body, a coarser layer of materials has been used at the bottom of the dam. Using

dimensional analysis and data provided from laboratory tests, a relationship to estimate the amount of bed load passing from coarse materials has been introduced, and in this regard, the available equations to estimate bed loads, are modified as well. The mean relative error of the new equation was estimated as 64.7% while it is estimated as 101% for Meyer- Peter and Muler modified relationship. Furthermore, it is found that at the range of the experiments carried out in this research, using coarser materials at the bottom of rockfill dams has no significant effects on the amount of bed load passing through dam body.

KeyWords: Rockfill dam, Bed-load, Stratification.

میزان آبگذری نسبت به زمان ارائه دادند. وو و هوانگ^۴ (۲۰۰۰) ، کاهش نفوذپذیری یک ستون متخلخل در اثر تزریق ناگهانی رسوب را مورد مطالعه قرار داده و ضمن معرفی عوامل موثر بر این پدیده که شامل نسبت اندازه مصالح به رسوب، مقدار رسوب تزریق شده، و دبی جریان می باشد رابطه ای بدون بعد بر اساس عوامل فوق ارائه نمودند. جوی و همکاران^۵ (۱۹۹۱) ، انتقال رسوبات را از داخل محیط متخلخل در شرایط جریان غیرخطی (متلاطم) مورد بررسی قرار داده و در محدوده عدد رینولدز برای جریان موجود در محیط متخلخل بین ۱۸۰ تا ۹۴۰ و شیب کف بین ۹ تا ۶۰ درصد، در مجموع تعداد ۴۰ آزمایش را انجام دادند. جوی و همکاران (۱۹۹۱) با استفاده از اصول تحلیل ابعادی چهار پارامتر بدون بعد استخراج کرده و ضرایب بین این پارامترها را با استفاده از آزمایش‌ها تعیین و معادله زیر را به دست آوردند:

$$q_* = 26.2(\text{Re})^{-1.23} (D/d_s)^{0.54} (S_p)^{-1.39} \quad (1)$$

در این رابطه q_* : پارامتر بدون بعد انتقال رسوب
 $q_s, q_* = \frac{q_s n}{\rho_s d_s v}$ ، دبی انتقال رسوب (kg/s.m)، n :
 تخلخل (-)، ρ_s : جرم واحد حجم ذرات رسوب (kg/m³)،
 v : سرعت جریان (m/s)، d_s : قطر میان ذرات رسوب (m)،
 D : قطر میان ذرات تشکیل دهنده محیط متخلخل (m)،
 Re : عدد رینولدز جریان درون محیط متخلخل (-)، S_p :
 پارامتر بدون بعد شیب $(S_p = (\tan(\phi - \theta)))$ ، ϕ : زاویه
 ایستایی رسوبات درون محیط متخلخل و θ : زاویه شیب بستر
 می‌باشد. موسوی و همکاران (۱۳۹۰)، با انجام آزمایش روی
 سدهای پاره‌سنگی با دانه‌بندی‌های گوناگون و استفاده از
 رسوبات مختلف رابطه زیر را برای پیش‌بینی گردادیان
 هیدرولیکی بحرانی لازم برای عبور رسوبات غیرچسبنده، توسعه
 دادند:

$$i_c = 22.139(G_s - 1)g d_s (\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)^{1.066} \quad (2)$$

مقدمه

سرریزها برای اهداف گوناگونی از جمله انحراف جریان، افزایش رقوم سطح آب، و افزایش رقوم بستر رودخانه به منظور افزایش پایداری سواحل رودخانه‌ها مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. در بیشتر موارد سرریزها از مصالح نفوذناپذیر نظیر بتن و فولاد ساخته می‌شوند تا علاوه بر افزایش پایداری سازه ای، عمر مفید آنها نیز افزایش یابد. تغییرات ایجاد شده توسط سرریزها در جریان رودخانه در برخی موارد موجب کم شدن ویژگی خودپالایی آن می‌شود (مانتو و همکاران^۱، ۲۰۰۲). علاوه بر این، در بندهای نفوذناپذیر به دلیل به تله افتادن بخش زیادی از رسوبات (موجود در جریان ورودی) در مخازن بالادست این بندها، فرسایش رودخانه در پایین دست تشدید شده و رژیم انتقال رسوب و مرفولوژی رودخانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو، بندهای نفوذناپذیر احداث شده در مسیر رودخانه می‌توانند تاثیر نامطلوب زیست محیطی زیادی را ایجاد کنند. در مقابل، بندهای نفوذپذیر (مانندسدهای پاره‌سنگی) که با انباشته کردن مصالح سنگی تهیه شده از بستر رودخانه یا معادن سنگ در مسیر رودخانه احداث می‌شوند، علاوه بر نداشتن مشکلات یاد شده مزایای دیگری هم‌چون حفظ شرایط موجود رودخانه و نیز ایجاد شرایط مساعد برای زندگی آبزیان دارند (پالیرا و پارمو^۲، ۲۰۱۳).

سرریزهای نفوذپذیر با انتقال بخشی از رسوب موجود در جریان بالادست از میان خود، از یک طرف باعث کاهش تغییرات در ظرفیت حمل مواد رسوبی توسط جریان و در نتیجه کاهش فرسایش در پایین‌دست شده و از طرف دیگر موجب افزایش عمر مفید مخزن بالادست به مدت طولانی‌تری شوند. در عین حال، نفوذپذیری این سازه‌ها با گذشت زمان و وقوع سیلاب‌ها با به تله افتادن بخشی از رسوبات در خلل و فرج سنگریزه‌ها کاهش می‌یابد. کانینگهام و همکاران^۳ (۱۹۸۷) ، با انجام آزمایش‌هایی روی مصالح بستر رودخانه، گرفتگی در اثر رسوب‌گذاری درون و روی مصالح بستر غیر متحرک را بررسی کرده و با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه بدون بعدی برای تغییر

1 Maneo et al.

2 Pagliara and Palermo

3 Cunningham et al.

4- Wu and Huang

5- Joy et al.

از بدنه سدهای پاره‌سنگی که در مسیر رودخانه احداث می‌شوند از مصالح درشت دانه در مجاورت بستر رودخانه که نسبت به مصالح سد دارای قطر بزرگتری هستند استفاده شود. در این صورت سنگدانه‌های ریزتر لایه بالایی وظیفه ایجاد مقاومت در مقابل جریان و ایجاد سطح آب مورد نیاز در بالادست را دارند و سنگ‌های درشت لایه پایینی، وظیفه انتقال رسوبات بیشتر را به پایین دست عهده دار هستند. با انجام آزمایش‌های فیزیکی در آزمایشگاه، تاثیر این روش بررسی و نتایج حاصله در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک کانال با دیواره‌های شیشه‌ای و کف پلکسی گلاس به طول ۵ متر، عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر، و شیب ۰/۰۰۸ که در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران احداث شده بود، انجام شد. در شکل (۱) تصویر کلی از کانال نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان از یک سرریز مثلثی با زاویه راس ۹۰ درجه که در بالادست کانال نصب شده بود استفاده گردید. در فاصله سه متری از بالادست کانال، یک بلوک محیط متخلخل به عنوان سد پاره سنگی به ابعاد ۰/۵ متر (ارتفاع) در ۰/۵ متر (طول) تهیه شده و به منظور حفظ شکل مستطیلی آن از توری فلزی درشت‌دانه در بالادست و پایین دست آن استفاده شد. برای ایجاد لایه بندی در سد به منظور مطالعه روش پیشنهادی، لایه ای به ارتفاع ۱۰ سانتی متر متشکل از سنگ‌های درشت دانه در مجاورت کف کانال ایجاد و به منظور جلوگیری از اختلاط مصالح ریزدانه بالایی با مصالح درشت دانه پایینی، یک توری پارچه ای نازک در بین دو لایه قرار داده شد. در انتهای کانال نیز یک کیسه توری برای تله‌اندازی رسوبات عبور کرده از بدنه سد قرار داده شد.

در این تحقیق، از دو نوع ماسه با قطر میانه (D₅₀) ۰/۲۹ و ۰/۶۲ میلی‌متر به عنوان مصالح رسوبی استفاده گردید. سنگدانه‌های به کار رفته برای ایجاد سدهای پاره‌سنگی به صورت دست‌چین از بستر رودخانه کرج تامین شد و از نوع گردگوشه می‌باشند. مشخصات چهار نوع سنگدانه تهیه شده که توسط روش الک-عکاسی^۴ (وریک و همکاران^۵، ۲۰۰۹) تعیین شده در جدول (۱) ارائه شده است.

با استفاده از سنگدانه‌های معرفی شده هفت نوع سد پاره‌سنگی، شامل سه سد همگن و چهار سد لایه‌بندی شده به شرح جدول (۲) ایجاد شد:

به طور کلی نسبت قطر میانه سنگدانه‌های لایه پایینی به لایه بالایی از ۱ تا ۳/۰۹ و نسبت قطر سنگدانه به قطر رسوب از ۴۲ تا ۴۲۸ تغییر کرده است. از هر کدام از سدهای پاره‌سنگی

در این رابطه، i_c : گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای انتقال رسوبات غیرچسبنده (-)، G_s : چگالی ذرات رسوب (-)، g : شتاب جاذبه (m/s^2) می‌باشد.

با ورود رودخانه به دریاچه سد پاره‌سنگی (به علت کاهش سرعت ناگهانی) بخشی از بار رسوبی رودخانه که به صورت بار بستر حرکت می‌کند، ترسیب شده و این فرایند باعث ایجاد دلتا می‌شود. در دریاچه سد نیز به علت سرعت کم جریان بخشی از بار معلق رودخانه ته‌نشین شده و به صورت بار بستر به طرف بدنه سد حرکت کرده و بر حسب شرایط کاملا تصادفی یا از داخل سد عبور نموده و وارد پایین دست شده، یا در داخل سد در میان مصالح به تله افتاده و در همانجا ترسیب شده و یا در پشت سد ترسیب می‌کند. مروری بر منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه مدونی برای برآورد مقدار دبی رسوبی که به صورت بار بستر از درون سد پاره‌سنگی عبور می‌کند، انجام نشده است. در این تحقیق رابطه میر-پیتر و مولر به گونه‌ای اصلاح شده که قابلیت تخمین دبی بار بستر عبوری از سدهای پاره‌سنگی را داشته باشد. رابطه میر-پیتر و مولر (۱۹۴۸) که به اختصار در این مطالعه MPM نامیده می‌شود به طور گسترده در کارهای صحرائی و شبیه‌سازی‌های عددی به کار برده می‌شود؛ این رابطه که برای ذرات نسبتا درشت‌دانه (ماسه) توسعه داده شده به مقدار کمی تابع اندازه درات رسوبی است (ون راین^۱، ۱۹۹۳). این رابطه در موارد متعددی برای تخمین بار بستر رودخانه‌ها به کار گرفته شده و مشخص شده که در مقایسه با بسیاری از روابط موجود، تخمین‌های بهتری را ارائه می‌کند (مارتین^۲، ۲۰۰۳). رابطه MPM تاکنون چندین بار توسط محققین گوناگون مورد تحلیل مجدد قرار گرفته تا با ایجاد اصلاحاتی دامنه کاربرد آن گسترش داده شود (وانگ و پارکر^۳، ۲۰۰۶). یکی از شکل‌های این معادله به صورت زیر می‌باشد (شفاعی بجزستان، ۱۳۹۰):

$$\frac{q_b}{\left[(G_s - 1) g d_s^3 \right]^{0.5}} = \left(\frac{4\tau}{\rho g (G_s - 1) d_s} - 0.188 \right)^{1.5} \quad (3)$$

در این رابطه، q_b : دبی بار بستر در واحد عرض (kg/m^3) ، τ : تنش برشی بستر (N/m^2) و ρ : جرم واحد حجم سیال (kg/m^3) است.

در تحقیق حاضر علاوه بر تلاش برای ارائه روابطی برای تعیین مقدار بار بستر عبوری از سدهای پاره‌سنگی، روشی برای افزایش ظرفیت انتقال بار بستر از داخل بدنه سدهای پاره‌سنگی ارائه شده و در آن پیشنهاد شده که برای افزایش انتقال بار بستر

1- Van Rijn

2- Martin

3- Wong and Parker

4- Photo-sieving

5- Warrick et al.

آسیابان و همکاران: مطالعه انتقال بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

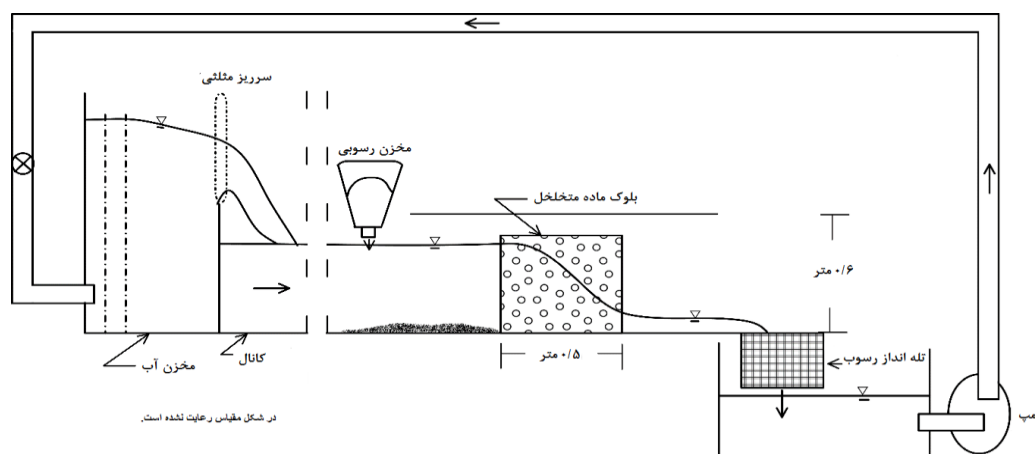
سپس با استفاده از یک تیغه چوبی هم عرض کانال رسوبات به مجاورت بدنه سد منتقل می‌شدند تا به صورت بار بستر امکان ورود به داخل بدنه سد را داشته باشند. در انتهای کانال نیز توری مخصوص تله‌اندازی رسوبات قرار داده شده و زمان پس از شروع هر آزمایش ثبت می‌گردید. علاوه بر اندازه‌گیری دبی وزنی رسوب عبوری از سد پاره‌سنگی، عمق آب بالادست سد و زمان تخلیه آب بالادست سد بعد از قطع جریان نیز اندازه‌گیری می‌شد.

ایجاد شده سه دبی جریان آب مطابق جدول (۲) عبور داده شد و در نتیجه مجموع آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ۴۲ عدد بوده است.

در هر آزمایش پس از برقراری جریان آب در کانال با دبی مشخص، به منظور تشکیل بار بستر و جلوگیری از ورود رسوبات به داخل منافذ لایه بالایی، مقدار سه کیلوگرم رسوب در فاصله به نسبت زیادی از بالادست سد پاره‌سنگی به طور ناگهانی به جریان تزریق شده که به دلیل بزرگی اندازه ذرات به سرعت در فاصله ای دور از بالادست سد ته نشین می‌شدند.

جدول ۱- مشخصات سنگدانه‌های مورد استفاده

نوع سنگدانه	قطر بزرگ قطر متوسط	انحراف معیار هندسی (-)	قطر میانه (D ₅₀) (سانتی‌متر)
۱	۱/۸	۱/۲۲	۲/۶۵
۲	۱/۶	۱/۱۷	۴/۲۰
۳	۱/۶	۱/۱۰	۷/۴۰
۴	۱/۳	۱/۰۸	۱۳/۰۰



شکل ۱- شماتیک سامانه آزمایشگاهی

جدول ۲- مشخصات سدهای احداث شده در آزمایشگاه

شماره سد	نوع سد	مصالح استفاده شده	دبی‌های عبور داده شده (لیتر بر ثانیه)
یک	همگن	مصالح نوع یک	۱۲/۹ و ۹/۹، ۶/۲
دو	همگن	مصالح نوع دو	۲۰/۳، ۱۴/۸، ۹/۹
سه	همگن	مصالح نوع سه	۲۰/۳، ۱۴/۸، ۹/۹
چهار	دولایه	مصالح نوع یک بر روی مصالح سه	۱۲/۹ و ۹/۹، ۶/۲
پنج	دو لایه	مصالح دو بر روی مصالح سه	۲۰/۳، ۱۴/۸، ۹/۹
شش	دو لایه	مصالح دو بر روی مصالح چهار	۲۰/۳، ۱۴/۸، ۹/۹
هفت	دو لایه	مصالح سه بر روی مصالح سه	۲۰/۳، ۱۴/۸، ۹/۹

نتایج و بحث

توسعه روابط تخمین مقدار بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

برای توسعه روابط به منظور تخمین دبی بار بستر، از دو روش استفاده شد. در روش اول سعی شد تا با ایجاد تغییراتی در رابطه میر-پیتر و مولر که برای تخمین بار بستر در کانال‌های باز به کار می‌رود، این رابطه برای تخمین نرخ انتقال بار بستر درون سد پاره‌سنگی توسعه داده شود. در روش دوم نیز ابتدا عوامل موثر بر پدیده انتقال بار بستر از میان سدهای پاره‌سنگی شناسایی شده و با استفاده از تحلیل ابعادی و نیز رگرسیونی، رابطه تجربی جدیدی برای تخمین دبی بار بستر در سدهای پاره‌سنگی ارائه شد. از مجموعه ۴۲ آزمایش انجام شده ۶۵ درصد داده‌های به دست آمده برای توسعه روابط و ۳۵ درصد باقی برای اعتبارسنجی روابط پیشنهادی استفاده گردید. لازم به ذکر است که از آنجا که نرخ انتقال رسوب تابعی غیرخطی از تنش برشی بستر است و حتی خطاهای کم در تخمین تنش برشی بستر می‌تواند منجر به ایجاد خطای زیادی در تخمین نرخ انتقال رسوب شود، تخمین درست نرخ انتقال رسوب کار بسیار مشکلی است. هم چنین نقش دو عامل دیگر نیز سبب پیچیدگی بیشتر می‌شود. اول آنکه فقط بخشی از تنش برشی بستر صرف انتقال رسوب می‌شود و دوم آنکه مقدار تنش برشی بستر دارای تغییرات مکانی است و استفاده گزارش نموده است که تخمین مقدار دبی رسوب با خطای کمتر از ۱۰۰ درصد در عمل امکان‌پذیر نمی‌باشد.

اصلاح رابطه میر-پیتر و مولر برای تخمین مقدار انتقال بار بستر از سدهای پاره‌سنگی

در طرف راست رابطه میر-پیتر و مولر عبارت تنش برشی بستر در جریان یکنواخت استفاده از رابطه زیر موسوم است:

$$\Gamma = \gamma RS \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، γ : وزن واحد حجم سیال، R : شعاع هیدرولیکی (m) و S : شیب کف بستر است. اما معادله بالا از تعادل نیروی وزن سیال با نیروی اصطکاک جریان با جداره کانال به وجود آمده و در شرایط مواجهه با جریان غیریکنواخت، شیب خط انرژی جایگزین شیب کف کانال می‌شود. لازم به گفتن است که در هر حالت عامل مقاومت کننده در مقابل جریان آب، اصطکاک با جداره است و در شرایط مطالعه اخیر نیز آنچه که به طور عمده در مقابل جریان مقاومت می‌کند اصطکاک جریان با

محیط متخلخل سد پاره‌سنگی است. بنابراین در این تحقیق از معادله (۵) که براساس طول اختلاط فان-کارمن به دست آمده برای محاسبه تنش برشی استفاده می‌شود (چاودری، ۲۰۰۸):

$$\Gamma = k \rho v^2 \quad (۵)$$

که در آن k : یک ضریب بدون بعد است. چدري (۲۰۰۸)، مقدار k را تابعی از عدد رینولدز می‌داند. در مطالعه اخیر از آنجا که هدف تعیین مقداری از تنش برشی بود که صرف انتقال رسوب می‌شد لذا برای تعیین k از یک روش تجربی استفاده شد. مقدار انتقال بار بستر برای آن دسته از داده‌ها که برای توسعه رابطه در نظر گرفته شده بودند در معادله (۳) قرار داده شده و لذا تنها مجهول باقی مانده در معادله مقدار k بود که به منظور تعیین مقدار آن ابتدا ضریب همبستگی تعداد زیادی از عوامل بدون بعد مربوط به جریان، رسوب و سد پاره‌سنگی مانند عدد فرود، عدد فرود ذره، عدد رینولدز، عدد رینولدز ذره، نسبت قطر سنگدانه‌های سد به قطر رسوب و ترکیب عوامل بدون بعد یاد شده با مقدار k محاسبه شده و مشخص شد که k بیشترین همبستگی را با مقدار عدد فرود جریان بالادست به شرح زیر دارد:

$$k = 2000.4Fr^2 - 217.12Fr + 7.07 \quad (۶)$$

که در آن Fr عدد فرود جریان بالادست سد پاره‌سنگی می‌باشد و محدوده تغییرات آن در آزمایش‌های تحقیق حاضر بین ۰/۰۳ و ۰/۰۷ بوده است. با قرار دادن معادله (۶) در (۵) و جایگزینی معادله حاصل در (۳)، معادله میر-پیتر و مولر برای تخمین مقدار بار بستر عبوری از سدهای پاره‌سنگی به شکل معادله (۷) به دست آمد:

$$\frac{q_b}{[(G_s - 1)gd_s^3]^{0.5}} = \left(\frac{4(2000.4Fr^2 - 217.12Fr + 7.07)}{\rho g (G_s - 1)d_s} - 0.188 \right)^{1.5} \quad (۷)$$

معادله (۷) با استفاده از بخشی از داده‌ها (۳۵ درصد داده‌های برداشت شده) که برای اعتبارسنجی معادلات گسترش داده شده در نظر گرفته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی، از دو شاخص نسبت ناچوری^۳ (DR) که نسبت مقدار مدل‌سازی

آسیابان و همکاران: مطالعه انتقال بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

$$\frac{q_b}{\rho d_s} = 0.58 \left(\frac{d_s}{D_1}\right)^{2.64} 0.70 \left(\frac{d_s}{D_2}\right)^{2.27} 1 \left(\frac{\rho v d_s}{\mu}\right)^0 \quad (11)$$

$$\times 0.00024 \left(\frac{v}{\sqrt{g d_s}}\right)^{0.91} 2.5 \times 10^{-10} \left(\frac{v}{\sqrt{g y}}\right)^{3.94}$$

نکته قابل توجه در معادله (۱۱) استقلال پدیده انتقال رسوب بستر از عدد رینولدز ذره $\left(\frac{\rho v d_s}{\mu}\right)$ در محدوده آزمایش‌های تحقیق حاضر می‌باشد. لذا می‌توان عدد رینولدز ذره را حذف و معادله (۱۱) را به صورت معادله (۱۲) بازنویسی کرد:

$$q_b = \rho d_s \times \left[\begin{array}{l} 0.58 \left(\frac{d_s}{D_1}\right)^{2.64} 0.70 \left(\frac{d_s}{D_2}\right)^{2.27} \\ + 0.00024 \left(\frac{v}{\sqrt{g d_s}}\right)^{0.91} + 2.5 \times 10^{-10} \left(\frac{v}{\sqrt{g y}}\right)^{3.94} \end{array} \right] \quad (12)$$

معادله (۱۲) میانگین خطای نسبی ۷/۶۴ درصد، حداکثر و حداقل نسبت ناچوری به ترتیب ۱/۹ و ۰/۰۹ و میانگین نسبت ناچوری ۰/۴۷ را داراست. علیرغم اینکه معادله (۱۲) میانگین خطای نسبی کمتری نسبت به معادله (۷) که حالت اصلاح شده رابطه میر-پیتر و مولر است دارد نمی‌توان نتیجه گرفت که عملکرد معادله (۱۲) بهتر است زیرا پراکندگی نسبت ناچوری برای معادله (۱۲) که در شکل (۴) نشان داده شده مشخص می‌کند که این معادله مقادیر دبی رسوب را در اکثر موارد کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

نتایج آن بخش از آزمایش‌های که برای مدل‌سنجی معادله‌ها به کار رفته‌اند به همراه نتایج مدل‌سازی شده توسط معادلات (۷) و (۱۲) در شکل (۳) ارائه شده است.

ایجاد لایه‌بندی که پیشنهادی به منظور افزایش دبی بار بستر است در آزمایش‌های این تحقیق به نحوی انجام شده که ضخامت لایه پایینی ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت لایه بالایی ۴۰ سانتی‌متر باشد. برای نشان دادن مقدار ناهمگنی از نسبت قطر میانه سنگدانه‌های لایه پایینی (D_2) به قطر میانه سنگدانه‌های لایه بالایی (D_1) استفاده و با عنوان شاخص ناهمگنی (HI) به آن ارجاع داده شد.

شده به مقدار مشاهده شده می‌باشد و مقدار بهینه آن یک است و میانگین خطای نسبی (MRE) زیر استفاده شد. روابط مربوط به شاخص‌های نامبرده، به ترتیب در معادله‌های زیر نشان داده شده است:

$$DR = \frac{\hat{x}_i}{x_i} \quad (8)$$

$$MRE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|}{n} \right) 100 \quad (9)$$

در معادله‌های (۸) و (۹)، n : تعداد داده‌های اعتبارسنجی، x_i : داده‌های مشاهده شده و \hat{x}_i : داده‌های مدل‌سازی شده هستند. برای معادله (۷) مقدار میانگین خطای نسبی برابر ۱۰۱ درصد، حداکثر و حداقل نسبت ناچوری به ترتیب ۵/۶ و ۰/۳۴ و میانگین نسبت ناچوری ۱/۷ به دست آمد. شکل (۲) توزیع نسبت ناچوری برای معادله میر-پیتر و مولر اصلاح شده را نشان می‌دهد. اگر از معادله (۴) برای تخمین تنش برشی موجود در معادله میر-پیتر و مولر استفاده شود، تخمین دبی بار بستر دارای میانگین خطای نسبی ۱۴۷ درصد خواهد بود.

توسعه رابطه تحلیل ابعادی برای تخمین بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

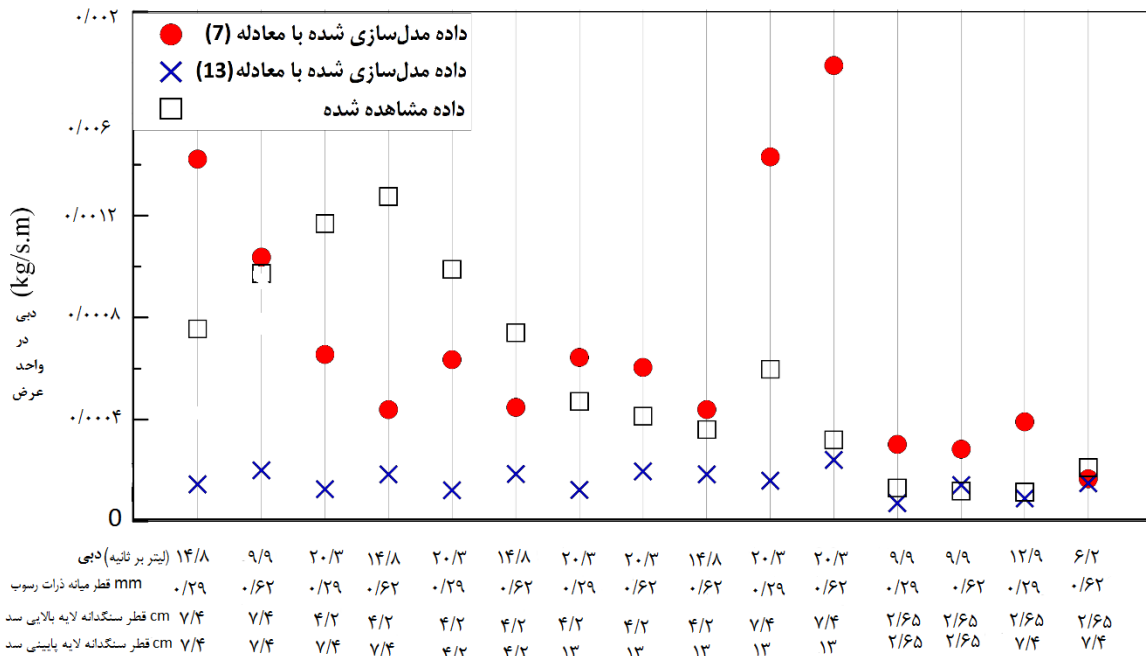
طبق تجربیات به دست آمده از مطالعات انجام شده پارامترهای بدون بعد موثر در مساله عبارتند از $\frac{d_s}{D_1}$ ، $\frac{d_s}{D_2}$ ، $\frac{\rho v d_s}{\mu}$ ،

و $\frac{v}{\sqrt{g d_s}}$ و $\frac{v}{\sqrt{g y}}$ که بر این اساس می‌توان رابطه (۱۰) را نوشت:

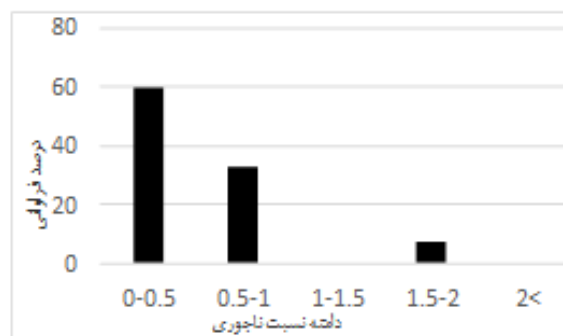
$$\frac{q_b}{\rho d_s} = f\left(\frac{d_s}{D_1}, \frac{d_s}{D_2}, \frac{\rho v d_s}{\mu}, \frac{v}{\sqrt{g d_s}}, \frac{v}{\sqrt{g y}}\right) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، D_1 : قطر سنگدانه‌های لایه بالایی سد، D_2 : قطر سنگدانه‌های لایه پایینی سد، y : عمق آب بالادست سد پاره سنگی و μ : لزجت دینامیکی سیال است.

شکل‌های تابعی گوناگونی به عوامل بدون بعد فوق برآزش داده شد و رابطه حاصل شده توسط بخشی از داده‌ها که مخصوص اعتبارسنجی بودند مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت بهترین معادله برآزش داده شده به صورت معادله (۱۱) تعیین گردید:

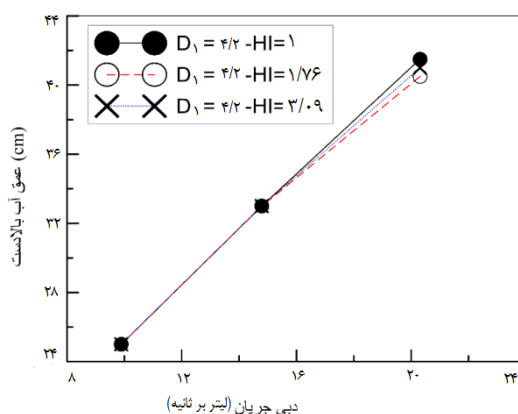


شکل ۳- نتایج مشاهداتی به همراه نتایج مدل‌سازی شده (توجه: محور افقی دنباله پیوسته‌ای از اعداد نمی‌باشد بلکه هر نقطه روی آن نشان دهنده شرایط یک آزمایش خاص است که به طور تصادفی برای اعتبارسنجی معادله‌ها انتخاب شده است.)



شکل ۴- پراکندگی نسبت ناچوری برای معادله (۱۲)

آسیابان و همکاران: مطالعه انتقال بار بستر در سدهای پاره‌سنگی



شکل ۵- رابطه دبی-اشل برای جریان بالادست سد پاره‌سنگی

می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اثر لایه‌بندی بر دبی بار بستر آن قدر شدید نیست که بتواند بر عواملی که این پدیده را یک پدیده غیرقطعی می‌کنند به طور کامل غلبه کرده و یک روند قطعی ایجاد کند، به عبارت دیگر، در بعضی حالت‌های سد لایه‌بندی شده بار بستر بیشتری از سد همگن عبور می‌دهد و در حالت‌های دیگر عکس این قضیه صادق است. این مساله را این گونه می‌توان توجیه کرد که طبق مشاهدات آزمایشگاهی، چه در صورت استفاده از سدهای لایه‌بندی شده، در مجاورت بدنه سد (بالادست) یک میدان سرعت قوی وجود خواهد که باعث می‌شود در آن ناحیه بستر رسوبی تشکیل نشود و تمام ذرات رسوبی که به این ناحیه وارد می‌شوند بلافاصله وارد بدنه سد شده و از پایین‌دست آن خارج می‌شوند.

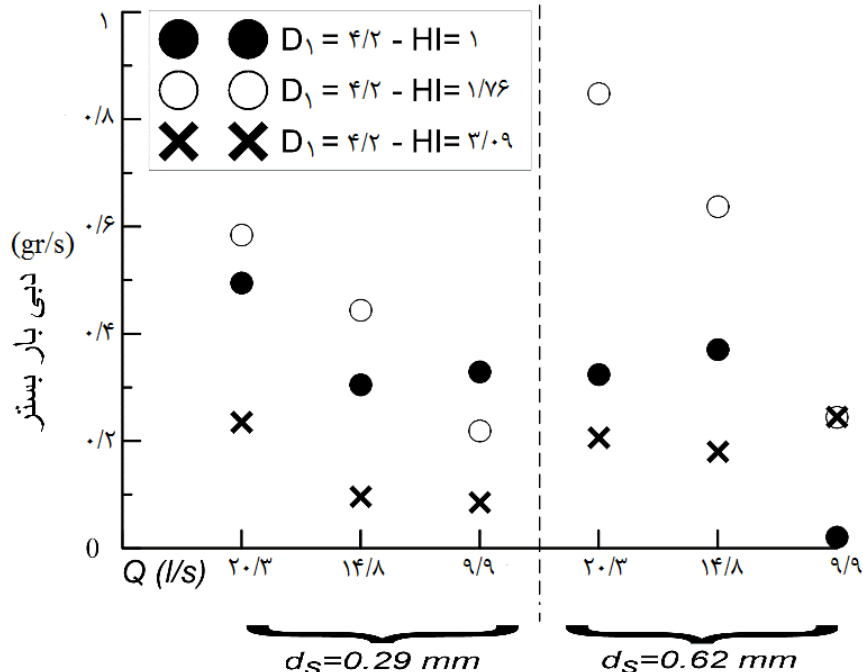
این ناحیه با شماره ۱ در شکل (۷) نشان داده شده است. البته طول این ناحیه بسیار کوتاه است و در شکل برای نمایش بهتر بزرگ‌تر نشان داده شده است. در صورتی که فرض شود بر اثر استفاده از یک زیرلایه درشت‌تر در بدنه سد یک میدان سرعت به نسبت قوی‌تر در مجاورت بستر تشکیل شود، طول ناحیه یک تا حدودی بیشتر می‌شود که تاثیری بر انتقال رسوب نخواهد داشت زیرا بستر رسوبی در ناحیه یک وجود ندارد. اما این میدان می‌تواند اثر خود را به کمی بالاتر هم امتداد دهد (تا انتهای ناحیه دو) ولی در نهایت خیلی زود مستهلک شده و در فاصله کمی از بالادست سرعت موجود در نزدیکی بستر شبیه به سرعت موجود در حالت استفاده از سد همگن می‌شود (ناحیه سه). شاهد این امر نیز وجود عمق‌های یکسان برای دبی‌های یکسان در فاصله کمی از بالادست سدهای همگن و لایه‌بندی شده است که نشان دهنده سرعت متوسط مشابه در مقطع می‌باشد. بنا بر این با فرض صحیح دانستن ایجاد یک میدان سرعت نسبتاً قوی‌تر در صورت استفاده از سد لایه‌بندی شده، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده

در تمام آزمایش‌ها انجام شده حتی آزمایش‌هایی با زمان به نسبت طولانی، بعد از قطع جریان و تخلیه سنگدانه‌های سد مشاهده گردید که هیچ ذره‌ای از رسوبات در بین سنگدانه‌های سد به تله نیفتاده، بدین معنی که هر ذره‌ای که از بستر رسوبی بالادست سد شروع به حرکت کرده و به محیط متخلخل سد وارد شده، حتماً از انتهای آن خارج شده است. این پدیده را می‌توان این گونه تفسیر کرد که شرایط جریان بالادست تعیین کننده مقدار دبی انتقال رسوب به صورت بار بستر است و ایجاد لایه‌بندی در بدنه سد فقط به شرطی می‌تواند روی مقدار دبی بار بستر تاثیر بگذارد که روی شرایط جریان بالادست تاثیر بگذارد. برای نشان دادن اینکه ایجاد لایه‌بندی بر شرایط جریان بالادست تاثیر می‌گذارد در شکل (۵) منحنی دبی-اشل برای جریان بالادست در سدهای همگن و لایه‌بندی شده $D_1=4/2$ و $H_1=1$ و $1/76$ و $3/09$ داده شده است.

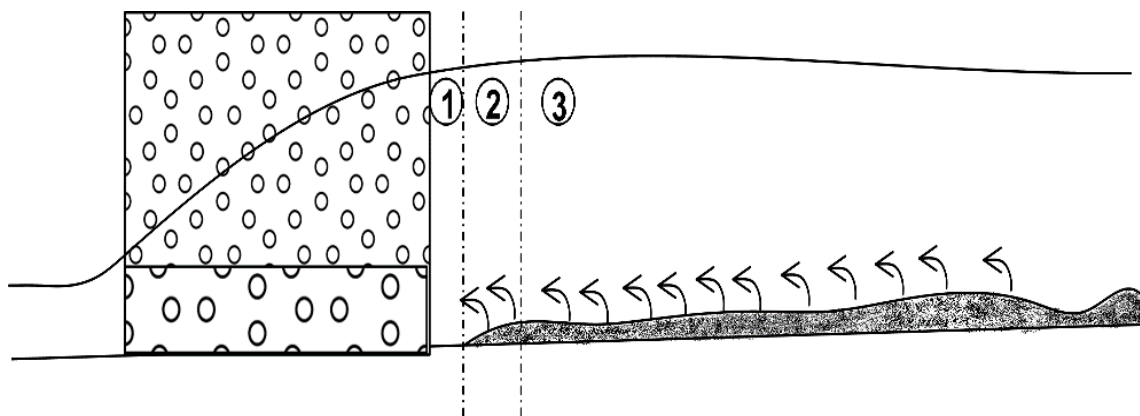
همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، ایجاد لایه‌بندی به خصوص در دبی‌های کم تاثیری بر عمق آب بالادست سد ندارد. عدم تاثیرگذاری لایه‌بندی بر عمق جریان در دبی‌های یکسان به معنی عدم تاثیرگذاری لایه‌بندی بر سرعت متوسط جریان می‌باشد. زمان تخلیه دریاچه سد بعد از قطع جریان که نشان دهنده مقاومت سازه در برابر جریان است، نیز دقیقاً روندی مشابه روند موجود در شکل (۵) دارد. از آنجا که در اکثر موارد ایجاد لایه‌بندی تاثیری بر سرعت متوسط جریان ندارد می‌توان حدس زد که تاثیر معنی‌دار هم بر مقدار دبی بار بستر نخواهد داشت، مگر آنکه به نحوی توزیع سرعت را تغییر دهد که در این مطالعه الگوی توزیع برداشت نشده است. در شکل (۶) مقدار دبی بار بستر اندازه‌گیری شده به نحوی نشان داده شده‌اند که امکان مقایسه دبی بار بستر عبوری از سد همگن و لایه‌بندی شده در شرایط یکسان وجود داشته باشد. شکل (۶) دبی بار بستر عبوری از یک سد پاره‌سنگی در حالت‌های مختلف لایه‌بندی شده را نشان

عنوان بار بستر در نظر گرفته می‌شود، تفاوت معنی‌دار بین رسوب خارج شده از سد همگن و لایه‌بندی شده وجود نخواهد داشت.

است، برداشت از مصالح بستر فقط در ناحیه بسیار کوتاهی (ناحیه دو) افزایش می‌یابد و برداشت از مابقی بستر رسوبی که طول زیادی هم دارد مشابه حالت سد همگن خواهد بود. بنا بر این در خروجی که مقدار تجمعی رسوبات خارج شده نسبت به زمان به



شکل ۶- اثر لایه‌بندی بر دبی بار بستر



شکل ۷- بستر رسوبی بالادست یک سد لایه‌بندی شده

شاخص ناهمگنی احتمال ورود سنگدانه‌های لایه بالایی به خلل و فرج لایه پایینی افزایش می‌یابد. البته در آزمایش‌های تحقیق حاضر در بین دولایه از یک توری پارچه‌ای نازک برای جلوگیری از اختلاط سنگدانه‌ها استفاده شد ولی به علت وزن زیاد ستون سنگ روی آن، احتمال ورود سنگدانه‌ها به لایه پایینی وجود دارد.

یکی از دلایلی که فرض ایجاد میدان سرعت به نسبت قوی‌تر را در مجاورت سدهای لایه‌بندی شده رد می‌کند احتمال ورود سنگدانه‌های ریزتر لایه بالایی به خلل و فرج زیرلایه درشت‌دانه می‌باشد که حتی در مواردی نیز می‌تواند به تضعیف میدان سرعت بر اثر کاهش نفوذپذیری منجر شود. شکل (۶) نیز نشان می‌دهد که در حالت استفاده از سد با شاخص ناهمگنی ۳/۰۹ در بیشتر موارد دبی بار بستر نسبت به حالت استفاده از سد پاره‌سنگی با شاخص ناهمگنی ۱/۷۶ کمتر است در صورتی که با افزایش

آسیابان و همکاران: مطالعه انتقال بار بستر در سدهای پاره‌سنگی

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر مساله انتقال رسوب به صورت بار بستر از بدنه سدهای پاره‌سنگی را مورد بررسی قرار داده است. جریان موجود در محیط متخلخل سد پاره‌سنگی برای تمام حالت‌های مورد آزمایش از نوع غیر-داریسی (غیرخطی) بوده است. داده شد که مشخص کرد پدیده در این دامنه از تغییرات شرایط فیزیکی مستقل از عدد رینولدز ذره است. اعتبارسنجی روابط توسعه داده شده نشان داد که رابطه ابعادی با میانگین خطای نسبی ۶۴/۷ درصد در اکثر موارد بار بستر عبوری را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و رابطه میر-پیتر و مولر توسعه داده شده برای تخمین دبی بار بستر عبوری از سدهای پاره‌سنگی دارای میانگین خطای نسبی ۱۰۱ درصد می‌باشد.

در این تحقیق رابطه میر-پیتر و مولر گسترش داده شد و در عبارت مربوط به محاسبه تنش برشی یک ضریب واسنجی ظاهر گردید که مشخص شد بیشترین همبستگی را با عدد فرود دارد و رابطه بین آنها ارائه شد. رابطه‌ای بر مبنای تحلیل ابعادی گسترش

در هیچ یک از روابط توسعه داده شده اثر شیب بستر و طول سازه به چشم نمی‌خورد که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد. مشاهده شد که درشت‌دانه‌تر ساختن سنگدانه‌های لایه پایینی سد بر عمق آب بالادست و زمان تخلیه دریاچه برای تاثیر نمی‌گذارد. مقایسه‌ها نیز نشان داد که لایه‌بندی دبی بار بستر را به طور معنی‌دار افزایش نمی‌دهد.

منابع

- ۱- شفاعی بجنستان، م. ۱۳۹۰. مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- موسوی، س. ع. امیری تکلدانی، ا. و داودی، م. ه. ۱۳۹۰. تعیین روابط گرادیان هیدرولیکی بحرانی و دبی انتقال رسوبات غیرچسبنده در سدهای پاره‌سنگی. نشریه آب و خاک، ۲۵ (۶): ۱۲۳۸-۱۲۴۹.
- 3- Chaudhry, M. H. 2008. Open-channel flow. Second ed. Springer publications.
- 4- Cunningham, A. B., Anderson, C. J. and Bower. H. 1987. Effect of sediment-laden flow on channel bed clogging. Journal of Irrigation and Drainage, 113(1): 106-118.
- 5- Joy, D. M. Lennox, W. C. and Kouwen. N. 1991. Particulate transport in porous media under non-linear flow condition. Journal of Hydraulic Research, 29(3): 373-385.
- 6- Maneo, S., Michioku, K., Morinaga, T. and Ohnishi. T. 2002. Hydraulic characteristics of a rubble mound weir and its failure process. Proceeding ICHE. Warsaw, Poland.
- 7- Martin, Y. 2003. Evaluation of bed load transport formulae using field evidence from the Vedder river, British Columbia. Journal of Geomorphology, 53: 75-95.
- 8- Pagliara, S. and Palermo. G. 2013. State of art in block ramp and downstream stilling basin design. 9th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 9- Van Rijn, L.C. 1984. Sediment Transport, part II: Suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(11): 1613-1641.
- 10- Van Rijn, L. C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and costal seas. Aqua publications.
- 11- Warrick, J., Rubin, D., Ruggiero, P., Harney, J., Draut, A. and Buscombe, D. 2009. Cobble cam: Grain-size measurements of sand to boulder from digital photographs and autocorrelation analyses. Earth Surface Process and Landforms. 34: 1811-1821.
- 12- Wong, M, and Parker. G. 2006. Re-analysis and correlation of bed-load relation of Meyer-peter and Muller using their own database. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(11): 1159-1168.
- 13- Wu, F.C. and , Huang, H.T. 2000. Hydraulic resistance induced by deposition of sedimentation in porous media. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126 (7): 547-551.