

## تعیین روابط گرادیان هیدرولیکی بحرانی و دبی انتقال رسوبات غیر چسبنده در سدهای پاره‌سنگی

سید علی موسوی<sup>\*۱</sup> - ابراهیم امیری تکلدانی<sup>۲</sup> - محمدهادی داودی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۱

### چکیده

سدهای پاره‌سنگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که در شرایط سیلابی از طریق کنترل و تخلیه تدریجی بخشی از حجم جریان ورودی، موجب کاهش دبی عبوری به پایین‌دست می‌شوند. از مهم‌ترین مشخصه‌های این سدها تراوا بودن و قابلیت عبور آب و رسوبات موجود در آب از درون آن به‌خصوص در زمان سیلابی رودخانه می‌باشد، در نتیجه تا حد امکان نباید رسوبات در پشت و داخل آن‌ها ترسیب کند. برای حفظ مشخصه تراوایی این سدها، به‌خصوص در زمان سیلابی رودخانه، طراحی این سدها باید طوری صورت گیرد که همواره گرادیان هیدرولیکی موجود بالاتر از مقدار بحرانی آن برای انتقال رسوبات از داخل این سدها باشد. در تحقیق حاضر با انجام آزمایشاتی بر روی یک سد پاره‌سنگی مستطیل شکل در آزمایشگاه، به بررسی رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی و دبی انتقال رسوبات غیر چسبنده در سدهای پاره‌سنگی پرداخته شده و با استفاده از آنالیز ابعادی و رگرسیون غیر خطی رابطه‌ای نمایی برای گرادیان هیدرولیکی بحرانی و رابطه‌ای برای دبی انتقال رسوبات از داخل سدهای پاره‌سنگی در حالت جریان متلاطم ارائه شده است. همچنین نمودار مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها برای گرادیان هیدرولیکی بحرانی و دبی انتقال رسوبات و نتایج حاصل از روابط به‌دست آمده رسم شد که نشان دهنده ضریب همبستگی بالایی روابط ارائه شده و تطبیق خوب این دو سری از نتایج بود.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب غیر چسبنده، سد تأخیری، سدهای پاره‌سنگی، گرادیان هیدرولیکی بحرانی

### مقدمه

برای حفظ این ویژگی، طراحی این سدها باید طوری صورت گیرد که همواره گرادیان هیدرولیکی موجود بالاتر از گرادیان هیدرولیکی بحرانی لازم برای انتقال رسوبات از داخل این سدها باشد. لذا تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی انتقال رسوبات در این سدها امری مهم است.

در محیط متخلخل سنگدانه‌ای سدهای تأخیری، به علت اینکه خلل و فرج‌ها بزرگ هستند جریان به‌صورت آشفته می‌باشد و قانون خطی دارسی اعتبار خود را از دست داده و رابطه بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی غیر خطی است. برای اولین بار پرانی در سال ۱۸۰۴ ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت سیال را در محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای به‌صورت نمایی مطرح کرد (۶). پس از وی پژوهشگران بسیاری در خارج و داخل کشور در این زمینه فعالیت کرده‌اند و روابط متعددی بین سرعت جریان آب بدون رسوب با عواملی از قبیل گرادیان هیدرولیکی، قطر و دانه‌بندی سنگ‌ها، تخلخل، عدد رینولدز و لزوجت سینماتیک ارائه کردند.

یکی از سازه‌های کنترل سیل در رودخانه‌ها سدهای تأخیری می‌باشد و از طریق دیو کردن مصالح سنگی تهیه شده از بستر رودخانه‌ها و یا معادن سنگی ایجاد می‌شوند. این سدها می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرهای تخریبی سیلاب، از راه تأخیر در پیک سیلاب، داشته باشند. از مهم‌ترین مشخصات سدهای تأخیری تراوا بودن و قابلیت عبور آب و رسوبات موجود در آب از درون آن به‌خصوص در زمان سیلابی رودخانه می‌باشد. نکته بسیار مهم در عملکرد این نوع سدها این است که میزان نفوذپذیری این سدها با گذشت زمان و پس از وقوع سیلاب‌ها کاهش چشم‌گیر نداشته باشد.

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس

کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(\* - نویسنده مسئول: (Email: sam\_azfam2008@yahoo.com)

۳- استادیار مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی کشور

در رابطه ۳،  $q_* =$  پارامتر بدون بعد انتقال رسوب  
 $(q_* = \frac{q_s \cdot n}{\rho_s \cdot d_s \cdot V_b})$ ، اندازه ذرات رسوبی،  $d =$  اندازه ذرات  
 تشکیل دهنده محیط متخلخل،  $R_e =$  عدد رینولدز جریان در محیط  
 متخلخل  $(R_e = \frac{V_b \cdot d}{n \cdot \nu})$ ، نسبت اندازه ذرات تشکیل دهنده  
 محیط متخلخل به اندازه ذرات رسوبی  $(\lambda_d = \frac{d}{d_s})$ ، پارامتر  
 بدون بعد شیب  $(S_p = tg(\phi - \theta))$ ، زاویه ایستایی رسوبات در  
 محیط متخلخل (درجه)،  $\theta =$  زاویه شیب کف (درجه) و  $\nu =$  لزوجت  
 سینماتیک سیال می باشد.

شاولچی (۸) کاهش تدریجی گرادیان هیدرولیکی بستر رودخانه‌ها  
 به واسطه اثرات رسوب گذاری را با انجام آزمایشاتی روی مصالح  
 بستری همراه با تزریق رسوب بررسی کرده و با استفاده از نتایج آن  
 آزمایش‌ها رابطه‌ای برای تعیین هدایت هیدرولیکی در زمان  $t$  پس از  
 تزریق رسوب ارائه نمودند.

از جمله تحقیقاتی که در داخل کشور در این زمینه صورت گرفته  
 است، مطالعات انجام شده توسط مرادلو می باشد. مرادلو (۳) به بررسی  
 آزمایشگاهی انسداد فیزیکی محیط‌های متخلخل سدهای باطله یا به  
 عبارت دیگر کاهش نفوذپذیری این محیط‌ها به دلیل عبور جریان دو  
 فاز سیال و مواد رسوبی تحت غلظت‌های مختلف و فشار  
 هیدرواستاتیکی نسبتاً بالا پرداخت.

عمادی و سامانی (۱) به بررسی حرکت رسوبات غیر چسبنده در  
 محیط متخلخل درشت‌دانه پرداختند. این آزمایش‌ها در محدوده عدد  
 رینولدز ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ انجام گرفت. محیط متخلخل به کار رفته  
 شامل سنگدانه‌هایی با قطرهای متوسط در دو اندازه ۱۴/۵ و ۲۱  
 میلی‌متر و رسوبات مصرفی نیز با قطرهای متوسط ۰/۲۵۶، ۰/۳۶۲ و  
 ۰/۵۱۲ میلی‌متر بود.

با فرض غیر خطی بودن گرادیان هیدرولیکی بحرانی در  
 جریان‌های متلاطم و نمایی بودن این رابطه، عمادی و سامانی (۱)  
 رابطه زیر را برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی در محیط  
 متخلخل درشت‌دانه ارائه کردند:

$$i_c = 1.667 (G_s - 1) g \cdot d_s (\cos \theta \cdot \tan \phi - \sin \theta)^{4.699} \quad (4)$$

همچنین بر اساس رابطه‌ای که ساکتیوادبول برای انتقال رسوبات  
 در محیط‌های متخلخل در حالت جریان آرام ارائه کرده است، عمادی  
 و سامانی (۲) رابطه‌ای نمایی به صورت زیر را برای جریان متلاطم در  
 محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای ارائه کردند:

$$q_s = 0.0461 \rho_s \cdot d_s \left( \frac{Q - Q_c}{Q_c} \right)^{0.6236} \quad (5)$$

این روابط مشابه رابطه ارائه شده توسط ساکتیوادبول می باشد (۷)  
 با این تفاوت که این روابط به صورت نمایی و غیر خطی به دست آمده  
 است.

هیدرولیک انتقال رسوبات در محیط‌های متخلخل نیز در جریانات  
 آرام و آشفته با هم متفاوت است. اغلب تحقیقات انجام شده در این  
 زمینه در حالت جریان آرام بوده و در حالت جریان متلاطم که بحث  
 انتقال رسوب در سدهای پاره‌سنگی می باشد، تحقیقات اندکی انجام  
 شده است.

ساکتیوادبول (۷) اولین کسی بود که حرکت رسوبات را از درون  
 محیط متخلخل با در نظر گرفتن اثرات نیروی جاذبه یا به عبارت  
 دیگر وزن ذره، مورد بررسی قرار داد. وی رابطه زیر را جهت به دست  
 آوردن گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای حرکت رسوبات در محیط  
 متخلخل سنگدانه‌ای در شرایط جریان خطی ارائه داد:

$$i_c = 2K_c (G_s - 1) g \cdot d_s (\cos \theta \cdot tg \phi - \sin \theta) \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $i_c =$  گرادیان هیدرولیکی بحرانی،  $K_c =$  ضریب ثابت  
 که از آزمایشات به دست می آید،  $G_s =$  چگالی نسبی ذرات رسوب،  
 $g =$  شتاب ثقل زمین،  $d_s =$  قطر ذرات رسوبی،  $\theta =$  زاویه شیب  
 کف نسبت به افق و  $\phi =$  زاویه ایستایی رسوبات در داخل محیط  
 متخلخل سنگدانه‌ای می باشد.

این محقق برای برقراری جریان آرام از روغن به جای آب استفاده  
 کرد و با در نظر گرفتن  $N-1$  لایه رسوبی متحرک و با فرض خطی  
 بودن توزیع سرعت لایه‌های رسوبی و نوشتن معادله نیروها برای یک  
 ذره رسوبی معادله زیر را برای محاسبه میزان انتقال رسوبات از درون  
 محیط متخلخل در حالت جریان آرام ارائه کرد:

$$q_s = K'_{sak} \cdot \rho_s \cdot d_s \left( \frac{i}{i_c} \right) \left( \frac{i - i_c}{i_c} \right) \quad (2)$$

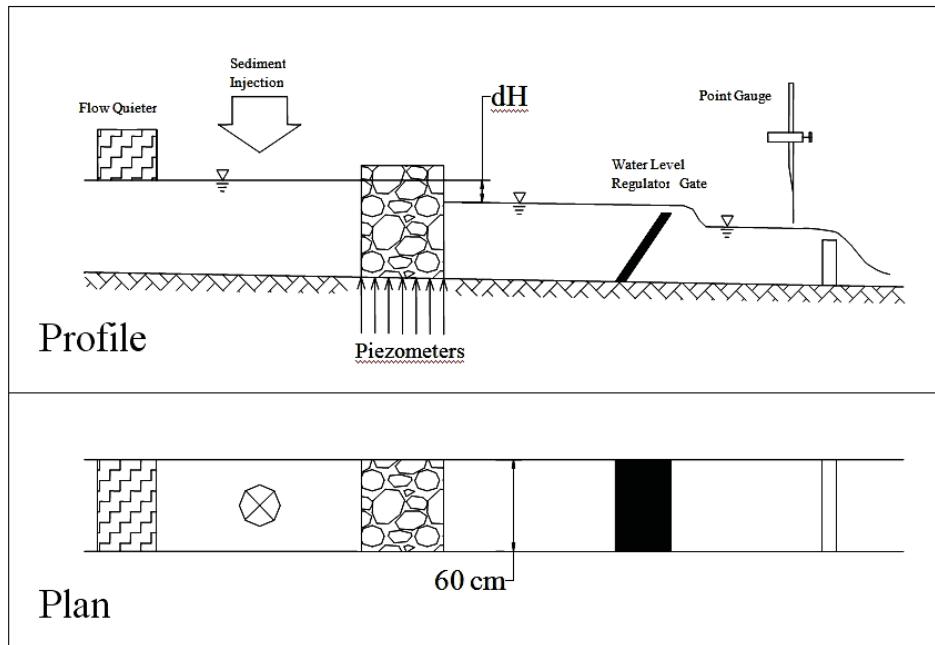
در رابطه ۲،  $q_s =$  میزان انتقال رسوب،  $\rho_s =$  چگالی ذرات رسوب  
 و  $K'_{sak} =$  ضریب ثابت است.

کانینگهام و همکاران (۴) با انجام آزمایش‌هایی روی مصالح بستر  
 رودخانه، گرفتگی در اثر رسوب گذاری درون و روی مصالح بستر غیر  
 متحرک را بررسی کردند و با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ی بدون  
 بعدی برای تغییر میزان آبگذری مصالح در اثر گذشت زمان و تزریق  
 رسوبات ارائه کردند.

جوی و همکاران (۵) انتقال رسوبات را از داخل محیط متخلخل  
 در شرایط جریان غیر خطی (متلاطم) مورد بررسی قرار دادند. دامنه  
 عدد رینولدز برای جریان موجود در محیط متخلخل بین ۱۸۰ تا ۹۴۰  
 و شیب کف بین ۹ تا ۶۰ درصد در نظر گرفته شده و در مجموع تعداد  
 ۴۰ آزمایش انجام شد.

جوی و همکاران (۵) با استفاده از اصول آنالیز 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:

$$q_* = 26.2 (R_e)^{-1.23} (\lambda)^{0.54} (S_p)^{-1.39} \quad (3)$$



شکل ۱- شکل شماتیک نمای جانبی و پلان فلوم مورد استفاده

### نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های گرادیان هیدرولیکی بحرانی در ۱۸ حالت مختلف به قرار زیر انجام شد: دو اندازه سنگدانه ۳ و ۴/۵ سانتی‌متر، سه انحراف معیار برای هر اندازه سنگدانه (صفر، ۰/۵ و ۰/۷۵) و برای سه اندازه رسوبی ۰/۱۵، ۰/۲۷ و ۰/۳۶ میلی‌متر. همچنین آزمایش‌های دبی انتقال رسوبات در حالات بالا و برای هر کدام با دو دبی مختلف انجام شدند.

برای تعیین پروفیل سطح آب و به‌دست آوردن گرادیان هیدرولیکی، یک سری پیزومتر در کف سد نصب شد. با توجه به اندازه سنگدانه‌ها و رسوبات و نسبت قطر آن‌ها، برای انجام آزمایش‌ها لازم بود که آزمایش از گرادیان هیدرولیکی بسیار کم شروع و به تدریج مقدار آن را افزایش داده شده تا جایی که حرکت رسوبات از داخل محیط متخلخل صورت گیرد. در لحظه‌ای که حرکت رسوبات به‌طور مشهود از داخل سد صورت می‌گیرد، تزریق رسوبات متوقف شده و پیزومترها قرائت می‌شدند. برای اینکه قرائت پیزومترها به موقع و به‌طور دقیق انجام شود، از سیستم عکس‌برداری استفاده شد. عکس‌های گرفته شده وارد محیط نرم‌افزار Grapher 7.0 شد و داده‌های مورد نیاز از آن استخراج شد.

برای به‌دست آوردن گرادیان هیدرولیکی از روش رگرسیون خطی استفاده گردید. این روش به این صورت است که با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از پیزومترها و وارد کردن آن‌ها در محیط نرم‌افزار

تعدادی از نقایص تحقیقات پیشین به حسب مورد عبارتند از: در تحقیق ساکتیوادبول به جای آب از روغن به عنوان سیال استفاده شده و جریان آرام برقرار شده است (۷). این فرضیات در عمل کاربرد ندارند.

جوی و همکاران (۵) شیب‌های بستر ۹ تا ۶۰ درصد را به کار برده‌اند که در این شرایط همواره گرادیان هیدرولیکی بیشتر از مقدار بحرانی آن برای انتقال رسوبات است و امکان رسیدن به حالت بحرانی در این آزمایش‌ها وجود ندارد.

در تحقیق حاضر سعی شده که برخی از نقایص تحقیقات انجام شده برطرف شده و آزمایش‌ها در محدوده‌ی متفاوتی از اندازه سنگدانه‌ها و رسوبات انجام شود؛ تا نتایج به‌دست آمده مکمل نتایج پیشین بوده و همچنین در صورت وجود تفاوت علل آن مشخص شود.

### مواد و روش‌ها

#### مشخصات فلوم مورد استفاده و نمونه سد پاره‌سنگی

برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی، آزمایش‌های انجام شده در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۵ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی کشور انجام شد. همچنین برای ایجاد نمونه سد پاره‌سنگی از یک سبد توری مکعبی شکل به طول ۳۰ سانتی‌متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده و داخل آن با سنگدانه‌ها پر شد.

بعد رسوبات به آرامی از قسمت فوقانی به داخل آب وارد شد. پس از مدتی شیب ایستایی رسوبات ثابت شده به طوری که با افزایش رسوب، زاویه شیب تغییر نکرده و فقط به صورت موازی با شیب ایجاد شده سطح آن بالاتر خواهد رفت. در این هنگام زاویه شیب تشکیل شده را اندازه گرفته که برابر زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل درشت‌دانه خواهد بود. شکل ۳ نمونه‌ای از نحوه اندازه‌گیری زاویه ایستایی رسوبات را نشان می‌دهد.

## نتایج

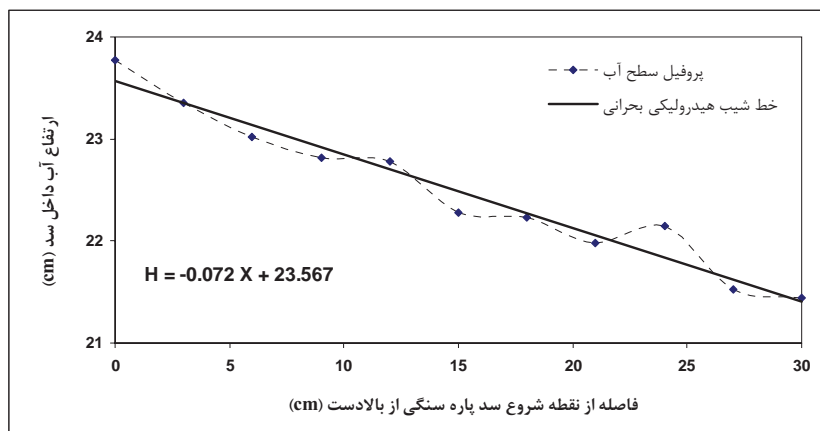
### تعیین رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی

داده‌های برداشت شده از آزمایش‌های انجام شده برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی در نمونه سد پاره‌سنگی مورد استفاده در آزمایش‌ها به صورت جدول ۱ می‌باشد. رابطه ساکتیوادیول با فرض خطی بودن گرادیان هیدرولیکی بحرانی و در نظر گرفتن جریان آرام در محیط متخلخل سنگدانه‌ای در این محیط به دست آمده است (۷).

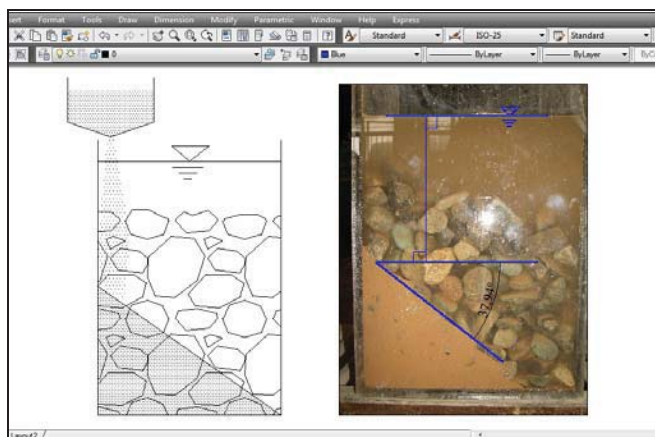
اکسل شیب خط رگرسیونی گذرنده از این نقاط به عنوان گرادیان هیدرولیکی دو طرف سد در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲ پروفیل سطح آب و شیب هیدرولیکی بحرانی برای یکی از آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. در این آزمایش قطر رسوبات ۰/۲۷ میلی‌متر، قطر سنگدانه‌ها ۴/۵ سانتی‌متر، انحراف معیار سنگدانه‌ها برابر ۰/۵ و چگالی نسبی رسوبات برابر ۲/۶۴ بوده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای انتقال رسوبات برابر ۰/۰۷۱۷ می‌باشد.

### تعیین زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل سنگدانه‌ای

برای به دست آوردن زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل سنگدانه‌ای، از یک صندوق از جنس پلکسی گلاس به ابعاد  $70 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  استفاده شد. برای این کار سنگدانه‌های دانه‌بندی شده داخل صندوق ریخته شده و سپس آنقدر آب داخل صندوق ریخته می‌شد تا سطح آن بالاتر از سطح سنگ‌ها قرار گیرد. در مرحله



شکل ۲- مقادیر ارتفاع آب داخل نمونه سد در نقاط مختلف در لحظه شروع حرکت رسوبات



شکل ۳- نحوه تعیین زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل سنگدانه‌ای

جدول ۱- مشخصات مواد به کار رفته در آزمایشات و نتایج به دست آمده

ردیف	قطر سنگدانه		قطر رسوبات	چگالی نسبی رسوبات	زاویه ایستایی رسوبات (درجه)	شیب هیدرولیکی بحرانی
	cm	انحراف معیار cm				
1	3	0	0.15	2.64	39.955	0.0321
2	3	0	0.36	2.64	38.685	0.0945
3	3	0	0.27	2.64	37.597	0.0679
4	4.5	0	0.36	2.64	37.493	0.0902
5	4.5	0	0.27	2.64	37.190	0.0672
6	4.5	0	0.15	2.64	37.025	0.0305
7	3	0.5	0.36	2.64	37.010	0.1090
8	3	0.5	0.27	2.64	36.578	0.0750
9	3	0.5	0.15	2.64	36.333	0.0340
10	3	0.75	0.36	2.64	36.223	0.0988
11	3	0.75	0.27	2.64	35.650	0.0734
12	3	0.75	0.15	2.64	34.360	0.0319
13	4.5	0.5	0.36	2.64	32.573	0.0921
14	4.5	0.5	0.27	2.64	32.453	0.0717
15	4.5	0.5	0.15	2.64	32.200	0.0321
16	4.5	0.75	0.36	2.64	31.838	0.0910
17	4.5	0.75	0.27	2.64	31.640	0.0696
18	4.5	0.75	0.15	2.64	30.128	0.0312

### تعیین رابطه دبی انتقال رسوبات

برای تعیین رابطه بدون بعد برای انتقال رسوبات، ابتدا باید پارامترهای مرتبط با انتقال رسوبات از داخل سدهای پاره‌سنگی تعیین شوند. این پارامترها عبارتند از: قطر ذرات رسوبی ( $d_s$ )، چگالی رسوبات ( $\rho_s$ )، قطر سنگدانه‌ها ( $d$ )، سرعت واقعی سیال در محیط

متخلخل سنگدانه‌ای ( $V_a = \frac{V}{n}$ )، ویسکوزیته سیال ( $\nu$ ) و شیب

هیدرولیکی مؤثر در انتقال رسوبات که عبارت است از مقدار شیب هیدرولیکی موجود برای انتقال رسوبات از داخل سد پاره‌سنگی ( $S_e = i$ ). به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$q_s = f(d_s, \rho_s, d, n, V, \nu, S_e) \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $q_s$  برابر دبی انتقال رسوبات از داخل محیط سنگدانه‌ای در واحد سطح می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$f(q_s, d_s, \rho_s, d, V_a, \nu, S_e) = 0 \quad (10)$$

با توجه به این شش پارامتر بعددار ( $q_s, d_s, \rho_s, d, V_a, \nu$ ) و سه بعد (طول، جرم و زمان)، بنابراین سه پارامتر بدون بعد به صورت زیر نوشته می‌شوند:

با توجه به این که جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه آشفته و گرادیان هیدرولیکی در آن‌ها غیر خطی می‌باشد، می‌توان رابطه ۱ را مشابه روابط ارائه شده برای گرادیان هیدرولیکی در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه به صورت نمایی در نظر گرفت. بنابراین می‌توان در حالت کلی روابط نمایی غیر خطی برای گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل سنگدانه‌ای را به صورت زیر نوشت:

$$i = a \cdot V^b \quad (6)$$

در رابطه ارائه شده توسط ساکتیوادبول پارامترهای مرتبط با سرعت سیال در محیط متخلخل سنگدانه‌ای زاویه شیب کف ( $\theta$ ) و زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل سنگدانه‌ای ( $\phi$ ) هستند، که پارامتر  $\phi$  با اندازه سنگدانه‌ها مرتبط می‌باشد. بنابراین برای غیر خطی کردن رابطه ساکتیوادبول (۷)، می‌توان رابطه را به شکل زیر نوشت:

$$i_c = a \cdot (G_s - 1) g \cdot d_s \cdot (\cos \theta \cdot \text{tg} \phi - \sin \theta)^b \quad (7)$$

مقادیر ضرایب  $a$  و  $b$  با استفاده از آنالیز آماری نتایج آزمایش‌ها و با به کار بردن نرم‌افزار SPSS به ترتیب برابر ۲۲/۱۳۹ و ۱/۰۶۶ تعیین شدند. بنابراین رابطه ۷ را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$i_c = 22.139 (G_s - 1) g \cdot d_s \cdot (\cos \theta \cdot \text{tg} \phi - \sin \theta)^{1.066} \quad (8)$$

با توجه به روابط ۱ و ۸ ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن اثر کم توان ۱/۰۶۶، مقدار  $K_s$  در رابطه ۱ برابر ۱۱/۰۶۹ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات سنگدانه‌ها و جریان حاکم بر محیط سنگدانه‌ای و مقادیر محاسبه شده پارامترهای بدون بعد

ردیف	قطر سنگدانه cm	انحراف معیار cm	تخلخل سنگدانه -----	قطر رسوبات mm	چگالی رسوبات kg/m3	دبی انتقال رسوبات gr/s/m	سرعت جریان m/s	Se	$\lambda$	Re	$q^*$
1	3	0	0.46	0.36	2640	20.77	0.130	0.1550	83	9149	0.000925
2	3	0	0.46	0.36	2640	17.39	0.114	0.1517	83	8012	0.000884
3	3	0	0.46	0.27	2630	22.27	0.125	0.1670	111	8797	0.001035
4	3	0	0.46	0.27	2630	14.99	0.096	0.1420	111	6743	0.000909
5	3	0	0.46	0.15	2610	15.69	0.109	0.1337	200	7638	0.000846
6	3	0	0.46	0.15	2610	15.05	0.113	0.1320	200	7931	0.000782
7	4.5	0	0.47	0.36	2640	27.78	0.117	0.1347	125	12074	0.000937
8	4.5	0	0.47	0.36	2640	25.61	0.117	0.1260	125	12073	0.000864
9	4.5	0	0.47	0.27	2630	26.58	0.126	0.1567	167	12922	0.000841
10	4.5	0	0.47	0.27	2630	26.56	0.127	0.1500	167	13062	0.000831
11	4.5	0	0.47	0.15	2610	11.04	0.117	0.1143	300	12090	0.000376
12	4.5	0	0.47	0.15	2610	11.89	0.122	0.1333	300	12580	0.000389
13	3	0.5	0.41	0.36	2640	25.14	0.121	0.1650	83	9538	0.001074
14	3	0.5	0.41	0.36	2640	12.86	0.098	0.1027	83	7740	0.000677
15	3	0.5	0.41	0.27	2630	10.35	0.090	0.1177	111	7096	0.000596
16	3	0.5	0.41	0.27	2630	11.95	0.102	0.1153	111	8004	0.000610
17	3	0.5	0.41	0.15	2610	21.30	0.101	0.1453	200	7968	0.001101
18	3	0.5	0.41	0.15	2610	22.15	0.097	0.1117	200	7612	0.001199
19	3	0.75	0.41	0.36	2640	19.49	0.088	0.1337	83	6892	0.001152
20	3	0.75	0.41	0.36	2640	24.99	0.104	0.1900	83	8154	0.001249
21	3	0.75	0.41	0.27	2630	24.26	0.093	0.1320	111	7288	0.001361
22	3	0.75	0.41	0.27	2630	24.29	0.102	0.1520	111	8037	0.001236
23	3	0.75	0.41	0.15	2610	12.18	0.094	0.1407	200	7433	0.000675
24	3	0.75	0.41	0.15	2610	11.77	0.092	0.1253	200	7203	0.000673
25	4.5	0.5	0.42	0.36	2640	24.08	0.131	0.2460	125	15061	0.000651
26	4.5	0.5	0.42	0.36	2640	25.77	0.141	0.1463	125	16210	0.000648
27	4.5	0.5	0.42	0.27	2630	25.43	0.109	0.0793	167	12614	0.000824
28	4.5	0.5	0.42	0.27	2630	25.07	0.100	0.0973	167	11521	0.000890
29	4.5	0.5	0.42	0.15	2610	14.84	0.093	0.0850	300	10764	0.000568
30	4.5	0.5	0.42	0.15	2610	22.30	0.116	0.0883	300	13362	0.000688
31	4.5	0.75	0.42	0.36	2640	24.55	0.101	0.1100	125	11636	0.000859
32	4.5	0.75	0.42	0.36	2640	28.68	0.113	0.1493	125	13030	0.000897
33	4.5	0.75	0.42	0.27	2630	27.31	0.112	0.1450	167	12917	0.000865
34	4.5	0.75	0.42	0.27	2630	21.36	0.088	0.0897	167	10137	0.000861
35	4.5	0.75	0.42	0.15	2610	15.58	0.085	0.0650	300	9791	0.000656
36	4.5	0.75	0.42	0.15	2610	16.06	0.100	0.0840	300	11479	0.000576

$$R_e = \frac{V \cdot d}{n \cdot \nu} \quad (14) \quad \text{عدد رینولدز}$$

$$\lambda_d = \frac{d}{d_s} \quad (15) \quad \text{پارامتر بدون بعد نسبت قطرها}$$

$$S_e = i \quad (16) \quad \text{پارامتر بدون بعد شیب مؤثر}$$

و در نهایت داریم:

$$q_* = k \cdot (R_e)^\alpha \cdot (\lambda_d)^\beta \cdot (S_e)^\gamma \quad (17)$$

در جدول ۲ داده‌های لازم برای تعیین رابطه بدون بعد انتقال رسوبات از داخل سدهای پاره‌سنگی و مقادیر محاسبه شده پارامترهای بدون بعد ارائه شده است:

ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و  $k$  در رابطه ۱۷ با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و به کار بردن نرم‌افزار SPSS به‌دست آمده

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= V_a^{x_1} \times d^{y_1} \times \rho_s^{z_1} \times q_s \\ \pi_2 &= V_a^{x_2} \times d^{y_2} \times \rho_s^{z_2} \times d_s \\ \pi_3 &= V_a^{x_3} \times d^{y_3} \times \rho_s^{z_3} \times \nu \end{aligned} \right\} \Rightarrow \pi_1 = \frac{q_s}{V_a \cdot d \cdot \rho_s}, \quad \pi_2 = \frac{d_s}{d}, \quad \pi_3 = \frac{\nu}{V_a \cdot d}$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\left( \frac{q_s \cdot n}{\rho_s \cdot d \cdot V} \right) = k \cdot \left( \frac{V \cdot d}{n \cdot \nu} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{d}{d_s} \right)^\beta \cdot (S_e)^\gamma \quad (12)$$

که پارامترهای بدون بعد این رابطه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$q_* = \frac{q_s \cdot n}{\rho_s \cdot d \cdot V} \quad \text{پارامتر بدون بعد انتقال رسوبات} \quad (13)$$

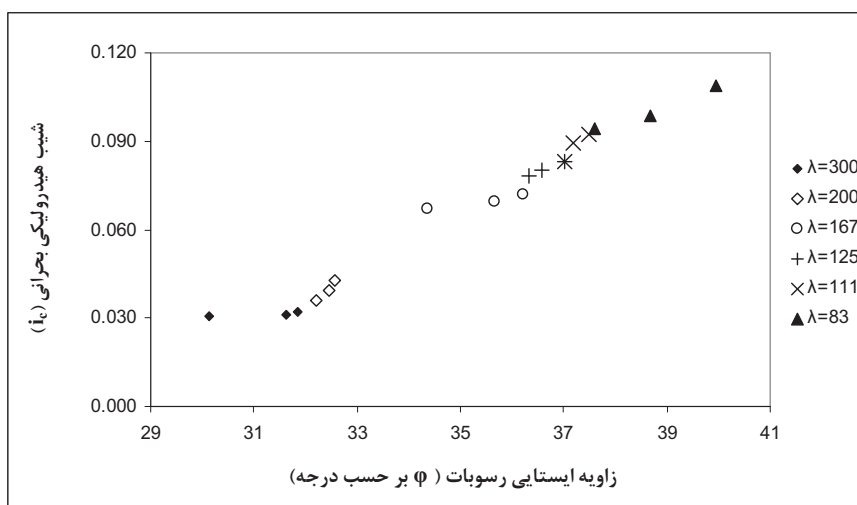
### اعتبارسنجی روابط به دست آمده

همانگونه که در بخش قبل مشاهده شد با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، رابطه ۸ برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی و رابطه ۱۸ برای دبی انتقال رسوبات به دست آمد. این روابط دارای ضریب همبستگی بالایی می باشند (مقدار ضریب  $R^2$  برای رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی برابر ۰/۹۹ و برای رابطه دبی انتقال رسوبات برابر ۰/۸۴ می باشد). برای به دست آوردن رابطه ۸، ۱۸ مورد آزمایش برای سنگدانه های ۳ و ۴/۵ سانتی متر با سه انحراف معیار صفر، ۰/۵ و ۰/۷۵ و سه اندازه رسوبی ۰/۱۵، ۰/۲۷ و ۰/۳۶ میلی متر، در محدوده عدد رینولدز ۳۱۷۴ تا ۹۶۶۷ انجام شدند. بر اساس نتایج حاصله، نمودار تغییرات گرادیان هیدرولیکی در مقابل زاویه ایستایی رسوبات در شکل ۴ نشان داده شده است.

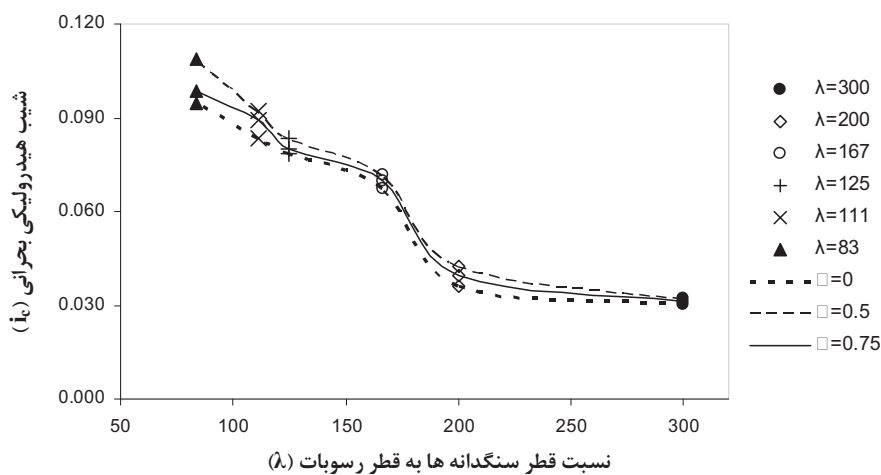
و در نتیجه شکل نهایی رابطه ۱۷ به شرح زیر نوشته می شود:

$$q_* = 0.0725 (R_e)^{-0.3517} (\lambda_d)^{-0.1346} (S_e)^{0.258} \quad (18)$$

معادله ۱۸ نشان دهنده رابطه بین دبی انتقال رسوبات از داخل سد پاره سنگی با مشخصات فیزیکی سد و رسوبات موجود در جریان و همچنین مشخصات هیدرولیکی جریان در حال عبور از داخل سد می باشد. این معادله مشابه رابطه جوی (۵) می باشد با این تفاوت که شیب های کف فلوم به کار رفته توسط آنها محققین زیاد و کمی غیر طبیعی بود، که در این تحقیق هم شیب کف معقول تری در نظر گرفته شد و هم اندازه های متفاوتی از اندازه سنگدانه ها و رسوبات به کار رفت.



شکل ۴- نمودار تغییرات گرادیان هیدرولیکی در مقابل زاویه ایستایی رسوبات



شکل ۵- نمودار تغییرات گرادیان هیدرولیکی در مقابل نسبت قطر سنگدانه به قطر رسوبات

باشد. نتایج آزمایش‌ها برای انحراف معیارهای مختلف قطر سنگدانه‌ها در این شکل نشان داده شده است.

به منظور اعتبار سنجی رابطه ۸ از داده‌های آزمایشگاهی عمادی و سامانی (۱) استفاده شد، این آزمایش‌ها به تعداد شش عدد برای سنگدانه‌های با قطر متوسط ۲۱ و ۱۴/۵ میلی‌متر و برای سه قطر رسوبات ۵۱۲/۰، ۳۶۳/۰، و ۲۵۶/۰ میلی‌متر و در شیب ۰/۰۳۳ درصد انجام شدند. داده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها و مقادیر محاسبه شده‌ی گرادیان هیدرولیکی بحرانی توسط رابطه ۸ برای این داده‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

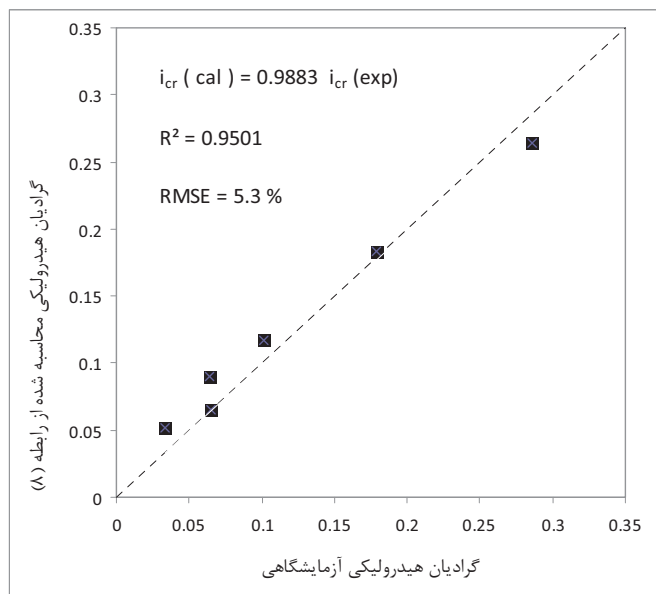
در شکل ۶ مقادیر محاسبه شده گرادیان هیدرولیکی بحرانی با استفاده از رابطه ۸ و مقادیر مشاهداتی در آزمایش‌های سامانی و عمادی (۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تطبیق خوبی بین دو سری از نتایج حاصله وجود داشته و در نتیجه رابطه ۸ می‌تواند با دقت قابل قبولی گرادیان هیدرولیکی بحرانی را تعیین کند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص می‌باشد، با افزایش زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل سنگدانه‌ای، با توجه به تغییر در مشخصات محیط سنگدانه‌ای و مصالح رسوبی، افزایش در مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی را خواهیم داشت. افزایش زاویه ایستایی رسوبات در محیط متخلخل باعث افزایش پایداری رسوبات در محیط سنگدانه‌ای و افزایش مقاومت در برابر جریان و در نهایت افزایش شیب هیدرولیکی لازم برای انتقال این رسوبات از داخل سد را به همراه خواهد داشت.

در شکل ۵ تغییرات شیب هیدرولیکی بحرانی در مقابل نسبت قطر سنگدانه به قطر رسوبات ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت قطر سنگدانه‌ها به قطر رسوبات، با توجه به تغییر در مشخصات محیط سنگدانه‌ای و مصالح رسوبی، کاهش در مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی را خواهیم داشت. این امر به دلیل افزایش قطر منافذ نسبت به اندازه رسوبات و کاهش توربولانس و تلاطم جریان و انتقال ساده‌تر رسوبات از داخل سد و کاهش مقدار گرادیان هیدرولیکی لازم برای انتقال این رسوبات می‌-

جدول ۳- مقادیر شیب هیدرولیکی بحرانی به دست آمده از آزمایش‌های عمادی و سامانی و رابطه (۸)

ردیف	شیب هیدرولیکی بحرانی		زاویه ایستایی رسوبات درجه	شیب هیدرولیکی بحرانی	
	به دست آمده از رابطه ۸	آزمایشگاهی		قطر رسوبات mm	قطر سنگدانه mm
1	0.1833	0.1790	45	0.512	21
2	0.2856	0.2860	55	0.512	14.5
3	0.0670	0.0645	35	0.363	21
4	0.1166	0.1016	42	0.363	14.5
5	0.0352	0.0336	30	0.256	21
6	0.0657	0.0646	36	0.256	14.5



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از فرمول گرادیان هیدرولیکی بحرانی با داده‌های آزمایشگاهی



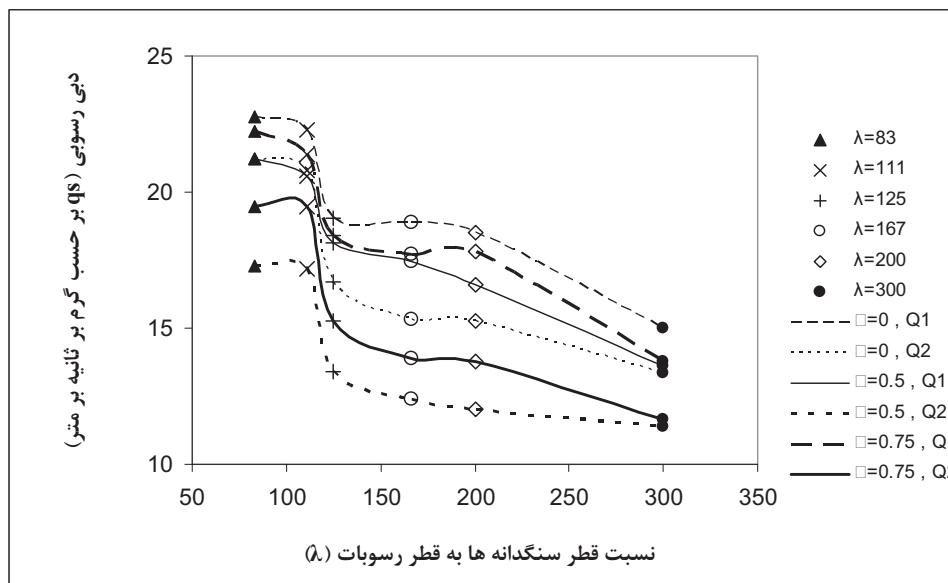
مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار شیب هیدرولیکی، با توجه به تغییر در مشخصات محیط سنگدانه‌ای و مصالح رسوبی مقدار دبی انتقال رسوبات افزایش خواهد یافت. این امر به واسطه مقدار نیروی انتقال ذره رسوبی از داخل سد پاره‌سنگی به دلیل افزایش گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. در عین حال پس از محدوده خاصی از گرادیان هیدرولیکی، ظرفیت انتقال رسوب به حد بیشینه خود رسیده و بیش از آن افزایش نمی‌یابد. به طوری که اگر تمامی آزمایش‌ها را صرف نظر از مقدار  $\lambda$  به صورت یک مجموعه در نظر بگیریم، مشاهده می‌شود که از حدود  $S_e = 0.17$  به بعد تغییر محسوسی در دبی رسوبی مشاهده نمی‌شود. این رفتار در مورد هر یک از گروه‌های شش گانه آزمایشی که مقدار خاصی از  $\lambda$  را دارا هستند نیز صدق می‌کند.

در شکل ۹ مقادیر محاسبه شده پارامتر بدون بعد انتقال رسوبات در سدهای پاره‌سنگی با استفاده از رابطه ۱۸ و مقادیر محاسبه شده این پارامتر با استفاده از داده‌های مشاهداتی در آزمایشگاه، برای ۱۲ آزمایش انجام شده برای صحت سنجی رابطه ۱۸، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تطبیق خوبی بین دو سری از نتایج حاصله وجود داشته و این نشان دهنده دقت قابل قبول رابطه ۲۴ می‌باشد. همچنین در جدول ۴ مشخصات داده‌های به کار رفته در این آزمایش‌ها به همراه مقادیر محاسبه شده پارامتر بدون بعد انتقال رسوبات از این داده‌ها و مقدار محاسبه شده این پارامتر از رابطه ۱۸ ارائه شده است.

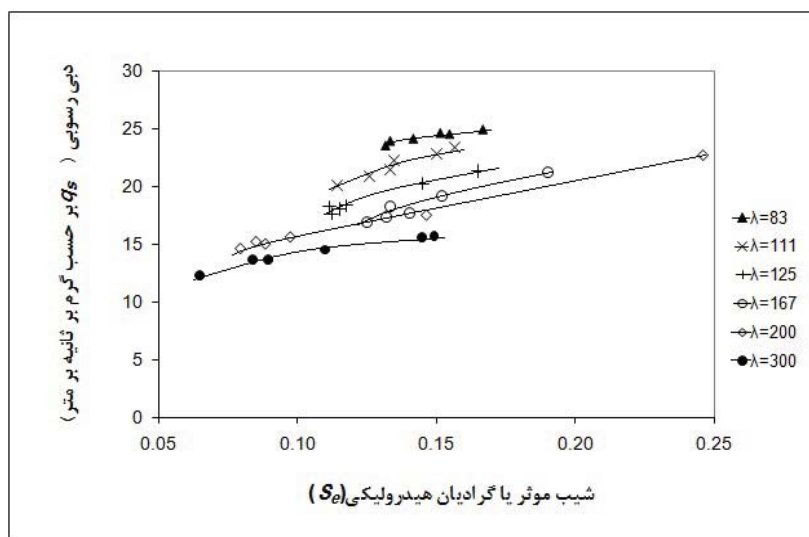
برای استحصال رابطه ۱۸، ۲۴ مورد آزمایش برای سنگدانه‌های ۳ و ۴/۵ سانتی‌متر با دو انحراف معیار ۰/۵ و ۰/۷۵ و سه اندازه رسوبی ۰/۱۵، ۰/۲۷ و ۰/۳۶ میلی‌متر، در محدوده اعداد رینولدز ۶۷۴۳ تا ۱۶۲۱۰ انجام شد و برای اعتبار سنجی این رابطه تعداد ۱۲ آزمایش برای سنگدانه‌های ۳ و ۴/۵ سانتی‌متر با انحراف معیار صفر و سه اندازه رسوبی ۰/۱۵، ۰/۲۷ و ۰/۳۶ میلی‌متر و هر کدام با دو دبی مختلف انجام شدند. بر اساس نتایج حاصله، در شکل ۷ نمودار تغییرات دبی انتقال رسوبات در مقابل نسبت قطر سنگدانه به قطر رسوبات ارائه شده است.

با توجه به شکل ۷ ملاحظه می‌شود، که برای یک دبی و انحراف معیار مشخص، با افزایش  $\lambda$ ، دبی انتقال رسوبات کاهش می‌یابد. این امر به سبب افزایش قطر حفره‌های سنگدانه، کاهش سرعت و به تبع آن کاهش تلاطم آب داخل محیط سنگدانه و ایجاد شرایط مناسب‌تر برای ترسیب رسوبات در منافذ است. در شکل ۷ همچنین نتایج آزمایش‌ها برای انحراف معیارهای مختلف برای قطر سنگدانه‌ها و همچنین دو دبی مختلف  $Q_1$  و  $Q_2$  ( نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برای یک دبی خاص، با افزایش انحراف معیار ظرفیت انتقال رسوب بدنه سد کاهش می‌یابد. همچنین برای یک انحراف معیار مشخص، با افزایش دبی آب ظرفیت انتقال رسوب به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ نمودار تغییرات دبی انتقال رسوبات در مقابل گرادیان هیدرولیکی جریان عبوری ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل



شکل ۷- نمودار تغییرات دبی انتقال رسوبات در مقابل نسبت قطر سنگدانه به قطر رسوبات



شکل ۸- نمودار تغییرات دبی انتقال رسوبات در مقابل شیب هیدرولیکی برای هر یک از گروه‌های شش گانه آزمایش

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده پارامتر بدون بعد انتقال رسوبات از داده‌های آزمایشگاهی و رابطه ۱۸

	محاسبه شده از $q^*$		دبی انتقال رسوبات	قطر رسوبات	انحراف معیار	قطر سنگدانه	ردیف
	رابطه ۱۸	آزمایش‌ها					
	gr/s/m	mm	cm	cm	cm		
1	20.77	0.36	3	0	3		
2	17.39	0.36	3	0	3		
3	22.27	0.27	3	0	3		
4	14.99	0.27	3	0	3		
5	15.69	0.15	3	0	3		
6	15.05	0.15	3	0	3		
7	27.78	0.36	4.5	0	4.5		
8	25.61	0.36	4.5	0	4.5		
9	26.58	0.27	4.5	0	4.5		
10	26.56	0.27	4.5	0	4.5		
11	11.04	0.15	4.5	0	4.5		
12	11.89	0.15	4.5	0	4.5		

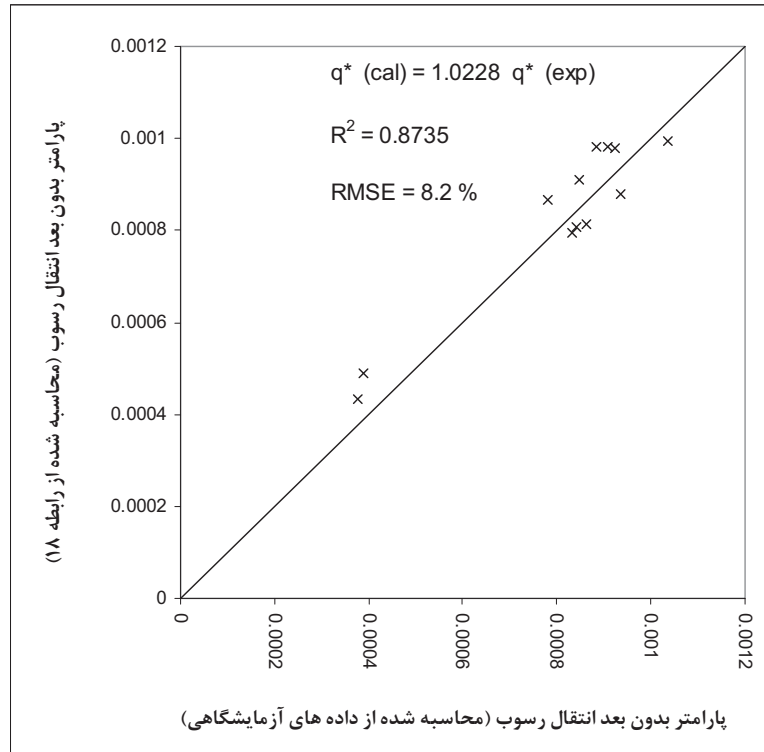
حداکثر ۰/۳۶ میلی‌متر و ۳۶ دبی جریان متفاوت، در محدوده عدد رینولدز ۶۷۴۳ تا ۱۶۲۱۰ انجام شدند.

نمودار مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها برای گرادیان هیدرولیکی بحرانی و دبی انتقال رسوبات و نتایج حاصل از روابط به‌دست آمده برای آن‌ها رسم شد که نشان دهنده همبستگی بالای روابط به‌دست آمده بود. بنابراین این روابط می‌تواند کمک زیادی به محققین و مهندسين در این زمینه بکند.

## بحث و نتیجه گیری

با انجام مجموعه‌ای از آزمایشات بر روی یک سد پاره‌سنگی مستطیل شکل در آزمایشگاه، گرادیان هیدرولیکی بحرانی انتقال رسوبات غیر چسبنده در سدهای پاره‌سنگی در حالت جریان متلاطم بررسی شد. این آزمایش‌ها در ۱۸ حالت مختلف، برای سنگدانه‌های با قطر حداکثر ۴/۵ سانتی‌متر و با سه انحراف معیار متفاوت و ذرات رسوبی معلق با قطر حداکثر ۰/۳۶ میلی‌متر، در محدوده عدد رینولدز ۳۱۷۴ تا ۹۶۶۷ انجام شدند. نتایج نشان می‌دهد که حداقل گرادیان هیدرولیکی لازم برای اینکه ذرات رسوبی معلق در آب در داخل خلل و فرج بدنه سد رسوب ننماید، تابعی نمایی از پارامترهای  $\theta$ ،  $\phi$ ، و  $d_s$  و  $G_s$  است.

همچنین برای بررسی دبی انتقال رسوبات از داخل سدهای پاره-سنگی، مجموعاً ۳۶ آزمایش، برای سنگدانه‌های با قطر حداکثر ۴/۵ سانتی‌متر و با سه انحراف معیار متفاوت و ذرات رسوبی معلق با قطر



شکل ۹- مقایسه نتایج حاصل از فرمول دبی انتقال رسوبات با داده‌های آزمایشگاهی

## منابع

- ۱- سامانی ج. و عمادی ع. ۱۳۸۲. تعیین رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی انتقال رسوبات غیرچسبنده در سدهای تاخیری پاره‌سنگی، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۹ مهر لغایت ۱ آبان ۱۳۸۲، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، ایران، صفحات ۴ تا ۷.
- ۲- عمادی ع.، سامانی ج. و قادری ک. ۱۳۸۴. تعیین ظرفیت انتقال رسوبات غیر چسبنده در سدهای تاخیری پاره‌سنگی. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ لغایت ۱۹ آبان ۱۳۸۴، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، صفحات ۴ تا ۷.
- ۳- مرادلو ج. ۱۳۷۸. مطالعه انسداد فیزیکی محیط‌های متخلخل سدهای باطله‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، فصول ۴ و ۵.
- 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- Li B., Garga V.K., and Davis M.H. 1998. "Relationship for Non-Darcy flow in Rock-fill" , Journal of Hydraulic Engineering , 124(2): 206-212.
- 7- Sakthivadivel R. 1972. "Sediment Transport through a Porous Column" , in H. W. Shen (ed) , Sedimentation , Colorado State University , Fort Collins , CO , pp. 26.1-26.17.
- 8- Schalchli U. 1995. "Basic Equation for Siltation of Riverbed" , Journal of Hydraulic Engineering , 121(3): 274-287.

## Introducing Relationships to Determine the Critical Hydraulic Gradient and Non-cohesive Sediment Transport Discharge in Rock-fill dams

S.A. Mousavi<sup>1\*</sup>- E. Amiri Tokaladany<sup>2</sup>- M.H. Davoudi<sup>3</sup>

Received:8-5-2010

Accepted:23-7-2011

### Abstract

Rockfill dams are a type of hydraulic control structures used to protect river bed in cases where a considerable reservoir volume is available behind these structures; it could mitigate the floods and provide a gradual depletion of incoming volume of water so that the discharge passing downstream is decreased. One of the main issues on utilizing rockfill dams is to keep its permeability enough so that it could be able to pass the flow as well as the sediment load through its body during flooding, avoiding sediments resettlement inside the pores. In this regard, the design of rockfill dams should be carried out so that the available hydraulic gradient is always kept greater than the critical hydraulic gradient, which consequently results in transporting the sediment through the dam body. In this research, a relationship to estimate the critical hydraulic gradient to transport noncohesive sediment through rockfill dam body is introduced. We tested the new equation using a set of published data. Also, using laboratory data obtained from tests on a rectangular rockfill dam, performing dimensional analysis, and using linear regression, an exponential relationship between the required discharge to transport the sediments through the body of rockfill dam, the physical characteristics of rockfill dam, size of the sediments, and the hydraulic characteristics of the flow passing the dam, is prevented. When we investigated the validity of exponential relationship, we found a good accuracy for the equation indicating that the introduced relation predicts the nondimensional sediment transport capacity well.

**Keywords:** Control structures, Rockfill dams, Critical hydraulic gradient, Noncohesive sediments

---

1,2- MSc Student and Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(\* -Corresponding Author Email: sam\_azfam2008@yahoo.com)

3- Assistant Professor, Dehydration and Drought Research Center of Country