

در چند سال اخیر، سدهای پاره‌سنگی برای تسکین و مهار سیلاب در حوضه‌های آبریز مورد توجه زیادی قرار گرفته است. عمر مفید این سدها، بستگی کامل به میزان رسوب ته‌نشین شده دارد. به همین علت، بر آورد دقیق و چگونگی ترسیب رسوب آن ضروری می‌باشد. عدم شناخت ویژگی‌ها و رفتار رسوبی جریان و تأثیر آن بر بستر موجب شد، خسارات قابل توجهی از نظر جانی و مالی پس از سیل ۱۳۸۰ در بالادست گرگانرود رخ دهد. چنانکه گابیون‌های احداث شده در سال اول، با وقوع سیل ۱۳۸۱ از رسوب پر شده و جریان سیلاب توانست سنگ‌هایی با قطر ۵۰ سانتی‌متر را به پایین دست منتقل کند [۶]. نتایج پژوهش‌های انجام گرفته توسط محمد ولی سامانی و فرشاد [۱۱] نشان می‌دهد، سدهای نفوذپذیر می‌توانند جایگزین سدهای نفوذناپذیر شوند. در این شرایط جریان طبیعی رودخانه قطع نمی‌شود و به‌علت تصفیه خودکار آب رودخانه، زیست بوم محیط حفظ خواهد شد. به‌علت 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 فوق، به‌همراه امکان مناسب تأمین مصالح مورد نیاز از محل، موجب شده تا سدهای پاره‌سنگی دارای توجیه اقتصادی بیشتری باشند. بر اساس نظر صالحی و همکاران [۱۰]، رفتار جریان در این محیط‌ها بدلیل بزرگی اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت‌های بالا و آشفته‌گی در جریان بسیار پیچیده می‌باشد. از این‌رو بر خلاف محیط‌های ریزدانه که جریان در آن ورقه‌ای بوده و قانون داری معتبر است، استفاده از قانون داری برای برآورد عامل‌های مختلف جریان در محیط‌های درشت‌دانه دارای خطای قبل توجه ای است. برای این منظور به طور اصولی از روابط دیگری که بیانگر یک ارتباط غیرخطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط‌ها بوده و به روابط غیرداری معروف هستند استفاده می‌شود.

ساکتیوادیول [۹] 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 بیان داشت هنگامی که محیط متخلخل در حالت افقی قرار دارد، بیشتر رسوبات تزریقی به‌وسیله نیروی وزن تمایل به ته‌نشینی داشته و بقیه به همراه جریان حمل می‌شوند. در این حالت در اثر ته‌نشینی متوالی ذرات رسوبی در منافذ، بستری از جنس مواد رسوبی تشکیل می‌شود. در این شرایط ذرات رسوبی همانند حرکت بار بستر در کانال‌های باز روی این بستر حرکت می‌کنند. با ادامه ته‌نشست رسوبات بدلیل

عامل‌های مؤثر بر ته‌نشست رسوب در محیط‌های متخلخل

محمد ملک‌نژاد یزدی^۱، امیر احمد دهقانی^۲، الله‌یار ناظمی^۳ و مهدی مفتاح هلقی^۲
تاریخ دریافت: ۸۹/۰۸/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۶/۱۴

چکیده

سدهای پاره‌سنگی به‌علت 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 علاوه بر شناخت هیدرولیک جریان عبوری، شناخت هیدرولیک رسوب و مسائل مربوط به آن ضروری است. در این پژوهش، به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر در ته‌نشست رسوب در سد پاره‌سنگی و ارائه رابطه‌ای برای تخمین میزان ته‌نشست، آزمایشاتی بر روی مدل آزمایشگاهی انجام شد. این آزمایشات در فلومی شیب‌پذیر با در نظر گرفتن ۳ شیب و تزریق ۳ نوع رسوب با قطرهای متفاوت و بهره‌گیری از ۲ نوع محیط متخلخل ریزدانه و درشت‌دانه سد پاره‌سنگی انجام شد. علاوه بر این، تغییر نرخ تزریق رسوب نیز با استفاده از ۳ نرخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان ته‌نشست رسوب، با عامل‌های عدد رینولدز محیط متخلخل، شیب بالادست مسیر، نسبت اندازه ذرات و گرادیان هیدرولیکی محیط متخلخل نسبت معکوس دارد. همچنین افزایش نرخ تزریق رسوب، باعث افزایش ضریب ته‌نشست شده تا جایی که این ضریب به میزان ثابتی خواهد رسید. در ضمن رابطه ارائه شده با $(R^2=73\%)$ قادر خواهد بود، ضریب ته‌نشست را با بهره‌گیری از روابط نظری، بر آورد نماید.

کلمات کلیدی: محیط متخلخل، سد پاره‌سنگی، ضریب ته‌نشست رسوب، عدد رینولدز.

مقدمه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- نویسنده مسئول و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
email: a.dehghani@gau.ac.ir
Amirahmad.dehghani@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه یو پی ام ملزی

مورد بررسی قرار داد. نتایج این آزمایش ارائه روابطی به منظور بررسی تغییرات هدایت هیدرولیکی در محیط متخلخل در اثر توزیع ناگهانی رسوب بوده است. عمادی و همکاران [5] به بررسی حرکت رسوبات غیر چسبنده در محیط متخلخل درشت‌دانه پرداختند. این آزمایشات در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. آزمایشات در محدوده‌ی عدد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ انجام گرفت. این پژوهشگران پس از انجام آزمایشاتی، روابطی به منظور محاسبه گرادیان هیدرولیکی بحرانی و همچنین تعیین میزان انتقال رسوب در محیط متخلخل درشت‌دانه به صورت روابط (۵) و (۶) ارائه نمودند:

$$i_c = 1.667(G_s - 1).g.d_s(\cos\theta \lg\Phi - \sin\theta)^{4.699} \quad (5)$$

$$q_s = 0.0461.\rho_s.d_s\left(\frac{Q-Q_c}{Q_c}\right)^{0.6236} \quad (6)$$

که، i_c گرادیان هیدرولیکی بحرانی، G_s چگالی نسبی ذرات رسوب، g شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)، d_s قطر ذرات رسوبی (متر)، θ زاویه شیب کف نسبت به افق، Φ زاویه ایستایی رسوبات در داخل محیط متخلخل سنگ‌دانه‌ای، q_s میزان انتقال رسوب (کیلوگرم بر متر بر ثانیه)، ρ_s چگالی ذرات رسوب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Q دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) و Q_c دبی بحرانی (مترمکعب بر ثانیه) است.

برای یک بستر مشخص، شالشی [۱۲] تغییرهایی چون شرایط جریان، بار معلق، توزیع دانه‌بندی رسوب و شکل ذرات معلق، گرادیان هیدرولیکی جریان نشی را بر فرآیند گرفتگی تاثیرگذار دانسته است.

بررسی های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعاتی در زمینه تله‌اندازی رسوبات در سدهای مخزنی توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است. آرماینی [۲] در تحقیق خود رابطه‌ای بین بازشدگی دهانه، ویژگی‌های رسوب، نوع رودخانه کوهستانی، دبی آب و رسوب در شرایط ماندگار بدست آورده است.

مطالعات آد و همکاران [۱] در خصوص ته‌نشست رسوبات در محیط متخلخل نشان می‌دهد که جریان نشی در داخل تابعی از نفوذپذیری و هد هیدرولیکی متغیری است که در نتیجه اختلاف تراز آب در طول محیط متخلخل ایجاد می‌شود. فرآیند ته‌نشست رسوبات در شن با ته‌نشست رسوبات در محیط پاره‌سنگی متفاوت بوده به نحوی که در محیط شنی، رسوبات معلق با فرآیند فیلتراسیون به تله می‌افتند در حالی‌که در محیط پاره‌سنگی ته‌نشست رسوبات در نتیجه سقوط ذرات معلق رخ می‌دهد.

نتایج مطالعات کاتالا به نقل از بنی حبیب و بنی‌طالبی [۳]، در یکی از ایالت‌های ایتالیا درباره سری سدهای شکاف‌دار که در آن منطقه ساخته شده است، منجر به ارائه رابطه‌ای برای برآورد مقدار رسوب تجمع یافته پشت سد گردید. بنی حبیب و بهرام به نقل از بنی حبیب و بنی‌طالبی [۳] رابطه‌ای تجربی جهت برآورد ضریب تله‌اندازی در سدهای شکاف‌دار ارائه داده و در آن ضریب تله‌اندازی را تابعی از

کاهش سطح مقطع مفید جریان و نیز ثابت بودن دبی، سرعت جریان افزایش یافته که این افزایش سرعت باعث حرکت رسوبات می‌شود. ضخامت لایه بستر تحت تأثیر عواملی مانند سرعت جریان، تخلخل محیط، اندازه، شکل و وزن مخصوص ذرات می‌باشد. کانینگهام و همکاران [۴] با انجام آزمایشاتی بر روی مصالح رودخانه در فلومی به طول ۷/۶ متر که جریان از درون و روی مصالح عبور می‌کرد، گرفتگی در اثر رسوبگذاری درون و روی مصالح بستر غیر متحرک را بررسی کردند. جوی و همکاران [۸] انتقال رسوبات را از داخل محیط متخلخل در شرایط جریان متلاطم مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات در نمونه‌ای از محیط متخلخل به طول ۶۰۰ میلی‌متر، عرض ۲۷۹ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و در یک فلوم شیب‌پذیر انجام گرفته است. این پژوهشگران با استفاده از اصول تحلیل ابعادی چهار پارامتر بدون بعد استخراج کردند و با انجام آزمایش‌ها، رابطه (۱) را ارائه دادند:

$$q_* = 26.2 \times \frac{\lambda^{0.54}}{Re^{1.23} . S_p^{1.39}} \quad (1)$$

که در آن، q_* عامل بدون بعد انتقال رسوب، S_p شیب بالادست مسیر و λ نسبت اندازه ذرات محیط متخلخل به ذرات رسوب بوده که مطابق پژوهش‌های صورت گرفته توسط ساکتیوادیلو [۹] اگر d اندازه ذرات تشکیل‌دهنده محیط متخلخل و d_s اندازه ذرات رسوبی باشد، نسبت این دو عامل اندازه ذرات محیط نامیده می‌شود:

$$\lambda = \frac{d}{d_s} \quad (2)$$

که، d قطر متوسط سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل (سانتی‌متر) و d_s قطر متوسط رسوبات (سانتی‌متر) است. همچنین Re ، عدد رینولدز محیط متخلخل بوده که مطابق مطالعات صورت گرفته توسط فلتون و هررا [۷] ایشان رابطه (۳) را برای محاسبه عدد رینولدز در سدهای پاره‌سنگی ارائه نمودند:

$$Re = \frac{(d-\sigma) \times V}{\nu} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، d قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها (متر)، σ انحراف معیار سنگ‌دانه‌ها (متر)، ν لزجت سینماتیکی سیال (مترمکعب بر ثانیه)، V سرعت جریان در محیط متخلخل (متر بر ثانیه) و n تخلخل محیط سنگ‌دانه‌ای است.

ایشان همچنین پس از انجام آزمایش‌های مختلف بر روی محیط‌های سنگ‌دانه‌ای رابطه (۴) را برای محاسبه سرعت جریان در محیط متخلخل پاره‌سنگی پیشنهاد کردند:

$$V = \frac{Q}{\Delta H.W} \quad (4)$$

که، Q دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، ΔH میانگین ارتفاع آب درون محیط متخلخل (متر)، W عرض محیط متخلخل (متر) است. چان وو [۱۳ و ۱۴] در پژوهش‌های گسترده‌ای که در بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰ انجام داد، مقاومت هیدرولیکی که در اثر توزیع رسوب به صورت ناگهانی درون محیط متخلخل ایجاد می‌شود را

عرض آبراهه، عرض شکاف سد و قطر متوسط ذرات رسوب معرفی کردند:

$$TE = 0.1882 \times \left(\frac{V_s}{V_f} \right)^{0.5277} \times \left(\frac{B}{b} \right)^{0.8249} \times \left(\frac{d_{50}}{b} \right)^{0.8347} \quad (7)$$

که، TE ضریب تله اندازی، V_s حجم مخزن سد شکاف دار در تراز حداکثر (متر مکعب)، V_f حجم کل سیلاب (متر مکعب)، B عرض آبراهه (متر)، b عرض شکاف (متر) و d_{50} قطر ذرات رسوب (متر) است.

از آنجا که عملکرد صحیح سازه‌های پاره‌سنگی در هنگام سیلاب، می‌تواند خطرات ناشی از وقوع آن را تا حد زیادی کاهش دهد، طراحی صحیح این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی در زمینه میزان ته نشست رسوب در سدهای پاره‌سنگی صورت نگرفته است، لذا انجام آزمایش‌هایی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش بررسی ته نشست رسوبات در سدهای پاره‌سنگی و شناسایی عامل‌های مؤثر بر این پدیده می‌باشد، لذا با ساخت مدلی آزمایشگاهی و انجام آزمایشات در شرایط مختلف، ته نشست رسوب در سدهای پاره‌سنگی، با استفاده از دو محیط متخلخل سنگ‌دانه‌ای ریزدانه و درشت‌دانه مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفت.

همچنین به کمک داده‌های برداشت شده در شرایط فوق رابطه بدون بعدی جهت برآورد میزان ته نشست رسوبات در سدهای پاره‌سنگی ارائه شده است. آزمایش‌ها این مرحله با تغییر شیب کف کانال در ۳ اندازه انجام شده است. علاوه بر این به کمک دستگاه تزریق رسوب طراحی شده برای مدل، آزمایشاتی با تغییر نرخ تزریق رسوب انجام و اثر تغییر نرخ تزریق رسوب بر میزان ته نشست رسوبات مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

۱- تحلیل ابعادی

با بکارگیری متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر ته نشست رسوب می‌توان رابطه‌ای جهت برآورد این عامل بدست آورد. بدین منظور ابتدا با بکارگیری تحلیل ابعادی، متغیرهای بدون بعد مؤثر بر ته نشست رسوب در محیط متخلخل مشخص و سپس به بررسی چگونگی تأثیر آنها پرداخته می‌شود. محاسبه ضریب ته نشست در هر آزمایش و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده عامل‌های هیدرولیکی، امکان برآورد ضریب ته نشست رسوب با استفاده از روابط نظری را فراهم می‌کند.

در جریان حاوی رسوب، مجموع عامل‌های بی‌بعدی که در تحلیل‌های صورت گرفته مؤثر شناخته می‌شوند، به شرح زیر است، فلتون و هررا [7]:

$$\Gamma_s = f(Re, S, \lambda, i) \quad (8)$$

در رابطه (8)، Re عدد رینولدز محیط متخلخل، S شیب بالادست

مسیر، λ نسبت اندازه ذرات محیط متخلخل و i عبارت است از گرادیان هیدرولیکی محیط متخلخل که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (9)$$

که، ΔH اختلاف عمق جریان در بالادست و پایین دست محیط متخلخل (سانتی متر) و L طول محیط متخلخل (سانتی متر) می‌باشد. در ضمن در رابطه (9)، عامل S بیانگر شیب مسیر بالادست محیط متخلخل می‌باشد.

۲- نحوه محاسبه ضریب ته نشست

بطور کلی میزان ته نشست رسوب در محیط متخلخل پاره‌سنگی تابعی از غلظت بار رسوبی جریان است. با توجه به ظرفیت حمل رسوب محیط متخلخل، تا زمانی که غلظت بار رسوبی جریان کمتر از ظرفیت حمل رسوب محیط متخلخل باشد، تمام رسوب وارد شده به محیط متخلخل از آن خارج شده و در عمل هیچ‌گونه ته نشستی در داخل بدنه نخواهیم داشت.

با در نظر گرفتن این مطلب، در ابتدای آزمایش‌ها با توجه به میزان رسوب تزریقی توسط دستگاه مشاهده می‌شد به دلیل غلظت کم رسوب تزریقی به سامانه، هیچ‌گونه رسوبی در بالادست و داخل بدنه سد باقی نمانده و تمام رسوب از داخل بدنه خارج می‌شود. لذا با تغییراتی در محور استوانه‌ای دستگاه، موفق به تأمین رسوب مورد نیاز محیط متخلخل شده و مشاهده شد پس از اعمال این تغییرات و تزریق رسوب به جریان، در بالادست، پایین دست و داخل بدنه شاهد تجمع رسوب بوده که این امر، تأمین رسوب مورد نیاز محیط متخلخل را نشان می‌داد.

برای بررسی تغییرات ضریب ته نشست رسوب در سد پاره‌سنگی از نسبت بدون بعد Γ_s بصورت رابطه (۱۰) استفاده شده است، بنی حبیب و بنی طالبی: [۳]

$$\Gamma_s = \frac{T_i}{T_u} \quad (10)$$

که در آن:

$$T_i = \frac{W_T - (W_{up} + W_{down})}{t} \quad (11)$$

$$T_u = \frac{W_T - W_{up}}{t} \quad (12)$$

که T_i نرخ رسوب گذاری در محیط متخلخل (کیلوگرم بر ثانیه)، T_u نرخ رسوب وارد شده به محیط متخلخل (کیلوگرم بر ثانیه)، W_T وزن کل رسوب تزریقی به جریان (کیلوگرم)، W_{up} وزن رسوب مانده در بالادست (کیلوگرم)، W_{down} وزن رسوب مانده در پایین دست (کیلوگرم)، t مدت زمان تزریق رسوب (ثانیه) است.

۳- مدل آزمایشگاهی

برای ساخت مدل، از فلومی با طول ۱۲ متر، عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی متر استفاده گردید. دیواره و کف این فلوم از جنس پلکسی

شد. همچنین برای جمع‌آوری رسوبات عبوری در پایان هر آزمایش، فیلتر توری پس از دریاچه قرار گرفت تا بتوان پس از انجام هر آزمایش رسوب عبوری را جمع و توزین نمود. به منظور قرائت دبی از یک دستگاه فلومتر با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه که در ایستگاه پمپاژ قرار داشت استفاده و دبی‌های مورد نظر با شیرفلکه موجود بر روی لوله رانش پمپ تنظیم می‌گردید. در این مرحله برای تنظیم فلوم در شیب مورد نظر، از یک دستگاه جک هیدرولیک که در ابتدای فلوم قرار داشته و توانایی تأمین شیب‌های مورد نظر را دارا بود، استفاده شد.

مواد محیط متخلخل از مصالح رودخانه‌ای موجود در معدن سنگ‌شکنی واقع در ۱۰ کیلومتری گرگان تهیه گردید. پس از دانه‌بندی مصالح، دو محیط سنگ‌دانه‌ای با قطر متوسط ۵ سانتی‌متر و ۱۲ سانتی‌متر آماده شد تا بتوان اثر اندازه ذرات محیط بر ته نشست رسوب را بررسی کرد. برای تهیه مصالح، مطابق مطالعات انجام گرفته توسط فلتون و هرا [۷] مطابق رابطه‌ی (۱۳) و (۱۴)، قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها و انحراف معیار سنگ‌دانه‌ها در محیط متخلخل محاسبه شدند:

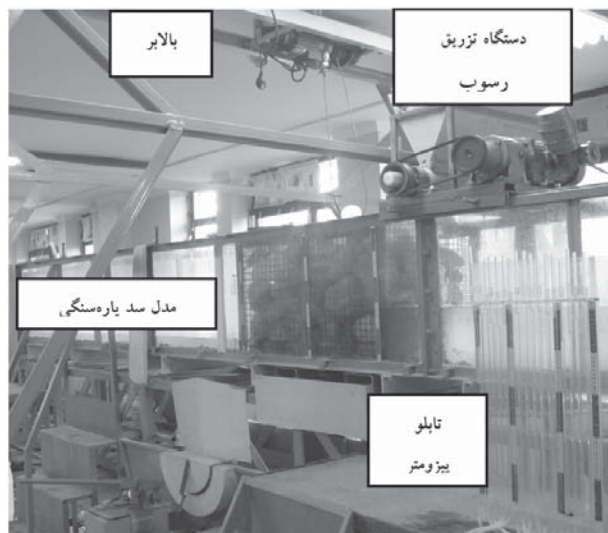
$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (13)$$

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (d - d_i)^2 \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)^{1/2} \quad (14)$$

که، d قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها (سانتی‌متر)، σ انحراف معیار (سانتی‌متر)، d_i متوسط قطر i امین سائز سنگ‌ها که بین دو الک باقی می‌ماند و مقدار آن با متوسط‌گیری بین قطر سوراخ‌های دو الک به

گلاس بوده که امکان مشاهده جریان را فراهم می‌نمود. به منظور 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 جایابی مدل سد و سستشوی آن پس از انجام هر آزمایش از بالابری با توان حمل ۶۰۰ کیلوگرم بار که در سقف آزمایشگاه تعبیه شده، استفاده گردید. به منظور قرائت نیمرخ سطح آب نیز در داخل بدنه و طرفین سد پاره سنگی، تعداد ۱۵ عدد پیزومتر به فواصل ۶ سانتی‌متری در زیر بدنه سد تعبیه شد تا بتوان در حین انجام آزمایش، پروفیل سطح آب را برداشت نمود. به منظور تأمین آب مورد نیاز برای مدل آزمایشگاهی از یک تانک زیرزمینی به حجم ۱۲ مترمکعب استفاده گردید. آب این مخزن بوسیله 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 تا ۳۵ لیتر بر ثانیه تامین شد. به منظور قرائت دبی از یک دستگاه دبی‌سنج حجمی با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه که بر روی لوله رانش پمپ و در فاصله مناسب نصب شده است استفاده شد. وجود محفظه آهنی سبب شد تا محیط متخلخل پاره‌سنگی شکل ظاهری و آرایش خود را در تمام آزمایشات حفظ نماید. در شکل (۱)، نمایی از مدل مورد استفاده مشاهده می‌شود. به منظور بررسی رفتار جریان دارای بار رسوب در سدهای پاره‌سنگی نیاز به ایجاد جریان حاوی 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 جهت تزریق رسوب و موتور الکتریکی با دور حرکت متغیر جهت تنظیم نرخ تزریق رسوب می‌باشد.

برای تنظیم سطح آب در پایین‌دست سازه و تأمین استغراق مورد نظر جهت انجام آزمایشات، دریاچه پروانه‌ای در انتهای فلوم ساخته



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

سانتی متر بدست می‌آید و W_i درصد وزنی i امین اندازه سنگ‌ها است.

با توجه به اینکه در کلیه پژوهش‌های صورت گرفته قبلی، آزمایشات فقط بر روی محیط‌هایی با قطر متوسط کمتر از ۵ سانتی متر انجام شده‌است. در این پژوهش از محیط‌هایی با قطر متوسط ۵ و ۱۲ سانتی متر با انحراف معیار ۲ سانتی متر استفاده شد تا آزمایشات انجام شده علاوه بر متفاوت بودن با کارهای قبلی، در مقیاسی نزدیک به واقعیت انجام پذیرد. برای تهیه دو محیط متخلخل ریزدانه و درشت‌دانه با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) سنگ‌دانه‌هایی با مشخصات (جدول شماره ۱)، تهیه شدند.

به منظور تزریق رسوب به جریان، از دو نوع رسوب با دانه‌بندی متفاوت که در کارخانه تولید ماسه صنعتی واقع در ۵ کیلومتری فیروزکوه تهیه شده است، استفاده شد. برای بدست آوردن دانه‌های رسوب یکنواخت، از الک‌های استاندارد ASTM با شماره‌های ۱۸، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ استفاده شد. رسوبات باقی مانده روی الک‌های استاندارد ۲۵، ۳۵ و ۴۵ به‌عنوان رسوبات مورد نظر، استفاده شدند. قطر میانگین این رسوبات ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی متر بودند. برای اطمینان از غیرچسبده بودن رسوبات، مصالح الک شده یک‌بار با آب شسته شدند تا از عدم وجود سیلت و رس در آنها اطمینان حاصل شود.

با توجه به حداکثر زمان انجام آزمایش و محاسبات مربوط به دور موتور الکتریکی دستگاه تزریق رسوب، برای هر آزمایش مقدار ۲۰ کیلوگرم از رسوب مورد نظر در مخزن دستگاه یاد شده ریخته شد. مشاهدات نشان می‌داد، میزان رسوب تزریقی جهت ایجاد جریان حاوی رسوب کافی بوده و سامانه تا زمان برقراری تعادل نسبی در جریان عبوری از محیط متخلخل، با کمبود رسوب مواجه نخواهد شد.

تمامی آزمایش‌ها در سه شیب ۰/۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ انجام و تغییرات دبی جریان در تمامی آزمایش‌ها از ۶/۵ لیتر بر ثانیه تا ۳۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به وجود دو محیط متخلخل

ریزدانه و درشت‌دانه، مشاهده گردید به دلیل ایجاد مقاومت بالای محیط ریزدانه در برابر جریان عبوری، در برخی از دبی‌ها جریان از روی سد پاره‌سنگی سرریز می‌شد. بنابراین دبی‌های مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها به نحوی انتخاب شد که جریان از روی سد سرریز نکند.

۴- روش انجام آزمایش‌ها

شیب فلوم برای هر محیط متخلخل (ریزدانه یا درشت‌دانه) در سه محدوده مورد نظر تنظیم گردید. در هر مرحله رسوب مورد نظر در مخزن تغذیه رسوب دستگاه تزریق ریخته شد. با شروع به کار پمپ و برقراری جریان در فلوم، استغراق پایین‌دست سد پاره‌سنگی با استفاده از دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم تأمین و پس از به تعادل رسیدن جریان، عمق آب در داخل، بالادست و پایین‌دست سد با استفاده از پیژومترهای تعبیه شده قرائت گردید. در این مرحله توسط دستگاه یاد شده، رسوب موجود در مخزن به سامانه تزریق شد.

برای جلوگیری از فرار رسوب تله‌اندازی شده در بدنه سد، با استفاده از دریچه‌ی پروانه‌ای انتهای کانال، عمق آب پایین‌دست تا جایی بالا آورده شد که ارتفاع آب در طرفین سد پاره‌سنگی برابر شوند. در این حالت هیچ‌گونه رسوبی در داخل محیط پاره‌سنگی حرکت نخواهد کرد.

پس از جمع‌آوری کامل رسوب در بالادست و پایین‌دست بدنه، بار دیگر پمپ شروع به کار کرده و تمامی رسوب موجود در بدنه سد را شسته و به پایین‌دست 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، توزین می‌شدند.

در این پژوهش با دارا بودن ۲ نوع محیط متخلخل، ۳ شیب، ۳ نوع رسوب و ۴ دبی اعمالی به سامانه، در مجموع ۷۲ آزمایش صورت پذیرفت. همچنین به منظور مشاهده تأثیر تغییر میزان تزریق رسوب بر تنه‌نشست رسوبات در سد پاره‌سنگی، برای هر محیط متخلخل

جدول ۱- مشخصات محیط‌های متخلخل سنگ‌دانه‌ای

نوع محیط متخلخل	وزن سنگ‌دانه (کیلوگرم)	قطر سنگ‌دانه (سانتی متر)	جمع کل (کیلوگرم)
ریزدانه	۱۵۷	۲/۷۵	۵۵۰
	۶۰	۴	
	۱۵۰	۶	
	۹۱	۸	
درشت‌دانه	۸۰/۵	۹	۳۵۰
	۶۳	۱۱	
	۱۵۷/۵	۱۳	
	۴۰	۱۵	

استوانه‌ای و مقدار رسوب موجود در جدول (۲)، ارایه شده است. در شکل (۲)، ضریب ته‌نشست رسوب در برابر زمان ترسیم شده است:

همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان تزریق رسوب از میزان ته‌نشست کاسته شده و شیب تغییرات کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که به طور تقریبی در هر سه میزان تزریق رسوب، روندی مشابه اتفاق می‌افتد. همچنین در هر میزان تزریق رسوب پس از ثانیه ۱۴۰ ضریب ته‌نشست به عدد ثابتی میل می‌کند.

بررسی بیشتر در زمینه وقوع چنین پدیده‌ای، مشخص کرد، در ابتدا به دلیل کم بودن رسوب تزریقی به محیط متخلخل، رسوب فرصت کافی برای عبور از داخل محیط را نداشته و به تله خواهند افتاد. به عبارت دیگر قبل از آنکه رسوب خود را به انتهای محیط متخلخل برسانند به علت پایان یافتن رسوب تزریقی، تمامی آنها در داخل محیط محبوس شده و لذا ضریب ته‌نشست حداکثر خود را دارا است.

با افزایش زمان تزریق، رفته رفته رسوب در داخل بدنه به تله افتاده و خلل و فرج محیط متخلخل را اشغال می‌کنند. رسوبی که بعد

با توجه به توانایی دستگاه، ۳ میزان تزریق رسوب در شیب و دبی ثابت نیز در نظر گرفته شد که برای هر محیط متخلخل ۱۸ آزمایش و در مجموع ۳۶ آزمایش دیگر نیز با تغییر میزان تزریق رسوب انجام شد.

نتایج و بحث

۱- بررسی زمانی تأثیر میزان تزریق رسوب بر ضریب ته‌نشست

رسوب

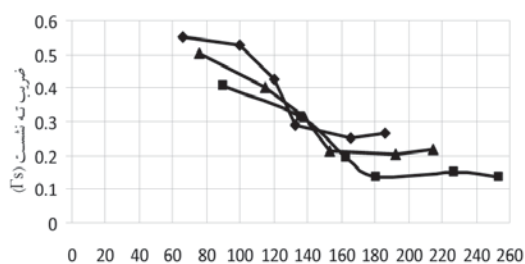
در این قسمت از پژوهش با انجام آزمایشاتی، نتایج مربوط به ضریب ته‌نشست رسوب بر اساس زمان تزریق رسوب در دو محیط ریزدانه و درشت‌دانه مورد بررسی قرار گرفت.

به این منظور، آزمایشات با تنظیم دور موتور الکتریکی دستگاه، در سه مرحله حداکثر، متوسط و حداقل تنظیم گردید. در هر مرحله مخزن رسوب دستگاه با وزن‌های ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۲۸ کیلوگرم توسط رسوب با قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر پر و آزمایشات انجام شد. شیب فلوم در این آزمایشات ثابت و برابر با ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. زمان تخلیه مخزن تغذیه رسوب با توجه به دور چرخش محور

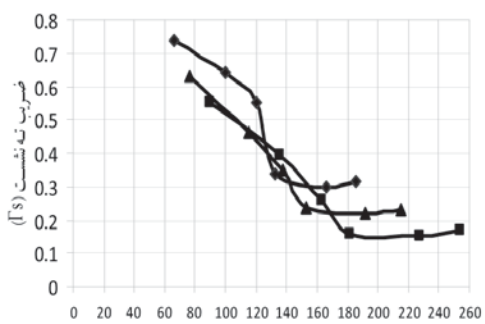
جدول ۲- مدت زمان تغذیه رسوب جریان در هر میزان

تزریق رسوب

زمان تزریق رسوب (s)	وزن رسوب (kg)	نرخ تزریق رسوب (kg/s)
۶۶	۱۰	۰/۱۵
۱۰۰	۱۵	
۱۲۰	۱۸	
۱۳۳	۲۰	
۱۶۶	۲۵	
۱۸۶	۲۸	
۷۶	۱۰	۰/۱۳
۱۱۵	۱۵	
۱۳۸	۱۸	
۱۵۳	۲۰	
۱۹۲	۲۵	
۲۱۵	۲۸	
۹۰	۱۰	۰/۱۱
۱۳۶	۱۵	
۱۶۳	۱۸	
۱۸۱	۲۰	
۲۲۷	۲۵	
۲۵۴	۲۸	



شکل ۲- الف



شکل ۲- ب

شکل ۲- بررسی تغییرات ضریب ته‌نشست در برابر زمان تزریق رسوب در الف. محیط متخلخل درشت‌دانه و ب. محیط متخلخل ریزدانه

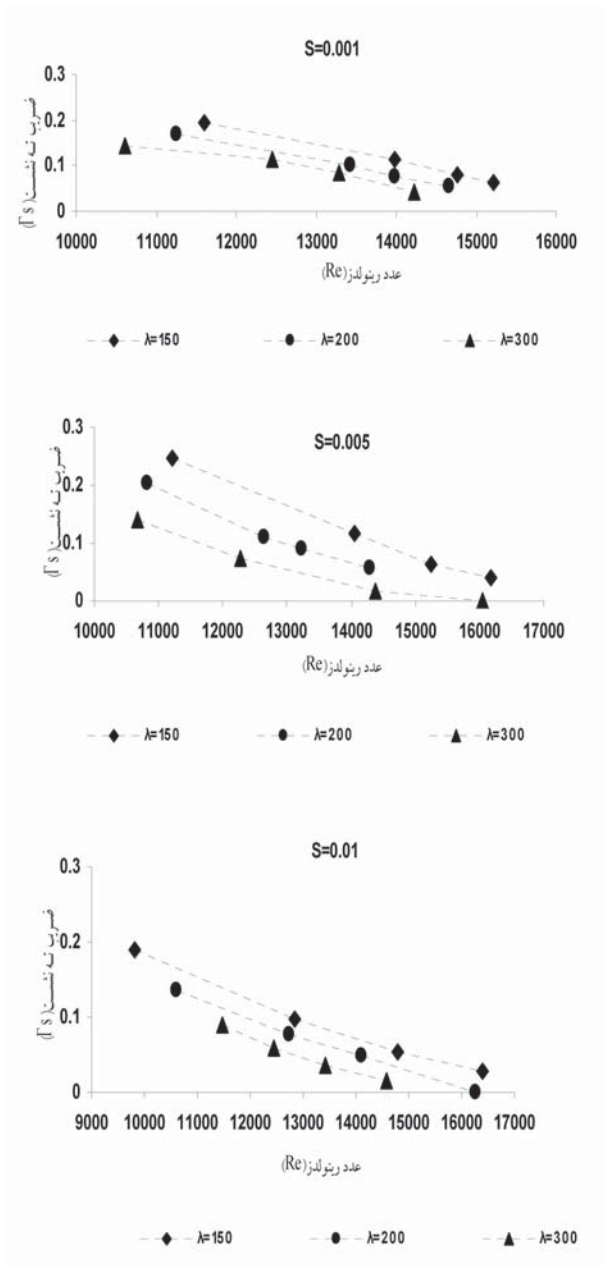
شده است. با مقایسه نمودارهای شکل (۲)، مشاهده می‌شود، در محیط متخلخل ریزدانه به علت تراکم محیط و فضای خالی کوچکتر، رسوبات در محیط ریزدانه آزادی حرکت کمتری داشته و لذا ته‌نشست آنها با الگوی منظم‌تری انجام می‌شود.

۲- بررسی عامل‌های مؤثر بر ضریب ته‌نشست رسوب ۱-۲- تأثیر عدد رینولدز (Re)

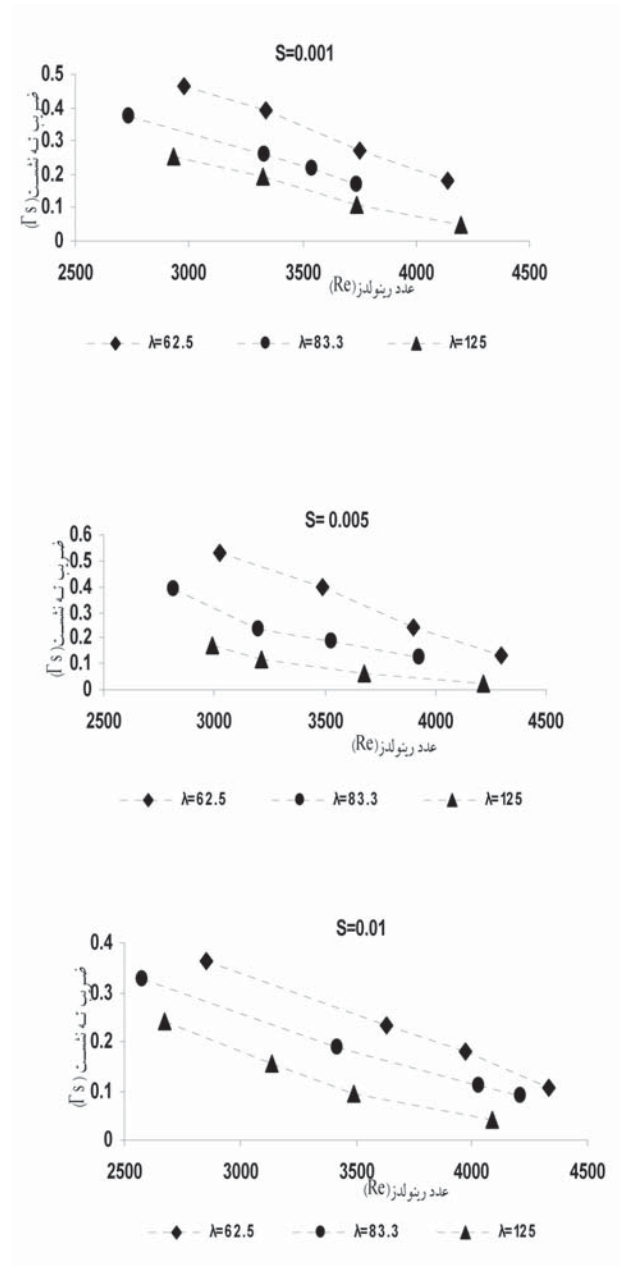
مشاهدات نشان داد، افزایش عدد رینولدز سبب کاهش ضریب ته‌نشست می‌شود، زیرا افزایش دبی، افزایش سرعت را در پی داشته

از این حالت وارد محیط متخلخل می‌شوند به علت نبود فضای کافی برای ماندن در محیط متخلخل به ناچار به خارج از آن رفته و این اتفاق موجب روند کاهشی ضریب ته‌نشست خواهد شد. این روند کاهشی تا جایی ادامه پیدا خواهد کرد که تمامی خلل و فرج محیط متخلخل توسط رسوب اشغال شده و از آنجا به بعد دیگر این محیط توانایی تله‌اندازی رسوبات را نداشته و لذا سایر رسوب تزریقی را به بیرون هدایت می‌کند.

برداشت‌های آزمایشگاهی نشان داد، پس از گذشت ۱۴۰ ثانیه از تزریق رسوب به جریان به طور تقریب ۲۰ کیلوگرم رسوب تزریق



شکل ۴- تغییرات ضریب ته‌نشست رسوب در محیط متخلخل درشت دانه

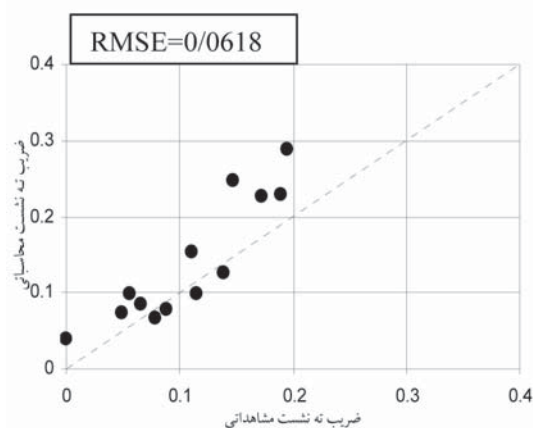


شکل ۳- تغییرات ضریب ته‌نشست رسوب در محیط متخلخل ریزدانه

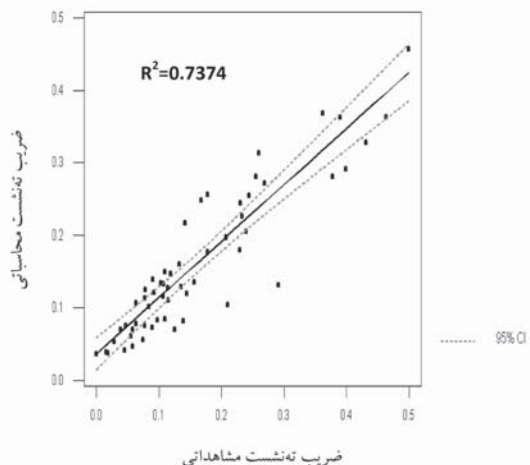
محدوده عدد رینولدز ثابت با افزایش شیب، میزان ضریب ته‌نشست کاهش می‌یابد.

۲-۳ تأثیر نسبت اندازه ذرات (λ)

بررسی تأثیر نسبت اندازه ذرات نشان داد، در هر دو محیط متخلخل درشت‌دانه و ریزدانه با افزایش λ میزان ته‌نشست رسوب کاهش پیدا می‌کند. بررسی علت وقوع چنین پدیده‌ای نشان داد، قرار گرفتن سنگ‌دانه‌ها بر روی یکدیگر باعث شکست خطوط جریان در محیط متخلخل شده و منجر به تشکیل گردابه‌هایی در اطراف سنگ‌دانه‌ها می‌شود. در محیط ریزدانه که دارای λ کوچکتری نسبت به محیط درشت‌دانه می‌باشد، به دلیل تراکم بیشتر سنگ‌دانه‌ها و ایجاد خلل و فرج ریزتر، گردابه‌های تشکیل شده در اطراف سنگ‌دانه‌ها قدرت به مراتب بالاتری نسبت به گردابه‌های ایجاد شده در محیط درشت‌دانه در به تله‌انداختن رسوب خواهند داشت و به همین دلیل



شکل ۶- مقایسه ضریب ته‌نشست مشاهده‌ای و محاسباتی برای ۸۰٪ داده‌ها

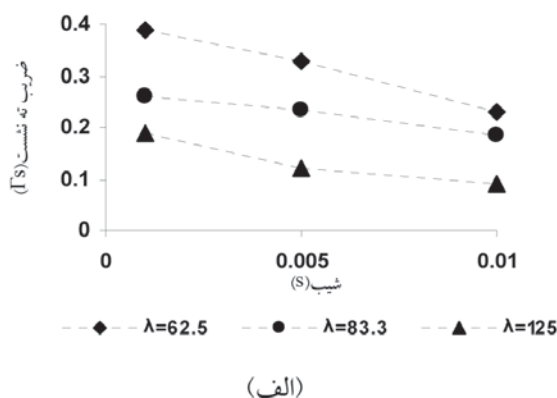


شکل ۷- نمودار مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی ضریب ته‌نشست برای داده‌های آزمون

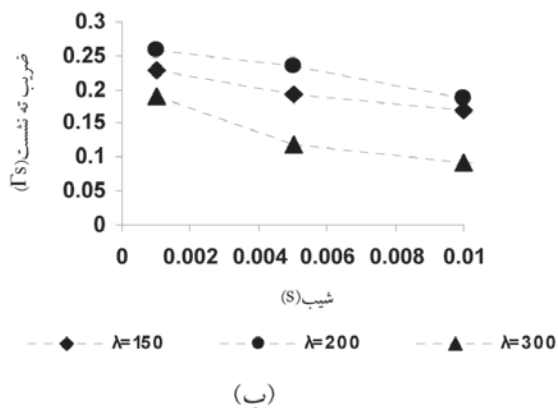
و مومتم حرکت رسوبات درون محیط متخلخل افزایش یافته، لذا رسوب کمتری در داخل بدنه مانده و ضریب ته‌نشست کاهش پیدا می‌کند. همانگونه که از شکل‌های (۳) و (۴) مشخص است، این روند در هر دو محیط متخلخل ریزدانه و درشت‌دانه مشاهده می‌شود.

۲-۲ تأثیر شیب بالادست (S)

مطابق مطالعات صورت گرفته توسط ساکتیوادیول [۹] هنگامی که محیط متخلخل در حالت افقی قرار دارد، بیشتر رسوبات به وسیله نیروی وزن تمایل به ته‌نشینی دارند و بقیه به همراه جریان حمل می‌شوند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، تغییر شیب بالادست مسیر، با میزان ضریب ته‌نشست رابطه معکوس نشان می‌دهد. در شیب ۰/۰۰۱ به دلیل نزدیک بودن شیب به حالت افقی بیشترین میزان رسوب در داخل بدنه به تله افتاده و با افزایش شیب از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۵ و از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۱، کاهش ضریب ته‌نشست مشاهده شد. همانگونه که در نمودارهای شکل (۵) مشاهده می‌شود، در یک



(الف)



(ب)

شکل ۵- بررسی تأثیر شیب در ضریب ته‌نشست رسوب در:

الف. محیط متخلخل درشت‌دانه ($11000 < RE < 10000$)
ب. محیط متخلخل ریزدانه ($3500 < RE < 3000$)

در شرایط مشابه از نظر شیب بالادست مسیر، محیط ریزدانه دارای ضریب ته‌نشست بالاتری نسبت به محیط درشت‌دانه می‌باشد. همانگونه که از نمودارهای شکل (۵)، مشاهده می‌شود، به‌عنوان مثال در شیب ۰/۰۱، افزایش λ از ۱۵۰ به ۳۰۰ سبب کاهش ضریب ته‌نشست شده است. این روند در محیط ریزدانه هم مشاهده می‌شود.

۳- ارایه رابطه تجربی برای ضریب ته‌نشست:

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و روش ریاضی برازش، می‌توان رابطه‌ای جهت محاسبه ضریب ته‌نشست رسوبات در سدهای پاره‌سنگی ارایه کرد. به‌منظور بررسی توأم عوامل مؤثر بر روند تغییرات ضریب ته‌نشست با استفاده از نرم‌افزار Excel ۲۰۰۷ Microsoft Office همبستگی چند متغیره صورت گرفت. عواملی که به عنوان متغیر مستقل در معادله برازش استفاده می‌شوند باید متغیرهای هیدرولیکی و هندسی را در برگیرند، این متغیرهای مستقل شامل کلیه متغیرهای بی‌بعد اشاره شده به روش تحلیل ابعادی می‌باشند.

در این مطالعه به‌منظور دستیابی به بهترین رابطه برای محاسبه ضریب ته‌نشست رسوب، داده‌های موجود به دو دسته تقسیم شدند. از ۸۰٪ داده‌ها برای محاسبات مربوط به همبستگی چند متغیره استفاده شد و ۲۰٪ باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. این دسته‌بندی بصورت به طور کامل تصادفی انجام شد. بهترین رابطه برای محاسبه ضریب ته‌نشست رسوب بصورت غیر خطی با ضریب تبیین ($R^2=73\%$) بصورت زیر بدست آمد:

$$\Gamma_s = \frac{1.5098}{Re^{0.4027} \times S^{0.2377} \times \lambda^{0.8657} \times i^{1.3317}} \quad (15)$$

نتایج حاصل از داده‌های دسته آزمون در شکل شماره (۶) آورده شده است. بر اساس این شکل، مقدار $R^2=0.7374$ بوده که قرار گیری داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ حاکی از انطباق خوب بین مقادیر ضریب تله‌اندازی رسوب از رابطه مذکور با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد.

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از رابطه ارائه شده، ۲۰٪ باقی‌مانده داده‌ها برای آزمون رابطه، مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ضریب ته‌نشست این داده‌ها ابتدا به کمک رابطه (۱۵)، محاسبه و سپس با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شدند. در ادامه با استفاده از رابطه (۱۶)، جذر میانگین مربعات خطا محاسبه و در شکل (۷) نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_o - p_m)^2}{n}} \quad (16)$$

در این رابطه، p_o مقدار مشاهداتی، p_m مقدار محاسباتی و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، فرآیند ته‌نشست رسوبات در سدهای پاره‌سنگی با توجه به طبیعت نفوذپذیر این سدها و توانایی عبوردادن جریان از داخل بدنه مورد مطالعه قرار گرفت. از تجزیه و تحلیل مشاهدات و برداشت‌های آزمایشگاهی این پژوهش، نتایج زیر استخراج می‌شود: ۱- با افزایش نرخ تزریق رسوب، ته‌نشست رسوب روند افزایشی از خود نشان می‌دهد.

۲- در هر نرخ تزریق رسوب ثابت، با افزایش میزان رسوب تزریقی به جریان، ضریب ته‌نشست رفته‌رفته کاهش یافته و به عدد ثابتی خواهد رسید.

۳- بطور کلی با افزایش عدد رینولدز محیط متخلخل از میزان ضریب ته‌نشست کاسته می‌شود.

۴- محیط ریزدانه توانایی بیشتری در ته‌نشست رسوب نسبت به محیط درشت‌دانه از خود نشان می‌دهد.

۵- رابطه‌ی (۱۵)، نشان می‌دهد، از بین عوامل مؤثر در ته‌نشست رسوب در سازه‌های پاره‌سنگی، گرادیان هیدرولیکی بیشترین تأثیر را بر میزان ته‌نشست رسوب خواهد داشت که با نتایج آد و همکاران [۱]، مطابقت دارد.

منابع

- 1-Ade, F., Long, D., Savatsky, L., and Wu, S. 2001. "Laboratory Testing of Sediment Trap Efficiency of Seepage Flow through Rockfill Dike Bridging the Gap". Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges May 20, ASCE, 111-186.
- 2-Armanini, A., and Larcher, M. 2001. "Rational Criterion for Designing of Slit Check dam". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 172(2):94-104.
- 3-Banihabib, M., Banitalebi, M. 2010. "An Empirical Equation for Estimating the Trapped Efficiency in Case of Slit Dams". 8th International River Engineering Conference. Shahid Chamran University.
- 4-Cunningham, A, B., Anderson, C, J., and Bower, H. 1987, "Effect of Sediment- Laden low on Channel bed Clogging". Journal of Irrigation and Drainage, 113(1): 106-118.
- 5-Emadi, A. 2002. "The Simulation Of Non-Cohesive Sediment Transport in Detention Rockfill". Thesis For M.Sc In Water Structure. Tarbiat Modarres University. P:100.
- 6-Esmaili, K., Shafaie Bajestan and Kashefipour S., M. 2007. "Experimental Investigation of the Effective Parameters on Sediment Transport under Flash Flood". Iran-Watershed Management Science and Engineering Journal. 1(2):3-10. (In Persian).
- 7-Herrera, N, M. and Felton, G. K. 1991. "Hydraulic of

Sediment Transport Capacity in Detention Rockfill Using a Combined 1D Model and Dimensional Analysis". *Journal of Agricultural Engineering Research*.5(2):81-88.

12-Schälchli, U. 1995. "Basic Equations for Siltation of River Beds". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(3): 274-287.

13-Wu F C . 1993 . "Stochastic Modeling of Sediment Intrusion in to Gravel Bed". Ph.D Thesis , University of California , Berkeley , California.

14-Wu, F. C., and Huang, H. T. 2000. "Hydraulic Resistance Induced by Deposition of Sediment in Porous Media. *Journal of Hydraulic Engineering* . ASCE, 126(7): 547-551.

Flow through a Rockfill Dam Using Sediment-free Water". *Journal of Hydraulic Engineering*. 34(3):871-875.

8-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.

9-Sakthivadivel, R . 1972. "Sediment Transport through a Porous Column", In Shen, H.W. (ed), *Sedimentation*, H.W. Shen, Colorado State University, Fort Collins, Co, 26: 1-17.

10-Salehi, R., Rahimi, H., and Omid, M.,H. 2005. "An Empirical Study on Turblent Flow through Confined Coarse Porous Media". *Iranian Journal Agriculture Science*,36(2):263-271.

11-Samani, J.,M., V and Farshad, R. 2005. "Non-Cohesive