



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی گرگان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره چهارم، ۱۳۹۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی ضریب اصطکاک داری و سیب‌خ درون محیط

متخلخل پاره‌سنگی در جریان حاوی رسوب

محمد ملک‌نژاد یزدی^۱، * امیراحمد دهقانی^۲ و محبوبه شهبابی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آستادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه شیراز تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۵

چکیده

سدهای پاره‌سنگی به علت طبیعت نفوذپذیر و توجیه اقتصادی به سبب تأمین مصالح مورد نیاز در محل، از جمله سازه‌هایی هستند که برای تسکین و مهار سیلاب در حوضه‌های آبریز مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. برای طراحی صحیح این‌گونه سدها، شناخت هیدرولیک جریان عبوری از آن‌ها امری ضروری است. با توجه به این‌که تاکنون عمده پژوهش‌ها بر روی رفتار جریان بدون رسوب در این سازه‌ها استوار بوده است، در این پژوهش به منظور بررسی رفتار جریان شامل رسوب، آزمایش‌هایی بر روی مدل آزمایشگاهی انجام شد. این آزمایش‌ها در فلومی شیب‌پذیر با در نظر گرفتن ۳ شیب کف (۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱) و بهره‌گیری از ۴ محیط متخلخل پاره‌سنگی (۲ محیط ریزدانه و ۲ محیط درشت‌دانه) و تزریق ۳ نوع رسوب غیرچسبنده (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متر) انجام شد. با توجه به شبیه‌سازی جریان درون سازه‌های پاره‌سنگی با جریان درون لوله‌های تحت فشار، اصلی‌ترین رابطه این شبیه‌سازی (رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری و سیب‌خ) در شرایط جریان شامل رسوب بررسی و اصلاح شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، به‌طور کلی جریان شامل رسوب از ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به جریان بدون رسوب برخوردار بوده و رابطه‌های ارایه شده توسط پژوهشگران قبلی که در شرایط جریان بدون رسوب استخراج شده است، نمی‌تواند تخمین مناسبی از ضریب اصطکاک داری و سیب‌خ در شرایط جریان شامل رسوب ارایه کند. با توجه به این تفاوت رابطه‌هایی با

* مسئول مکاتبه: amirahmad.dehghani@gmail.com

در نظر گرفتن عامل رسوب در جریان شامل رسوب ارایه شد. انتظار می‌رود از نتایج این پژوهش و رابطه‌های به دست آمده بتوان در جهت تخمین ضریب اصطکاک داریسی و سیباخ در جریان شامل رسوب در محدوده اندازه ذرات و اعداد رینولدز ذکر شده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سد پاره‌سنگی، محیط متخلخل، جریان شامل رسوب، ضریب اصطکاک داریسی و سیباخ، عدد رینولدز

مقدمه

برای کنترل سیلاب می‌توان از طرح‌های آبی مختلفی از جمله سدهای ذخیره‌ای و تأخیری استفاده نمود که سد پاره‌سنگی نمونه‌ای از یک سد تأخیری است. در شرایطی که سدهای نفوذپذیر می‌توانند جایگزین سدهای نفوذناپذیر شوند، جریان طبیعی رودخانه قطع نمی‌شود و به علت تصفیه خودکار آب رودخانه، اکوسیستم محیط حفظ خواهد شد. این سدها را می‌توان در تخلیه آرام مخزن از طریق بدنه آن‌ها به کار برد. در این روش در اندازه حجم سیلاب تغییری حاصل نمی‌شود ولی مقدار حداکثر آن کاهش یافته و به زمان تداوم آن افزوده می‌گردد. به علت نفوذپذیری سدهای پاره‌سنگی، ارتفاع این سدها نسبت به موارد مشابه نفوذناپذیر (سدهای خاکی و بتنی) کوتاه‌تر شده و به حجم مخزن کم‌تری نیاز خواهد بود. عامل بالا، به علاوه تأمین مصالح مورد نیاز از محل، موجب آن شده است تا سدهای پاره‌سنگی دارای توجیه اقتصادی بیشتری باشند. رفتار جریان در این محیط‌ها به دلیل بزرگی اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت‌های بالا و آشفتگی در جریان بسیار پیچیده می‌باشد.

اعتبار قانون داریسی در محدوده جریان آرام است. برای تشخیص آرام بودن جریان از عدد رینولدز استفاده می‌شود. بسیاری از پژوهشگران مقدار بحرانی عدد رینولدز که در آن جریان داخل محیط متخلخل از آرام به آشفته تبدیل می‌شود را بین ۱ تا ۱۲ تعیین کرده‌اند. با این حال در همه موارد کافی است اعتبار قانون داریسی را وقتی که عدد رینولدز برابر یا کوچک‌تر از واحد گرفته می‌شود، پذیرفت. شیدگر (۱۹۷۴) قانون داریسی را در محدوده $0.1 < Re < 75$ و جوی (۱۹۷۱) در محدوده $0.1 < Re < 10$ معتبر دانستند (شایان‌نژاد، ۲۰۰۰).

از این رو بر خلاف محیط‌های ریزدانه که جریان در آن ورقه‌ای بوده و قانون داریسی معتبر است، در محیط‌های درشت‌دانه نمی‌توان از قانون داریسی برای برآورد پارامترهای مختلف جریان استفاده کرد و

برای این منظور اصولاً از رابطه‌های دیگری که بیانگر یک ارتباط غیرخطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط‌ها بوده و به رابطه‌های غیرداریسی معروف هستند استفاده می‌شود. در راستای تشریح جریانات غیرداریسی نظریات مختلفی ارائه شده است. در آخرین پژوهش‌های به‌عمل آمده، پدیده عبور جریان از میان خلل و فرج سدهای پاره‌سنگی با عبور جریان از داخل لوله‌های تحت فشار شبیه‌سازی شده است. در این روش، مانند لوله‌ها عدد رینولدز و فاکتور اصطکاک در محیط سنگ‌دانه‌ای تعیین شده و رابطه‌ای بین آن‌ها برقرار گشته است. این رابطه‌ها به دو شکل زیر به‌صورت نمایی و کسری ارائه شده است (شایان‌نژاد، ۲۰۰۰):

$$f = aRe^b \quad (1)$$

$$f = \frac{a}{Re} + b \quad (2)$$

در پژوهش پیش‌رو با توجه به کاربرد رابطه بین فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز در مباحث مربوط به طراحی سدهای پاره‌سنگی، تأکید بر یافتن ضرایب a و b در رابطه‌های ۱ و ۲ در جریان شامل رسوب می‌باشد. بنابراین در ادامه به پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه توسط سایر پژوهشگران اشاره می‌شود.

احمد و سونادا (۱۹۶۹) اولین پژوهشگرانی بودند که با بی‌بعد کردن معادله ناویر-استوکس و استفاده از آنالیز ابعادی توانستند گروه‌های بدون‌بعادی به‌صورت عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داریسی و یسباخ ارائه دهند (به نقل از شایان‌نژاد، ۲۰۰۰):

$$f = \frac{gcd}{V^2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho Vd}{\mu} \quad (4)$$

داق‌رتی و فرانزینی (۱۹۷۷) شکل دیگری از رابطه داریسی و یسباخ را که از شبیه‌سازی جریان در یک مجرای بسته به‌دست می‌آید، به شکل زیر ارائه نمودند (به نقل از جلال‌الدینی کرکی، ۱۹۹۷):

$$h_f = f \times \frac{\Delta l}{R_h} \times \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

استفانسن (۱۹۷۶)، با شبیه‌سازی عبور جریان در محیط پاره‌سنگی و عبور جریان در لوله‌ها، رابطه‌های زیر را ارائه نمود:

$$Re = \frac{d}{\nu} \times \left(\frac{V}{n}\right) \quad (6)$$

$$i = \frac{f}{gd} \times \left(\frac{V^2}{n}\right) \quad (7)$$

ایشان پس از انجام آزمایش‌های فراوان رابطه ۸ را به صورت زیر ارائه دادند:

$$f = \frac{100}{Re} + k_t \quad (8)$$

در رابطه‌های ۳ تا ۸، V : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، p : جرم مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)، g : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، i : شیب هیدرولیکی (بدون بعد)، c : ضریب ثابت بدون بعد، d : طولی از جریان که در محیط متخلخل قرار گرفته است (متر)، v : لزجت سینماتیکی سیال (مترمربع بر ثانیه)، f : ضریب اصطکاک (بدون بعد)، Δl : طول جریان سیال (متر)، R_H : شعاع هیدرولیکی (متر)، n : تخلخل محیط (بدون بعد)، d : قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها در محیط متخلخل (متر) و Re : عدد رینولدز جریان (بدون بعد) می‌باشند. همچنین، k_t : ضریب اصطکاک در جریان متلاطم بوده که استفانسن مقادیر جدول ۱ را برای آن در جریان متلاطم ارائه کرد.

جدول ۱- مقادیر ضرایب اصطکاک برای انواع محیط‌های سنگ‌دانه‌ای در رابطه ۸ (استفانسن، ۱۹۷۹).

نوع سنگ‌دانه محیط متخلخل	k_t
سنگ مرمر صیقل داده شده	۱
سنگ نیمه‌مدور	۲
سنگ گوشه‌دار	۴

هررا و فلتون (۱۹۹۱) پژوهش‌های استفانسن را ادامه دادند. ایشان سعی کردند نقص‌های پژوهش‌های استفانسن را برطرف نمایند. در اولین گام برای تشریح دانه‌بندی و اعمال آن در رابطه‌های، انحراف معیار (۵) را معرفی نمودند. با استفاده از رابطه‌های آماری ایشان رابطه‌های زیر را ارائه نمودند:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (9)$$

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (d - d_i)^2 \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]^{1/2} \quad (10)$$

سپس برای محاسبه مقادیر فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز رابطه‌های زیر را ارایه کردند:

$$f = \frac{igd}{V^2} \quad (11)$$

$$Re = \frac{(d - \delta)V}{\nu} \quad (12)$$

که در رابطه‌های ۹ تا ۱۲، d : قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها (سانتی‌متر)، σ : انحراف معیار (سانتی‌متر)، d_i : متوسط قطر i امین سایز سنگ‌ها که بین دو الک باقی می‌ماند و مقدار آن با متوسط‌گیری بین قطر سوراخ‌های دو الک به‌دست می‌آید (سانتی‌متر) و w_i : درصد وزنی i امین اندازه سنگ‌ها، V : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) و ν : لزجت سینماتیکی سیال (مترمربع بر ثانیه) می‌باشند.

آزمایش‌های هررا و فلتون برای دو قطر متوسط ۳/۱۸ سانتی‌متر و ۱/۵۹ سانتی‌متر در دو سازه پاره‌سنگی با طول متفاوت انجام پذیرفت. در هر آزمایش برای هر سازه و قطر سنگ‌دانه‌های متفاوت، چهار انحراف معیار ۱/۰۲، ۰/۷۶، ۲۵/۰ و ۰/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. دامنه تغییرات دبی در طول انجام آزمایش‌ها از ۰/۰۰۱۲ مترمکعب بر ثانیه تا ۰/۰۰۳۸ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده بود. در نهایت تعداد ۴۸ آزمایش انجام شد. هررا و فلتون برای محاسبه سرعت جریان در محیط متخلخل سنگ‌دانه‌ای رابطه ۱۳ را ارایه کردند:

$$V = \frac{Q}{h_{ave} \cdot w} \quad (13)$$

که در آن، Q : دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، h_{ave} : میانگین ارتفاع آب درون محیط متخلخل (متر)، W : عرض محیط متخلخل (متر) است. رابطه ارایه شده توسط این دو پژوهشگر با ضریب همبستگی ۸۶ درصد به شکل رابطه ۱۴ می‌باشد:

$$f = \frac{3858}{Re} + 17/6 \quad (14)$$

قاضی‌مرادی و معصومی (۱۹۹۵) به انجام پژوهش‌هایی در ادامه پژوهش‌های هررا و فلتون پرداختند. تفاوت عمده پژوهش‌های ایشان با پژوهش‌های هررا و فلتون (۱۹۹۱) در انتخاب اندازه سنگ‌دانه‌ها بود. مصالح به‌کار رفته در این آزمایش‌ها سنگ‌دانه‌های شکسته با قطر متوسط $4/2 - 12/5$ سانتی‌متر بوده و از 4 انحراف معیار استفاده شد. آزمایش‌های در فلومی به طول 10 متر و عرض 60 سانتی‌متر انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها رابطه 15 با ضریب همبستگی 91 درصد ارایه شد:

$$f = \frac{4670}{Re} + 14/4 \quad (15)$$

بینگ‌جوم و گارگا (۱۹۹۸) با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های انجام شده توسط هانسن که بر روی سنگ‌دانه‌هایی با قطر متوسط $4 - 1/6$ سانتی‌متر انجام شده بود، رابطه‌های 16 و 17 را ارایه نمودند:

$$f = \frac{98}{Re} + 3 \quad (16)$$

$$f = 8/7 Re^{-0.17} \quad (17)$$

جلال‌الدینی‌کرکی (۱۹۹۷) با انجام آزمایش‌هایی در مؤسسه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کرج، رابطه‌ای بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری و ویسباخ ارایه نمود. آزمایش‌ها با سنگ‌دانه‌های به قطر $5/625 - 9/375$ سانتی‌متر و انحراف معیار $1/875 - 0$ سانتی‌متر انجام شد. آزمایش‌ها بر روی دو نمونه محیط متخلخل با دیواره‌های قائم و شیب‌دار انجام شد. ایشان در نهایت رابطه 18 را ارایه نمودند:

$$f = \frac{15000}{Re} + 7/855 \quad (18)$$

شایان‌نژاد (۲۰۰۰) مدلی نرم‌افزاری برای تحلیل جریان در سدهای پاره‌سنگی ارائه کرد. این مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی هانسن (۱۹۹۲) بهینه شد. مدل ارائه شده برای دو حالت جریان یک‌بعدی و دوبعدی، رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری ویسباخ را به صورت رابطه‌های ۱۹ و ۲۰ ارائه کرد:

$$f = 5 \varepsilon \text{Re}^{-1/0.77} \quad (19)$$

$$f = 80 \text{Re}^{-1/0.34} \quad (20)$$

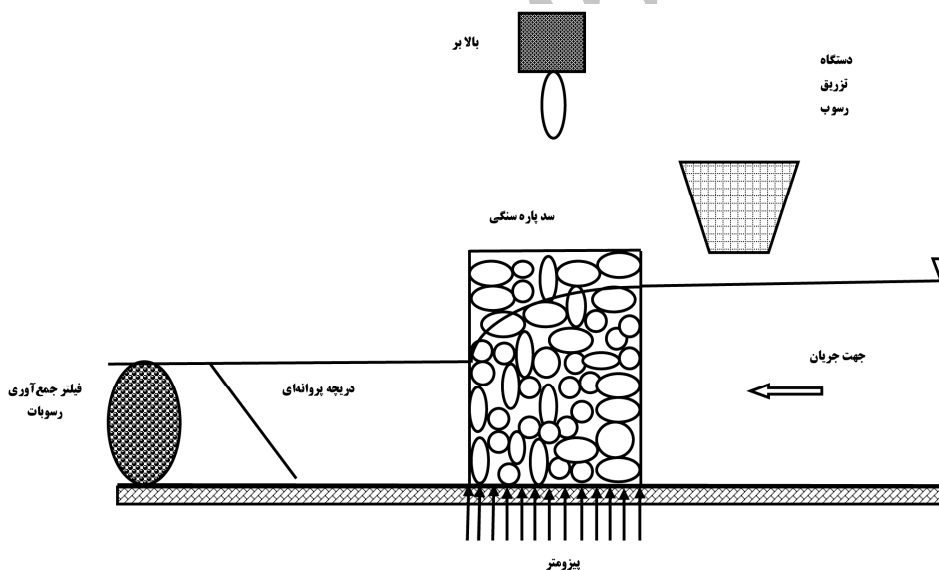
شایان ذکر است در رابطه‌های ۱۴ تا ۲۰، Re از رابطه ۱۲ و f از رابطه ۱۱ محاسبه شده‌اند. به‌طور کلی جریان شامل رسوب دارای افت هیدرولیکی بیش‌تری نسبت به جریان بدون رسوب است. (ژانک و ژولین، ۲۰۰۱). سازه‌های پاره‌سنگی با قرارگیری در مسیر جریان و توانایی عبور جریان از داخل خود، الگوی جریان را به‌طور محسوسی تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک شدن به سازه سد پاره‌سنگی، آرایش خود را از دست داده و به پیروی از ساختار هندسی و نوع سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. وجود سنگ‌دانه‌ها سبب تشکیل گردابه‌هایی^۱ در اطراف خود شده که این گردابه‌ها دارای شدت و ضعف متفاوتی هستند. هرچه محیط متخلخل دارای سنگ‌دانه‌هایی با قطر کوچک‌تر باشد، گردابه‌های تشکیل شده باعث آشفتگی بیش‌تری خواهند شد (ملک‌نژاد یزدی، ۲۰۱۰).

همان‌طور که مشاهده شد در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته قبلی، تنها رفتار آب بدون رسوب در محیط متخلخل به‌منظور ارائه رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است. غلظت بالای رسوب در هنگام وقوع سیلاب می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در رابطه مورد اشاره شود. در این پژوهش، به‌منظور بررسی تغییرات ایجاد شده در رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری ویسباخ در محیط متخلخل پاره‌سنگی در شرایط وقوع جریان شامل رسوب، مدلی آزمایشگاهی طراحی و آزمایش‌هایی انجام شد.

1- Vortex

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی: برای ساخت مدل، از فلومی با طول ۱۲ متر، عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده گردید. دیواره و کف این فلوم از جنس پلکسی‌گلاس بوده که امکان مشاهده جریان را فراهم می‌نمود. به‌منظور ایجاد محیط متخلخل پاره‌سنگی، از محفظه‌ای به طول ۸۰ سانتی‌متر، عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که از ورقه‌های مشبک فلزی ساخته شده بود استفاده گردید. همچنین برای جابه‌جایی مدل سد و شستشوی آن پس از انجام هر آزمایش از بالابری با توان حمل ۶۰۰ کیلوگرم بار که در سقف آزمایشگاه تعبیه شده، استفاده گردید، در ضمن به‌منظور قرائت پروفیل سطح آب در داخل بدنه و طرفین سد پاره‌سنگی تعداد ۱۵ عدد پیزومتر به فاصله‌های ۶ سانتی‌متری در زیر بدنه سد تعبیه شد تا بتوان در هنگام انجام آزمایش پروفیل‌برداری از سطح آب انجام داد. وجود محفظه آهنی سبب شد تا محیط متخلخل پاره‌سنگی شکل ظاهری و آرایش خود را در تمام آزمایش‌ها حفظ نماید. در شکل ۱، نمایی از مدل مورد استفاده مشاهده می‌شود:



شکل ۱- نمایی از مدل طراحی شده سد پاره‌سنگی در آزمایشگاه.

به‌منظور بررسی رفتار جریان دارای بار رسوب در سدهای پاره‌سنگی نیاز به ایجاد جریان شامل رسوب با نرخ تزریق مشخص می‌باشد. در این پژوهش از یک دستگاه تزریق رسوب که در بالادست سد قرار می‌گرفت، استفاده شد. این دستگاه دارای سه قسمت، مخزن تغذیه رسوب، محور استوانه‌ای برای تزریق رسوب و موتور الکتریکی با دور حرکت متغیر برای تنظیم نرخ تزریق رسوب بود.

برای تنظیم سطح آب در پایین دست سازه و تأمین استغراق موردنظر برای انجام آزمایش‌ها، دریچه پروانه‌ای در انتهای فلوم ساخته شد، همچنین به جهت جمع‌آوری رسوبات عبوری در پایان هر آزمایش، فیلتر توری پس از دریچه قرار گرفت تا بتوان پس از انجام هر آزمایش رسوب عبوری را جمع و توزین نمود. به‌منظور تأمین آب مورد نیاز برای مدل آزمایشگاهی از یک تانک زیرزمینی به حجم ۱۲ مترمکعب استفاده گردید. آب این مخزن به‌وسیله یک لوله ۲ اینچی و با استفاده از یک دستگاه پمپ سانتریفیوژ با الکتروموتوری به قدرت ۲۰ کیلووات به مخزن موجود در بالادست کانال منتقل و دبی‌هایی از ۱-۳۵ لیتر بر ثانیه تأمین شد. قرائت دبی با یک دستگاه فلومتر به دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه که در ایستگاه پمپاژ قرار داشت انجام و دبی‌های موردنظر با شیرفکله موجود بر روی لوله رانش پمپ تنظیم می‌گردید، شایان ذکر است دستگاه فلومتر قبل از شروع آزمایش‌ها به روش حجمی کالیبره شد. همچنین برای تنظیم فلوم در شیب موردنظر، از یک دستگاه جک هیدرولیک که در ابتدای فلوم قرار داشته و توانایی تأمین شیب‌های موردنظر را دارا بود، استفاده شد.

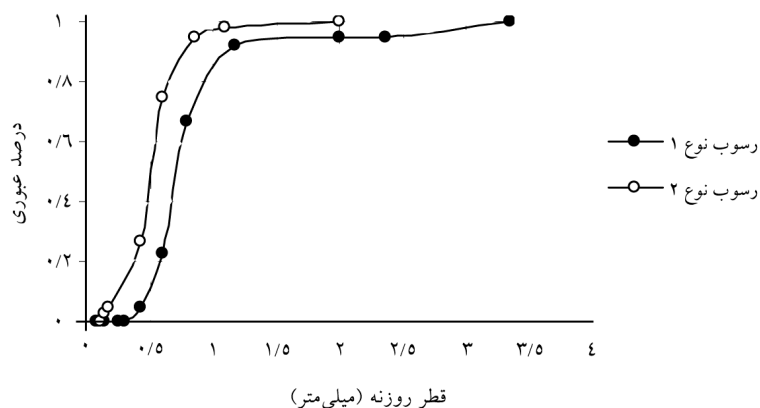
مصالح محیط‌های متخلخل آزمایش‌های این پژوهش از سنگ‌دانه‌های گردگوشه (رودخانه‌ای) تهیه شد. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده از مصالح موجود در معدن سنگ‌شکنی واقع در ۱۰ کیلومتری جاده گرگان- کردکوی تهیه و پس از دانه‌بندی مصالح، مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تأثیر اندازه ذرات محیط متخلخل بر هیدرولیک جریان، در این پژوهش از محیط‌هایی با قطر متوسط ۵ و ۱۲ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به این‌که در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته قبلی آزمایش‌ها با سنگ‌دانه‌هایی با قطر متوسط زیر ۵ سانتی‌متر انجام شده است، استفاده از این دو قطر علاوه بر تفاوت با پژوهش‌های قبلی، باعث انجام آزمایش‌هایی در مقیاس نزدیک به واقعیت گردید. همچنین به جهت تأثیر پارامتر σ در محیط‌های متخلخل، دو انحراف معیار ۱ و ۲ سانتی‌متر برای این محیط‌ها در نظر گرفته شد. محاسبه‌های مربوط به وزن سنگ‌دانه‌های هر محیط با استفاده از رابطه‌های ارائه شده توسط هررا و فلتون (۱۹۹۱)، (رابطه‌های ۹ و ۱۰) انجام شد. در جدول ۲، مشخصات چهار محیط متخلخل ارائه شده است.

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۰)، شماره (۴) ۱۳۹۲

جدول ۲- مشخصات محیط‌های متخلخل مورد استفاده در پژوهش.

جمع کل (کیلوگرم)	وزن سنگ‌دانه (کیلوگرم)	قطر سنگ‌دانه (سانتی‌متر)	انحراف معیار (سانتی‌متر)	قطر متوسط سنگ‌دانه (سانتی‌متر)
۶۵۰	۳۲۵	۴	۱	۵
	۳۲۵	۶		
۶۵۰	۳۲۵	۱۱	۱	۱۲
	۳۲۵	۱۳		
۴۵۸	۱۵۷	۲/۷۵	۲	۵
	۶۰	۴		
	۱۵۰	۶		
	۹۱	۸		
۳۵۰	۸۰/۵	۹	۲	۱۲
	۶۳	۱۱		
	۱۵۷/۵	۱۳		
	۴۹	۱۵		

به‌منظور تزریق رسوب به جریان، از دو نوع رسوب با دانه‌بندی متفاوت که در کارخانه تولید ماسه صنعتی واقع در ۵ کیلومتری جاده تهران- فیروزکوه تهیه شده است، استفاده شد (رسوب نوع ۱ با ضریب یکنواختی ۱/۵ و رسوب نوع ۲ با ضریب یکنواختی ۲/۴). برای به‌دست آوردن دانه‌های رسوب موردنظر برای انجام آزمایش‌ها، این مصالح در آزمایشگاه الک شدند. برای الک کردن این رسوبات از الک‌های استاندارد ASTM با شماره‌های ۱۸، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ استفاده شد. پس از الک کردن، رسوبات باقی‌مانده روی الک‌های استاندارد ۲۵، ۳۵ و ۴۵ به‌عنوان رسوبات موردنظر، استفاده شدند. قطر میانگین این رسوبات ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متر بودند. برای اطمینان از غیرچسبیده بودن رسوبات، مصالح الک شده یکبار با آب شسته شدند تا از نبود سیلت و رس در آن‌ها اطمینان به‌دست آید. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده، مشاهده می‌شود.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده.

روش انجام آزمایش‌ها: برای هر محیط متخلخل، ابتدا فلوم در شیب موردنظر قرار می‌گرفت. پس از تنظیم شیب، پمپ با دبی موردنظر شروع به کار کرده و استغراق پایین دست بدنه با استفاده از دریچه پروانه‌ای تأمین می‌شد. پس از به تعادل رسیدن جریان، با استفاده از پیزومترهای تعبیه شده در مدل، ارتفاع آب در بالادست، داخل و پایین دست سد قرائت شدند.

برای بررسی تفاوت ضرایب رابطه عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری و سیسباخ در دو حالت جریان بدون رسوب و شامل رسوب، پس از قرائت پروفیل سطح آب در حالت بدون رسوب، رسوب موردنظر در مخزن دستگاه تزریق رسوب ریخته شده و دستگاه شروع به تزریق می‌کرد. پس از تخلیه مخزن رسوب دستگاه، بار دیگر ارتفاع سطح آب داخل پیزومترها قرائت و پروفیل سطح آب در حالت جریان شامل رسوب برداشت شد.

شایان ذکر است پس از جمع‌آوری کامل رسوب در بالادست و پایین دست بدنه، بار دیگر پمپ شروع به کار کرده و تمامی رسوب موجود در بدنه سد را شسته و به پایین دست انتقال می‌دهد. با جمع‌آوری رسوب این مرحله، آزمایش به پایان می‌رسد. رسوب هر قسمت به تفکیک در آون با دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و پس از اطمینان از خشک شدن، دوباره برای انجام آزمایش بعدی مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

قبل از شروع به کار سیستم برای انجام آزمایش‌ها و برداشت داده‌های آن، نیاز به تعیین میزان و زمان مورد نیاز برای انجام عملیات تزریق رسوب در آزمایش‌ها بود. به این منظور، آزمایش‌ها با تنظیم

دور موتور الکتریکی دستگاه تزریق رسوب در ۳ مرحله انجام شد. در مرحله اول، چرخش محور استوانه‌ای دستگاه با حداکثر دور موتور الکتریکی تنظیم گردید. در مرحله دوم، چرخش محور استوانه‌ای با دور متوسط موتور الکتریکی تنظیم و در مرحله سوم چرخش این محور با حداقل دور موتور الکتریکی تنظیم گردید. در هر مرحله مخزن رسوب دستگاه تزریق رسوب با وزن‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۲۸ کیلوگرم توسط رسوب با قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر پر و آزمایش‌ها انجام شد. شیب فلوم در این آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. این آزمایش‌ها بر روی دو محیط متخلخل ریزدانه (قطر متوسط ۵ سانتی‌متر و انحراف معیار ۲ سانتی‌متر) و درشت‌دانه (قطر متوسط ۱۲ سانتی‌متر و انحراف معیار ۲ سانتی‌متر) انجام شد. با توجه به انتخاب قطر رسوب تزریقی (درشت‌ترین قطر موجود) و شیب کانال (کم‌ترین شیب) و انتخاب محیط‌های متخلخلی با بیش‌ترین انحراف معیار (متراکم‌ترین حالت)، انتظار می‌رود نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها را بتوان به محیط‌ها و شیب‌های دیگر تعمیم داد. نتایج مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد، هم‌زمان با شروع عملیات تزریق رسوب، از کف محیط متخلخل شاهد شکل‌گیری فرم گوه‌شکلی بوده و این فرم تا مرحله‌ای از عملیات تزریق رسوب رشد پیدا خواهد کرد. بررسی بیش‌تر این پدیده نشان داد رشد این گوه در حدود ثانیه ۱۴۰ ام از شروع عملیات تزریق رسوب رفته رفته کاهش و به شکل ثابتی خواهد رسید. به‌عبارت دیگر پس از ثانیه ۱۴۰ ام به‌علت پایدار شدن فرم شکل گرفته در داخل محیط متخلخل، می‌توان به عملیات تزریق رسوب پایان داد. نتایج نشان داد پس از گذشت ۱۴۰ ثانیه از تزریق رسوب به جریان مقدار ۲۰ کیلوگرم رسوب تزریق شده است. دستیابی به این نتیجه بیانگر این مطلب است که می‌توان در تمامی آزمایش‌ها مخزن تغذیه رسوب دستگاه را با ۲۰ کیلوگرم از رسوب موردنظر پر و ۱۴۰ ثانیه رسوب به جریان تزریق کرد.

به‌منظور مشخص کردن مکان قرارگیری دستگاه تغذیه رسوب برای ایجاد جریانی شامل بار معلق، آزمایش‌های مقدماتی انجام شد. این آزمایش‌ها با توجه به هیدرولیک جریان در بالادست (شیب کانال، دبی، سرعت و عمق جریان) و قطر رسوب تزریقی برای هر سری از آزمایش‌ها انجام شد. در نهایت با قرارگیری دستگاه تزریق رسوب در فاصله تقریبی ۳۰ سانتی‌متر از بالادست مدل سد، اطمینان به‌دست آمد، جریانی شامل بار معلق از داخل بدنه سد عبور خواهد کرد.

در این پژوهش با دارا بودن ۴ نوع محیط متخلخل، ۳ شیب، ۳ نوع رسوب و ۴ دبی اعمالی به سیستم، در مجموع ۱۴۴ آزمایش انجام شد.

آنالیز ابعادی: رابطه‌های حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان به‌طور مستقیم از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود به‌دست آورد. در چنین مواردی سعی می‌شود تا برای استخراج رابطه ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا همه متغیرهای لازم در به‌وجود آوردن آن پدیده نقش دارند، مشخص گردند (شفاعی‌بجستان، ۲۰۰۵). در این پژوهش، به‌منظور ارایه رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب اصطکاک داریسی و سیبک در شرایط شامل رسوب و بدون رسوب، با استفاده از روش باکینگهام، آنالیز ابعادی انجام شد.

ضریب داریسی و سیبک در شرایط بدون رسوب به پارامترهای مختلفی مطابق رابطه ۲۱ بستگی دارد:

$$\Phi = (V, D, v, \Delta H, L, \rho, g) = 0 \quad (21)$$

با استفاده از روش باکینگهام و انتخاب ۳ پارامتر V ، ρ و D به‌عنوان پارامترهای تکراری، ۴ عدد بدون بعد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\pi_1 = \frac{VD}{v} \quad (22)$$

$$\pi_2 = \frac{\Delta H}{D} \quad (23)$$

$$\pi_3 = \frac{L}{D} \quad (24)$$

$$\pi_4 = \frac{Dg}{V^2} \quad (25)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عدد π_1 ، عدد رینولدز جریان می‌باشد. از تقسیم عدد π_2 بر π_3 شیب هیدرولیکی جریان (i)، به‌دست خواهد آمد:

$$i = \frac{\pi_2}{\pi_3} = \frac{\Delta H/D}{L/D} = \frac{\Delta H}{L} \quad (26)$$

همچنین از ترکیب شیب هیدرولیکی و عدد π_4 ، ضریب f به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$f = \pi_4 \times \frac{\Delta H}{L} = \frac{Dgi}{V^2} \quad (27)$$

بنابراین در جریان بدون رسوب خواهیم داشت:

$$f = \Phi(\text{Re}) \quad (28)$$

پارامترهای مؤثر در محاسبه ضریب اصطکاک جریان شامل رسوب، همان پارامترهای رابطه ۲۱، به‌علاوه قطر ذرات رسوب d_s خواهند بود. به‌عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$\Phi = (V, D, \nu, \Delta H, L, \rho, g, d_s) = 0 \quad (29)$$

در این جریان نیز، با استفاده از روش باکینگهام و انتخاب ۳ پارامتر V, ρ, D به‌عنوان پارامترهای تکراری، ۵ عدد بدون بعد به‌دست خواهد آمد که همان اعداد π_1 تا π_4 بوده و برای عدد π_5 خواهیم داشت:

$$\pi_5 = \frac{D}{d_s} \quad (30)$$

که عدد π_5 مطابق پژوهش‌های صورت گرفته توسط ساکتیوادپول (۱۹۷۲)، اگر D اندازه ذرات تشکیل‌دهنده محیط متخلخل و d_s اندازه ذرات رسوبی باشد، نسبت این دو پارامتر اندازه ذرات محیط نامیده و با λ نشان داده می‌شود (به نقل از شایان‌نژاد، ۲۰۰۰).
بنابراین در جریان شامل رسوب، خواهیم داشت:

$$f = \Phi(\text{Re}, \lambda) \quad (31)$$

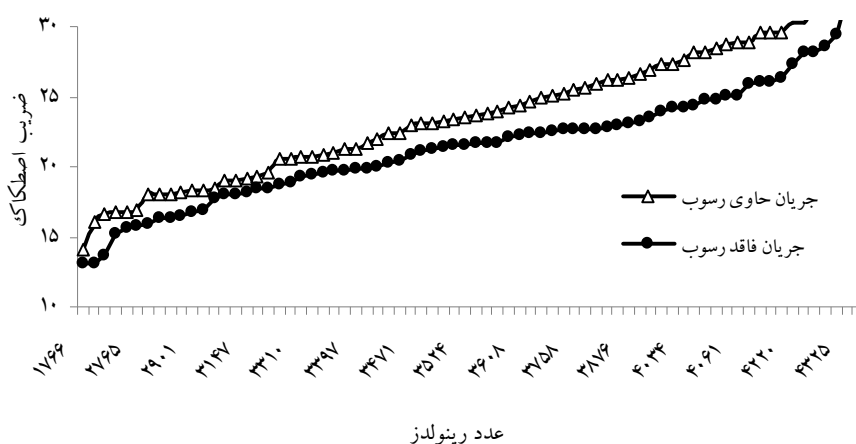
در رابطه‌های ۲۱ تا ۳۱، V : سرعت جریان (متر بر ثانیه)، D : قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها (سانتی‌متر)، ν : لزجت سینماتیکی سیال (مترمکعب بر ثانیه)، ΔH : اختلاف عمق آب بالادست و پایین‌دست سد (سانتی‌متر)، L : طول نمونه سد (سانتی‌متر)، d_s : قطر متوسط رسوبات (سانتی‌متر)، ρ : جرم حجمی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) و g : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، Re : عدد رینولدز جریان و f : ضریب اصطکاک داری و سیسباخ می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی تفاوت ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب و بدون رسوب: به‌نظر می‌رسد جریان در محیط ریزدانه به‌دلیل وجود خلل و فرج ریزتر و افزایش طول مسیر در محیط سنگ‌دانه‌ای و همچنین

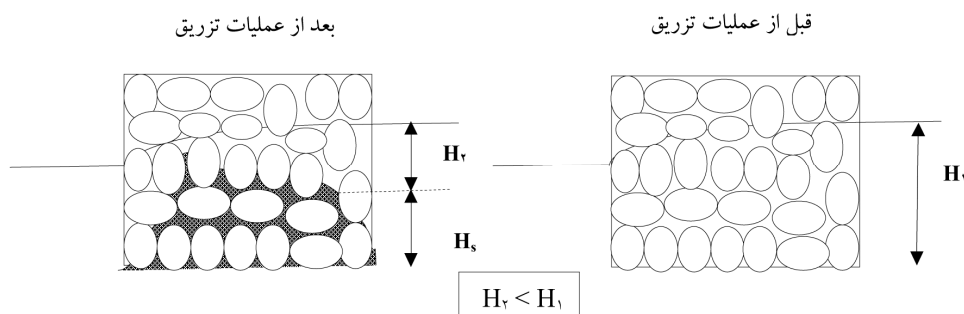
ارتباط بیشتر با سطح سنگ‌دانه‌ها رفتاری متفاوت با محیط درشت‌دانه از خود نشان دهد. مجموع عوامل بالا سبب می‌شود افت هیدرولیکی در محیط ریزدانه بیش‌تر از محیط درشت‌دانه باشد. علاوه بر آن نشست رسوب در داخل محیط متخلخل سبب تغییر پارامترهای هیدرولیکی آن مانند عمق آب درون‌سازه و سرعت آن خواهد شد. بنابراین از رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ که در شرایط جریان زلال استخراج شده است، نمی‌توان در شرایط جریان شامل رسوب استفاده کرد و انتظار می‌رود مقدار ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب بیش‌تر باشد. به‌منظور بررسی تفاوت مقدار ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ آزمایش‌هایی در شرایط یکسان و در دو حالت شامل رسوب و بدون رسوب انجام شد.

نتایج به‌دست آمده از مشاهده‌های آزمایشگاهی نیز نشان داد، مقدار ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ در شرایط جریان شامل رسوب از جریان بدون رسوب، بیش‌تر است. شکل ۳، بیانگر تفاوت مقادیر ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ در این دو حالت می‌باشد. در این شکل، عدد رینولدز از رابطه ۱۲ و ضریب اصطکاک از رابطه ۱۱ محاسبه شده‌اند.



شکل ۳- مقایسه ضریب اصطکاک جریان شامل رسوب و بدون رسوب در محیط متخلخل ریزدانه.

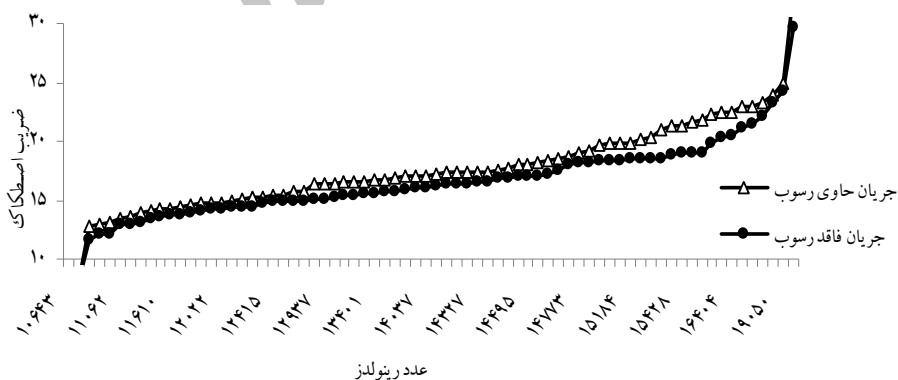
انجام عملیات تزریق رسوب و نشست رسوب در محیط متخلخل سبب کاهش سطح مقطع مفید جریان و در نتیجه افزایش سرعت درون محیط متخلخل می‌شود که منجر به افزایش افت خواهد شد (شکل ۴).



شکل ۴- کاهش سطح مقطع مفید جریان در اثر تزریق رسوب.

آزمایش‌های این پژوهش بر روی دو نوع محیط متخلخل ریزدانه و درشت‌دانه انجام شده است. تاکنون پژوهشی توسط پژوهشگران قبلی بر روی محیط متخلخل درشت‌دانه (قطر متوسط ۱۲/۵ سانتی‌متر) صورت نگرفته است، بنابراین انجام آزمایش‌هایی در این مقیاس که تقریباً شرایطی نزدیک به واقعیت دارد، ضروری به نظر می‌رسید.

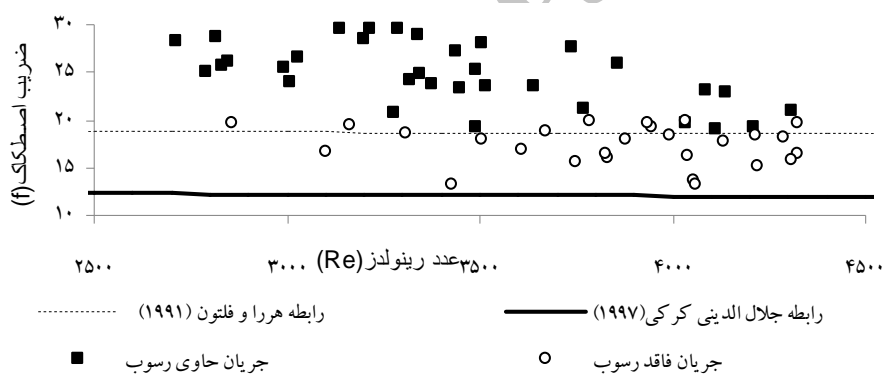
همان‌گونه که در شکل ۵، مشخص است تفاوت ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در جریان شامل رسوب با جریان بدون رسوب، در محیط درشت‌دانه نیز روندی مشابه محیط ریزدانه را دارا است. هر چند، تفاوت کم‌تری بین ضریب اصطکاک در دو حالت جریان شامل رسوب و بدون رسوب در این محیط وجود دارد. در این شکل، عدد رینولدز از رابطه ۱۲ و ضریب اصطکاک از رابطه ۱۱ محاسبه شده‌اند.



شکل ۵- مقایسه ضریب اصطکاک جریان شامل رسوب و بدون رسوب در محیط متخلخل درشت‌دانه.

در بررسی علت این پدیده به‌نظر می‌رسد، به‌دلیل آن‌که نشست رسوبات در داخل محیط متخلخل درشت‌دانه، تا حدودی سبب یکنواختی بستر عبور جریان خواهد شد، بنابراین ضریب اصطکاک در دو حالت جریان شامل رسوب و بدون رسوب به هم نزدیک‌تر باشند، به‌علاوه از آن‌جا که محیط درشت‌دانه دارای خلل و فرج بزرگ‌تری نسبت به محیط ریزدانه می‌باشد، قدرت گردابه‌های تولید شده در این محیط در هر دو حالت شامل رسوب و بدون رسوب از نظر شدت و ضعف به هم نزدیک‌تر هستند.

در شکل ۶، نتایج آزمایشگاهی این پژوهش در دو حالت جریان آب زلال و آب شامل رسوب با نتایج به‌دست آمده از رابطه‌های ارایه شده توسط هررا و فلتون (۱۹۹۱) و نیز جلال‌الدینی کرکی (۱۹۹۷) که در قطر و نوع سنگ‌دانه‌هایی نزدیک به این پژوهش صورت گرفته است، مقایسه شده است. با توجه به شکل مشخص است که در یک محدوده عدد رینولدز ثابت برای هر دو نوع جریان ($2500 < Re < 4500$)، رابطه‌های ارایه شده توسط پژوهشگران قبلی به مقادیر ضرایب اصطکاک جریان بدون رسوب نزدیک‌تر است و این در حالی است که ضرایب اصطکاک در جریان شامل رسوب دارای مقادیر به مراتب بیش‌تری می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه ضرایب اصطکاک جریان بدون رسوب و شامل رسوب با رابطه هررا و فلتون (۱۹۹۱) و جلال‌الدینی کرکی (۱۹۹۷).

با توجه به نقش سدهای پاره‌سنگی در ایجاد تأخیر پیک سیلاب که یقیناً جریانی شامل رسوب تلقی می‌شود، استفاده از رابطه‌های استخراج شده در جریان بدون رسوب برای طراحی این‌گونه سدها از دقت مناسبی برخوردار نیست.

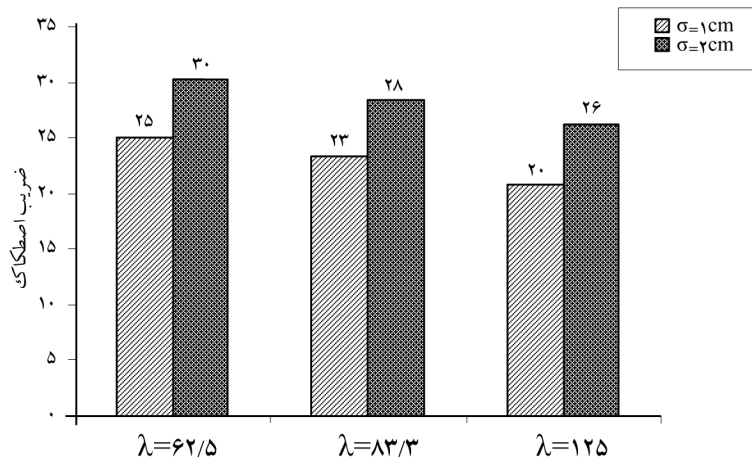
به جهت کاربرد مستقیم رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری در مباحث طراحی این سدها (محاسبه ارتفاع سد پاره‌سنگی)، استفاده از رابطه‌های جریان زلال می‌تواند سبب بروز خطا در این محاسبات شود، به این علت نیاز است تا رابطه بالا در شرایط جریان شامل رسوب اصلاح شود.

ارایه رابطه عدد رینولدز و ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب: نتایج به دست آمده از پژوهش‌های گذشته در زمینه هیدرولیک جریان متلاطم در محیط متخلخل پاره‌سنگی در ۳ دسته کلی، تقسیم‌بندی می‌شود که در جدیدترین آن‌ها رابطه‌ای بین فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز به صورت نمایی برقرار شده است (شایان‌نژاد، ۲۰۰۰). به دلیل کاربرد این رابطه در مباحث مربوط به طراحی سدهای پاره‌سنگی، در ادامه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده، رابطه‌ای نمایی ارایه شده است.

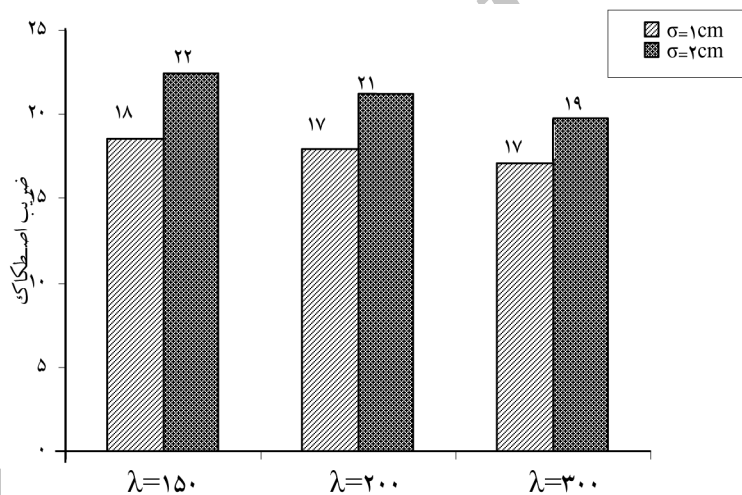
با توجه به این‌که در این پژوهش از سنگ‌دانه‌هایی با قطر متوسط ۱۵-۲/۷۵ سانتی‌متر استفاده شده است، بنابراین اعداد رینولدز تولید شده در آزمایش‌ها دارای محدوده وسیع‌تری نسبت به پژوهش‌های قبلی بوده و رابطه ارایه شده نیز در محدوده وسیع‌تری از عدد رینولدز دارای اعتبار است.

با توجه به بیش‌تر بودن ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب، انتظار می‌رود، این ضریب علاوه بر عدد رینولدز به عامل دیگری که بیانگر اثرگذاری رسوب باشد نیز بستگی داشته باشد. با توجه به این‌که در این آزمایش‌ها اثر ۳ پارامتر s ، Q و d_s در هیدرولیک جریان شامل رسوب بررسی شد و با توجه به این‌که s و Q می‌توانند اثر مستقیمی بر گرادیان هیدرولیکی (i) و سرعت (V) داشته باشند، بنابراین d_s به عنوان عاملی اثرگذار در افزایش ضریب اصطکاک داری و سیب‌خ در جریان شامل رسوب در نظر گرفته شد. با بهره‌گیری از رابطه‌های هیدرولیک جریان در لوله‌ها، می‌توان از شبیه‌سازی جریان شامل رسوب در محیط متخلخل پاره‌سنگی با جریان درون لوله‌های زبر عامل بدون بعد مؤثر را مشخص کرد.

از آن‌جا که (ε/D) در لوله‌ها بیانگر زبری نسبی می‌باشد، می‌توان پارامتر بدون بعد λ (نسبت قطر سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل به قطر رسوب تزریقی) را به عنوان عامل بیانگر وضعیت رسوب در جریان شامل رسوب معرفی کرد. بررسی شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد در یک عدد رینولدز ثابت ضریب اصطکاک دارای نسبت معکوس با λ می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات ضریب اصطکاک در برابر نسبت اندازه ذرات در محیط ریزدانه ($3000 < Re < 30000$).



شکل ۸- تغییرات ضریب اصطکاک در برابر نسبت اندازه ذرات در محیط درشت‌دانه ($11000 < Re < 120000$).

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، این روند در یک عدد رینولدز تقریباً ثابت برای هر دو محیط متخلخل ریزدانه و درشت‌دانه تکرار می‌شود. با توجه به تعریف λ در یک محیط متخلخل (D ثابت)، افزایش قطر رسوب تزریقی (d_s)، سبب کاهش λ شده و با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ این کاهش سبب افزایش ضریب اصطکاک خواهد شد.

برداشت‌های آزمایشگاهی نشان داد، از آن‌جا که افزایش قطر رسوب تزریقی سبب افزایش ارتفاع رسوب تجمع‌یافته در محیط متخلخل می‌شود، افزایش این ارتفاع رسوب سبب افزایش ΔH و H_{ave} محیط متخلخل خواهد شد. از آن‌جا که $i = \frac{\Delta H}{L}$ با افزایش ΔH ، i افزایش یافته و این افزایش سبب افزایش f خواهد شد.

به‌منظور ارایه رابطه بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری و ویسباز در جریان شامل رسوب، با استفاده از دستور Solver نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2007 رگرسیون چندمتغیره صورت گرفت. عواملی که به‌عنوان متغیر مستقل در معادله برازش استفاده می‌شوند باید متغیرهای هیدرولیکی و هندسی را در برگیرند، این متغیرهای مستقل شامل همه متغیرهای بی‌بعد اشاره شده به روش آنالیز ابعادی می‌باشند. پس از انجام عملیات بالا دو نوع رابطه ارایه شد. در نوع اول ضریب اصطکاک داری و ویسباز تنها به عدد رینولدز وابسته بوده و در نوع دوم علاوه بر عدد رینولدز به نسبت اندازه ذرات محیط متخلخل نیز وابسته است. رابطه‌های ۳۲ و ۳۳ بیانگر این دو رابطه در محیط متخلخل ریزدانه است.

$$f = \frac{7900}{Re^{0.7}} \quad (32)$$

$$f = \frac{66 \times 10^3}{Re^{0.9} \times \lambda^{0.1}} \quad (33)$$

رابطه‌های ۳۴ و ۳۵ نیز برای محیط درشت‌دانه ارایه شده است.

$$f = \frac{310 \times 10^3}{Re} \quad (34)$$

$$f = \frac{204 \times 10^3}{Re \times \lambda^{0.01}} \quad (35)$$

در انتها به‌منظور مقایسه دقت نتایج به‌دست آمده از تخمین مقدار ضریب اصطکاک با رابطه‌های ۳۲ تا ۳۵، با استفاده از شاخص‌های آماری که در جدول ۳ آورده شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

جدول ۳- شاخص‌های آماری (ملک‌نژاد یزدی، ۲۰۱۰).

رابطه	شاخص
$C_{N.c} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f_c - f_o)^2}{\sum_{i=1}^n (f_o - f_m)^2}$	ناش ساتکلیف
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_c - f_o)^2}{n}}$	جذر میانگین مربعات خطا
$\frac{\sum_{i=1}^n (\frac{f_c}{f_o})}{n}$	$\frac{f_c}{f_o}$ میانگین
$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{f_c}{f_o}) - (\frac{f_c}{f_o})]^2}{n-1}}$	$\frac{f_c}{f_o}$ انحراف معیار

در رابطه‌های بالا، f_c : ضریب اصطکاک محاسباتی، f_o : ضریب اصطکاک مشاهداتی، f_m : میانگین ضرایب اصطکاک مشاهداتی و n : تعداد داده‌ها می‌باشند. نتایج به‌دست آمده از این تجزیه و تحلیل در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های آماری رابطه‌های ۳۲ تا ۳۵.

انحراف معیار ($\frac{f_c}{f_o}$)	میانگین ($\frac{f_c}{f_o}$)	RMSE	NASH	R	رابطه
۰/۱۸۰۹	۱/۱۳۶۹	۴/۱۸۸۱	۰/۲۳۷۹	۰/۶۸۲۳	۳۲
۰/۱۶۰۶	۱/۰۲۶۱	۳/۳۵۳۹	۰/۲۶۰۵	۰/۷۰۱۴	۳۳
۰/۱۱۷۵	۱/۰۸۳۱	۲/۲۷۴۶	۰/۲۶۴۶	۰/۷۶۳۶	۳۴
۰/۱۱۰۱	۱/۰۱۳۱	۱/۹۰۲۱	۰/۳۶۴۶	۰/۷۷۵۳	۳۵

همان‌گونه که نتایج شاخص‌های آماری جدول ۳ نشان می‌دهند، رابطه‌های ۳۳ و ۳۵ که دارای عامل λ بوده و بیانگر وضعیت رسوب تزریقی به جریان می‌باشند، توانسته‌اند تخمین بهتری از ضریب اصطکاک در شرایط جریان حاوی رسوب ارائه کنند.

مقایسه کلی نتایج به دست آمده از مشاهده‌ها و محاسبه‌های مربوط به ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب بین دو محیط درشت‌دانه و ریزدانه نشان داد، در محیط متخلخل درشت‌دانه، جریان شامل رسوب تأثیر کم‌تری بر رفتار هیدرولیکی جریان گذاشته است. به‌عنوان مثال، مقایسه شکل‌های ۳ و ۵ نشان داد تفاوت کم‌تری بین ضریب اصطکاک در دو حالت جریان شامل رسوب و بدون رسوب در محیط درشت‌دانه مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تفاوت ضریب اصطکاک داریسی و سیباخ در جریان شامل رسوب و بدون رسوب مورد بررسی قرار گرفت. از تجزیه و تحلیل یافته‌های این مطالعه، نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- به‌طور کلی افت هیدرولیکی در محیط ریزدانه از محیط درشت‌دانه بیش‌تر است.
- ۲- جریان شامل رسوب دارای افت هیدرولیکی بیش‌تری نسبت به جریان بدون رسوب است.
- ۳- ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب، به عدد رینولدز و نسبت اندازه ذرات بستگی داشته و دارای نسبت معکوس با آن‌ها می‌باشد.
- ۴- با توجه به بیش‌تر بودن ضریب اصطکاک در جریان شامل رسوب، برای محاسبه این ضریب، استفاده از رابطه‌هایی که در شرایط شامل رسوب استخراج شده باشند، پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Bingjum, Li., and Garga, V.K. 1998. Theoretical Solution For Seepage Flow In Over Topped Rock fill. J. hydr. Engin. 37 :2. 213-217.
2. Ghazi moradi, A., and Masumi, S.A. 1995. Investigation of Flow in Porous Media of Rock fill. 1st National Seminar of Hydraulic, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Iran, 387p.
3. Hansen, D. 1992. The Behaviour of Flow Through Rock fill Dam. Ph.D. Thesis. Ottawa University, Department of Civil Engineering, 102p.
4. Herrera, N.M., and Felton, G.K. 1991. Hydarulic of Flow Throuth a Rockfill Dam Using Sediment-free water. J. Hydr. Engin. 34: 3. 871-875.
5. Jalal Aldini Korki, M.S. 1997. Hydraulic Investigation of Flow in Rockfill Porous Media. Thesis For the Degree of M.Sc. in Water Structures. Azad Islamic University of South Tehran, 275p.
6. Junke, G., and Julien, P.Y. 2001. Turbulent Velocity Profilesin Sediment Laden Flows. J. Hydr. Res. 39: 1. 11-23.

7. Maleknejad Yazdi, M. 2011. Experimental Investigation of Effective Parameters on Sediment Trapped in Porous Media of Rock fill Dam. Thesis for the Degree of M.Sc. in Water Structures. Gorgan University of Agricultural and Sciences and Natural Resources, 87p.
8. Shafai Bajestan, M. 2005. Basic concepts And Applications of Physical-Hydraulic Modeling. Shahid Chamran University Press, 268p.
9. Shayannejad, M. 2000. Investigation and Modeling of Flow in Rock fill Dams And Its Application In Flood Control. Thesis for Ph.D. In Irrigation and Drainage. Tarbiat Modarres University, 234p.
10. Stephansen, D. 1976. Rockfill In Hydraulic Engineering. Elsevier Science Publisher, New York. Pp: 287-290.

Archive of SID



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(4), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Investigation of Darcy Weisbach coefficient in porous media of rock fill dam in laden sediment flow

M. Maleknejad Yazdi¹, *A.A. Dehghani² and M. Shahabi³

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources, ²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering,

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources,

³M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Shiraz University

Received: 10/22/2011; Accepted: 12/25/2012

Abstract

Due to the nature of permeability and economic consideration, Rock fill dam structures have been attracted by many engineers for flood relief purpose. Knowledge of flow passing hydraulic is necessary for proper design of this structure. Due to the fact that most of former studies were based on no sediment laden flow, therefore the mechanism of sediment laden flow in this structure is studied experimentally. The experiments were conducted in a recirculating flume with various bed slope (i.e 0.001, 0.005 and 0.01), feeding sediment size (0.4, 0.6 and 0.8 mm) and 4 porous media (2 fine media and 2 coarse media). By simulating the flow in rock fill dam with pressurised flow in pipes, the basic relation between f and Re is obtained in sediment laden flow condition. The results showed that the friction coefficient of sediment laden flow is higher than non sediment flow and the previous empirical relationship doesn't give accurate estimates of Darcy-Weisbach factor in sediment laden flow.

Keywords: Rock fill dam, Porous media, Sediment laden flow, Darcy Weisbach coefficient, Reynolds number

* Corresponding Author; Email: amirahmad.dehghani@gmail.com