

بررسی آزمایشگاهی نقش رسوبات غیرچسبنده و مخلوط رسوبات در جریان بر ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی

نفیسه خرم شکوه^۱، سید محمد علی زمردیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۴

چکیده

از دیرباز، سیلاب و روش‌های مهار آن جهت حداقل‌سازی خطرات و کاهش خسارات مالی و جانی وارده به بشر و طبیعت مورد توجه بوده است. سدهای تأخیری پاره‌سنگی از جمله روش‌های سازه‌ای در راستای مهار سیلاب می‌باشند که با کاهش دبی پیک سیلاب و به تأخیر انداختن زمان آن، خسارات سیل را در پایین‌دست کمتر می‌کنند. به‌منظور طراحی رضایت‌بخش این سدها، لازم است که وضعیت عبور رسوب از بدنه و ضخامت بهینه آن مشخص باشد. ضخامتی از سد تأخیری پاره‌سنگی که از لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و بیشترین مقدار کاهش را در دبی پیک سیلاب و کمترین میزان افزایش را در زمان تداوم آن ایجاد کند، ضخامت بهینه نامیده می‌شود. بدین منظور، آزمایشاتی بر روی یک محیط متخلخل شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز انجام گرفت. سپس با استفاده از برنامه احتمالی مونت کارلو در تحلیل نتایج آزمایشگاهی، درصد احتمال عبور رسوب از بدنه متخلخل نمونه سد در هر حالت از آزمایش حاصل گردید. بر اساس نتایج، هنگام استفاده از مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده در جریان، ضخامت بهینه سد ۷ تا ۸ برابر قطر سنگدانه‌های ۲ سانتی‌متری به کاررفته در بدنه بدست آمد که در این حالت، قطر متوسط رسوبات غیرچسبنده موجود در مخلوط رسوبات، ۰/۶ میلی‌متر بوده است؛ حال آنکه در زمان استفاده از رسوبات غیرچسبنده با قطر ۰/۲ میلی‌متر در جریان، ضخامت بهینه ۷ برابر اندازه سنگدانه‌ها با قطر ۵ سانتی‌متر در محیط متخلخل گردید.

واژه‌های کلیدی: برنامه احتمالی مونت کارلو، سد تأخیری پاره‌سنگی، ضخامت بهینه، مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده.

^۱ کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز - شیراز، رحمت‌آباد، ۰۹۱۷۱۱۶۸۶۸۴، nafise.khorramshokouh@gmail.com

^۲ دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز - شیراز، دانشکده کشاورزی، باجگاه، ۰۹۱۷۱۳۲۳۰۷۶، mzomorod@shirazu.ac.ir (مسئول مکاتبه)

مقدمه

صرف نظر کرد. داری^۱ در این زمینه معادله زیر را پیشنهاد کرده است:

$$v = ki \quad (1)$$

که در آن v : سرعت ظاهری [LT^{-1}]; i : گرادیان هیدرولیکی [بدون بعد] و k : ضریب نفوذپذیری یا ضریب قابلیت هدایت هیدرولیکی است که بیانگر سهولت جریان آب در محیط متخلخل می‌باشد و به مشخصات محیط متخلخل و سیال بستگی دارد [LT^{-1}].

در محیط متخلخل درشت‌دانه به دلیل آشفته بودن جریان، معادله‌ی داری برقرار نیست (Ostad King, 1898; Ali-Askari and Shayannejad, 2015). برای نخستین بار با آوردن مثال‌هایی از رابطه غیر خطی تغییرات سرعت و گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل، این نوع جریان را غیرداری نامید. وی محدودیت‌های رابطه داری در محیط درشت‌دانه را خطی بودن ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان و همچنین ماندگار و آرام بودن جریان دانست. Wilkins (1956)، عبور جریان آب از درون سازه سنگریز را مورد بررسی قرار داد و معادله زیر را پیشنهاد نمود:

$$v = C\mu^a m^b I^n \quad (2)$$

که در آن C : فاکتور شکل مرکب، μ : لزجت آب [$ML^{-1}T^{-1}$]; m : متوسط شعاع هیدرولیکی خلل و فرج می‌باشد که ویلکینز مقدار آن را برابر $d/10$ ، برای $2 \leq d \leq 4$ متر فرض کرد [L]. d قطر متوسط سنگدانه‌های محیط متخلخل می‌باشد [L]. b ، C و n نیز ثابت‌های تجربی هستند. از جمله پژوهشگرانی

سنگریزه‌ها از دیرباز جهت ایجاد مانع در مسیر جریان و استفاده از آب تجمع یافته، به کار برده می‌شدند. امروزه "سدهای سنگریزه‌ای" به سدهایی گفته می‌شود که پیکره اصلی آن‌ها از سنگ انباشته شده روی هم و یا در لایه‌های متراکم‌شده تشکیل شده باشد. این سدها به علت قابلیت زهکشی آزاد و مقاومت بالای اصطکاکی، دارای پایداری ذاتی بسیار بالایی هستند. نوعی از سدهای پاره‌سنگی، سدهای تأخیری پاره‌سنگی هستند که هیچگونه هسته یا غشای نفوذ ناپذیری ندارند و به طور عمده جهت کنترل سیلاب به کار می‌روند. از دلایل نام‌گذاری این سدها تحت عنوان تأخیری، می‌توان به تأثیر آن‌ها بر هیدروگراف سیل ورودی به مخزن در جهت کاهش خسارات پایین‌دست اشاره کرد (نادری پیکام، ۱۳۹۱). به دلیل روند رو به رشد ساخت این سدها در کشور، لازم است که پژوهش‌هایی جهت بررسی هیدرولیک جریان درون سد و مسأله رسوب‌گذاری و یا فرسایش بازه پایین‌دست آن به طور جدی صورت پذیرد. در این شرایط، طراحی سازه نتیجه‌بخش بوده و اهداف ایجاد سد تأخیری پاره‌سنگی محقق می‌شود.

تحقیقات فراوانی درباره خصوصیات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه و بررسی روابط انتقال رسوبات از بدنه سد تأخیری پاره‌سنگی صورت گرفته است، اما روابطی که نقش رسوب چسبنده موجود در جریان را بر طراحی بهینه ابعاد بدنه سد و در ارتباط با قطر سنگدانه موجود در آن در نظر گرفته باشد، در دست نیست.

طبق پژوهش‌های گذشته، واضح است که جریان در مصالح ریزدانه، آرام بوده و سرعت جریان و عدد رینولدز کوچک هستند. بنابراین افت بار در مصالح ریزدانه به طور خطی و متنظر با سرعت ظاهری تغییر می‌کند. در چنین حالتی، می‌توان از نیروی اینرسی

¹ Darcy

داری در محیط متخلخل درشت‌دانه انجام شده است (Mohanty and Thauvin, 1998). در این زمینه، Zeng and Grigg, 2006) با جمع‌بندی نتایج ذکر شده به این نتیجه رسیدند که عدد رینولدز بحرانی برابر با ۰/۱۱، نشان دهنده وجود ۱۰٪ اثر غیر داری در جریان در محیط متخلخل می‌باشد. در نتایج آزمایشات این ۲ محقق، چنین بیان شده است که این مقادیر نسبت به دستاوردهای سایر پژوهشگران، به واقعیت نزدیک‌تر بوده است. در راستای بررسی تحقیقات مربوط به ضخامت بهینه محیط متخلخل پاره‌سنگی، می‌توان به یکی از روش‌های احتمالی مورد استفاده در بهینه‌سازی ضخامت سد، یعنی روش احتمالی مونت‌کارلو اشاره کرد. زمردیان و زاهد (۱۳۹۰) جهت یافتن ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی در آزمایشاتی روی نمونه محیط متخلخل این سد با ضخامت‌های مختلف و رسوب غیرچسبنده در جریان، تغییرات هیدروگراف سیل را در اثر وجود این سازه در کانال مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها صرفاً با بررسی آزمایشگاهی ضخامت‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین ضخامت محاسبه شده، ۲ برابر قطر متوسط سنگدانه‌های به کاررفته در بدنه می‌باشد؛ زیرا در این ضخامت، دبی اوج سیلاب و زمان تداوم آن، به کمترین مقدار خود می‌رسند. همچنین اضافه کردند که افزایش بیش از حد ضخامت محیط متخلخل سنگریزه‌ای، تأثیری بر هیدروگراف خروجی از سازه ندارد. همچنین زمردیان و زاهد (۱۳۸۵) با بهره‌گیری از این روش، ضخامت بهینه سدهای پاره‌سنگی کنترل رسوب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایشاتی جهت یافتن ضخامت بهینه این نوع سد، با عبور دادن رسوب غیرچسبنده از محیط متخلخل پاره‌سنگی و به کار بردن داده‌های آزمایش در روش مونت‌کارلو، از دو نکته استفاده کردند: نخست این‌که با فرض درصدی ثابت و مناسب برای میزان خاک عبوری از محیط متخلخل، ضخامت هم‌ارز آن به عنوان ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی انتخاب شد؛ دیگر اینکه با توجه به میزان دقتی مشخص، ضخامت‌های هم‌ارز را تعیین نموده و کمترین ضخامت، به عنوان ضخامت

که روابط فوق را مورد بررسی قرار دادند، می‌توان به Joy et al. (1991) اشاره نمود.

همانطور که بیان شد در محیط‌های سنگدانه‌ای به علت آشفته بودن جریان نمی‌توان از معادله داری استفاده نمود. بدین‌منظور در پاره‌ای از پژوهش‌ها از روابط بین ضریب اصطکاک داری - ویسباخ و عدد رینولدز در تعیین معادله دبی - اشل استفاده شده است. بر این اساس، Samani et al. (2004) با ارائه مدل نشان‌داده شده در شکل (۱)، برای روندیابی سیل درون مخازن سدهای پاره‌سنگی و با داشتن ارتفاع آب بالادست سد، میزان دبی عبوری جریان را محاسبه نمودند.

$$Q^2 = \frac{M_1}{2M_2}(H_1^2 - H_2^2) + \frac{b'M_1}{M_2^2}(H_1 - H_2) -$$

$$\frac{b'^2 M_1}{M_2^3} \ln \frac{M_2 H_1 + b'}{M_2 H_2 + b'} = 0 \quad (3)$$

که در آن Q : دبی جریان $[L^3 T^{-1}]$ ، H_1 و H_2 به ترتیب اعماق بالادست و پایین‌دست سد $[L]$ ، M_1 و M_2 : ضرایبی هستند که بدین‌صورت تعریف می‌گردند:

$$M_1 = \frac{2g(d-\sigma)W^2}{(L-0.7H_1 \cot\theta)} \quad (4)$$

$$M_2 = \frac{a'Wv}{Q(d-\sigma)} \quad (5)$$

و در آن‌ها W عرض سد $[L]$ ، d قطر متوسط سنگدانه‌های محیط متخلخل $[L]$ ، θ : زاویه شیب کف نسبت به افق (درجه)، σ : انحراف معیار مصالح سنگی در محیط متخلخل، v : لزجت جنبشی سیال $[L^2 T^{-1}]$ ، a' و b' پارامترهایی که با آزمایش بدست می‌آیند می‌باشد.

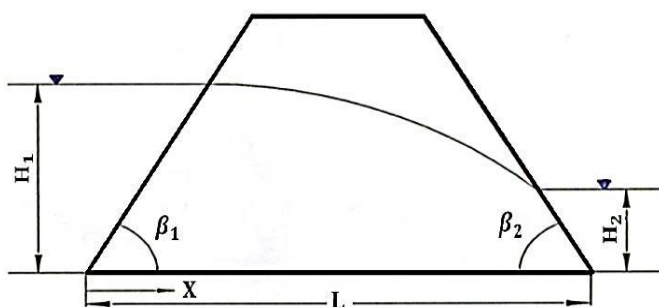
طبق پژوهش‌های Zeng and Grigg, 2006 واضح است که با افزایش سرعت جریان، نیروی اینرسی نقش مهم‌تری در افت بار خواهد داشت. همچنین تحقیقات متعددی در رابطه با تعیین محدوده شروع جریان غیر

همچنین بر طراحی ابعاد بدنه این نوع سد کمتر مورد توجه واقع شده است. بنابراین، در پژوهش حاضر، هدف این می‌باشد که با کامل‌تر کردن شرایط آزمایش، یعنی تزریق رسوب چسبنده به غیرچسبنده و ایجاد مخلوط رسوبات با درصد اختلاط وزنی ۳۰٪ به جریان و همچنین شبیه‌سازی شرایط طبیعی یعنی ایجاد سیلاب در کانال و انجام آزمایشات در حالت سیلابی، ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی محاسبه گردد.

مواد و روش‌ها

جهت تعیین ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی، نمونه‌ای از این سد با ضخامت‌های مختلف جهت انجام یک سری آزمایشات ساخته شد. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه

بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی انتخاب گردید. نتایج فعالیت‌های آن‌ها نشان می‌دهد که در حد پایینی منحنی دانه‌بندی مصالح سد، احتمال عبور ذرات رسوب از بدنه با افزایش ضخامت سد، کاهش می‌یابد. بررسی‌ها در حد میانی دانه‌بندی مصالح محیط متخلخل نیز بیانگر این نکته است که تغییر ضخامت بدنه سد، تأثیر چشمگیری بر احتمال عبور ذرات رسوب از بدنه ندارد. اما در حد بالایی منحنی دانه‌بندی مصالح، مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت سد تأخیری بر احتمال عبور ذرات رسوب تا قطر ۲۵۰ میلی‌متر ندارد. تاکنون در طراحی ابعاد بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی، فقط تغییرات قطر متوسط سنگدانه‌ها تشکیل‌دهنده بدنه مورد توجه محققان بوده است. حال آنکه تأثیر رسوبات موجود در جریان در حالت سیلابی بر کارکرد سد تأخیری پاره‌سنگی و



شکل (۱): شکل شماتیک سد پاره‌سنگی

چشم پوشی باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، انتخاب حدود مقادیر اندازه رسوب مورد آزمایش، با توجه به نمودار شیلدز و اندازه قطر سنگدانه محیط متخلخل و خصوصیات هندسی کانال، صورت گرفته است.

تعیین دبی تزریق رسوب و زمان به پایداری رسیدن بدنه سد از لحاظ رسوب‌گرفتگی:

قبل از شروع داده‌برداری در آزمایشات لازم بود که محیط متخلخل نمونه سد از لحاظ رسوب‌گرفتگی به پایداری برسد. جهت تحقق این منظور، یک آزمایش اولیه انجام گرفت. در این آزمایش یک دبی تزریق

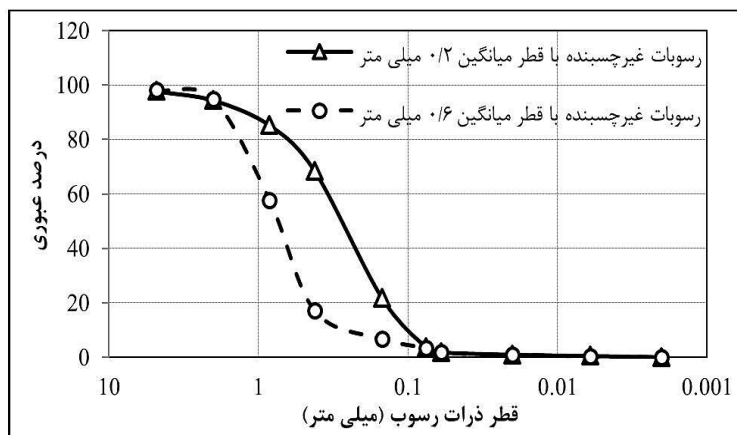
هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز و در یک کانال مستطیلی با عرض کف و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر انجام پذیرفت. به‌منظور تغذیه کانال از یک مخزن به حجم ۴/۶۳ مترمکعب استفاده شد که توسط یک دریچه فلزی کشویی از کانال اصلی جدا می‌گردید. شایان توجه است که تعبیه این دریچه کشویی به‌منظور ایجاد سیلاب با حجم مشخص و انجام آزمایشات در حالت سیلابی بوده است. برای شبیه‌سازی محیط متخلخل سد سنگریزه‌ای، از سبدهای توری حاوی سنگریزه در ۳ ضخامت مختلف استفاده شد. شبکه توری‌های مورد استفاده به اندازه کافی بزرگ بودند تا تأثیر آن‌ها بر جریان آب عبوری قابل

آزمایش تعیین گردید. قابل توجه است که کلیه آزمایش‌ها ابتدا با رسوب غیرچسبنده انجام شدند؛ سپس مقادیر لازم از خاک چسبنده و غیرچسبنده با توجه به درصد اختلاط وزنی ۳۰٪، مخلوط و کلیه آزمایش‌ها تکرار گردیدند. نمودار دانه‌بندی رسوبات غیرچسبنده در شکل (۲) و نمودار دانه‌بندی مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده با درصد اختلاط وزنی ۳۰٪، در شکل (۳) قابل ملاحظه است. در جدول (۲) مراحل استفاده همزمان از سنگدانه و رسوب، جهت انجام آزمایشات مربوطه نمایش داده شده است. روش اجرای آزمایش‌ها به این‌گونه بود که در ابتدای هر مرحله از آزمایش، مخزن تزریق رسوب از رسوب مورد نظر پر می‌گردید. بعد از باز کردن شیر کنترل دبی، مخزن تأمین آب شروع به پر شدن می‌نمود. هم‌زمان، دریچه ابتدای کانال با یک بازشدگی مشخص، تنظیم می‌شد. به طوریکه عمق آب پشت دریچه به مقدار ثابت و مشخصی می‌رسید و دبی پایه مورد نظر در کانال برقرار می‌گردید. سپس شیر مخزن تزریق رسوب باز گردیده و عملیات پایدار شدن محیط متخلخل بدنه سد از لحاظ رسوب‌گرفتنی آغاز می‌شد.

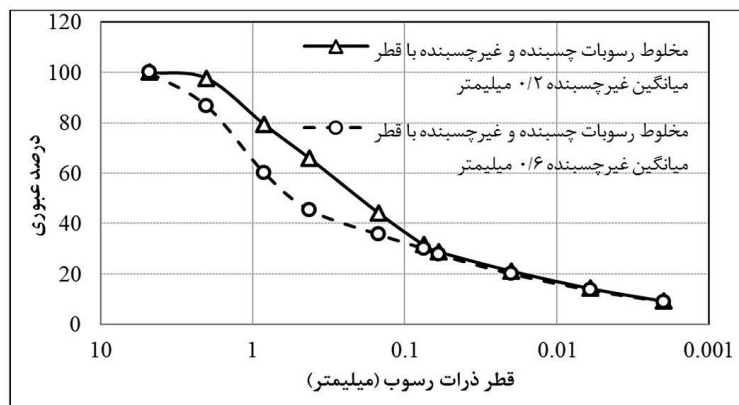
رسوب فرضی، طبق نتایج پژوهش‌های گذشته و عمق دبی پایه در نظر گرفته شد. بعد از شروع تزریق رسوب، در هر ۲۰ دقیقه غلظت رسوب پایین‌دست سد مورد اندازه‌گیری قرار می‌گرفت. بدین‌صورت که نمونه‌ای از جریان آب پایین‌دست برداشت گردیده و از کاغذ صافی عبور داده شده و مقدار رسوب باقی‌مانده روی کاغذ صافی توزین می‌گردید. زمانی که در دفعات متوالی، این غلظت‌ها برابر بودند، به عنوان زمان به پایداری رسیدن بدنه سد از لحاظ رسوب‌گرفتنی انتخاب شد. در نهایت دبی تزریق رسوب، با توجه به محدودیت زمانی هر آزمایش، شرایط هندسی کانال و مخزن، قطر سنگدانه‌های محیط متخلخل و ضخامت بدنه سد، برابر با $q_s = 4/31 \text{ g/s}$ تعیین شد. هم‌چنین زمان رسیدن به پایداری برای ضخامت‌های مختلف نمونه سد، متفاوت بود که در جدول (۱) حدود تقریبی این مقادیر را مشاهده می‌نمایید. با توجه به مقدار دبی تزریق رسوب در جریان و مدت زمان لازم برای به پایداری رسیدن محیط متخلخل بدنه سد از لحاظ رسوب‌گرفتنی، مقدار رسوب لازم برای هر مرحله از

جدول (۱): زمان به پایداری رسیدن بدنه سد از لحاظ رسوب‌گرفتنی به‌ازای ضخامت‌های مختلف

ضخامت بدنه سد (t، سانتی‌متر)	زمان رسیدن به پایداری (ثانیه)
۱۰	۶۰۰۰
۲۰	۷۸۰۰
۳۰	۹۶۰۰



شکل (۲): نمودار دانه‌بندی ذرات رسوب غیرچسبنده



شکل (۳): نمودار دانه‌بندی مخلوط رسوبات چسبنده و غیر چسبنده با درصد اختلاط وزنی ۳۰٪

می‌رسد. در ادامه، با تکرار هر آزمایش، دبی جریان در فاصله مشخص در پایین‌دست مدل سنگریزه‌ای نیز اندازه‌گیری می‌شد. در حقیقت با به کار گذاشتن دوباره دریچه و تنظیم بازشدگی و ارتفاع معلوم آب پشت دریچه و برقرار شدن دوباره دبی پایه در کانال، عملیات کشیدن ناگهانی دریچه و برداشت داده توسط دستگاه AVFM-II FLOW جهت برداشت هیدروگراف سیل از پایین‌دست نمونه سد، مجدداً صورت می‌پذیرفت. در این لحظه در راستای تعیین مقدار رسوب عبوری از بدنه سد تأخیری پاره‌سنگی، جریان آب، قطع شده و رسوبات گذرنده از محیط متخلخل جمع‌آوری می‌گردید.

با شروع هر آزمایش، از زمان‌سنج برای ثبت مدت‌زمان تزریق رسوب استفاده می‌گردید. بعد از کشیدن ناگهانی دریچه و ایجاد سیل، عملیات برداشت هیدروگراف سیل در بالادست و پایین‌دست نمونه سد صورت می‌پذیرفت؛ بدین‌صورت که ابتدا دستگاه سرعت‌سنج AVFM-II FLOW جهت اندازه‌گیری دبی در محل مشخص در بالادست نمونه محیط متخلخل قرار می‌گرفت؛ سپس دریچه کشویی ابتدای کانال دفعاً بالا آورده شده و حجم آب پشت دریچه به‌طور ناگهانی وارد کانال می‌گردید. با شروع بالا کشیدن دریچه، دستگاه AVFM-II FLOW دبی جریان را در هر ۵ ثانیه ثبت می‌نمود. این عمل تا جایی ادامه می‌یافت که دبی جریان، دوباره به دبی پایه

جدول (۲): نحوه کاربرد همزمان سنگدانه و رسوب جهت انجام آزمایشات تعیین ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی

مقدار دبی جریان (lit/s)					
۱۷/۸	۱۵/۸	۱۱/۸	۱۱/۸	۱۵/۸	۱۷/۸
۵	۲	۵	۲	۵	۲
قطر سنگدانه قابل استفاده با توجه به قطر رسوب (cm) و دبی جریان					
۰/۶	۰/۲	۰/۶	۰/۲	۰/۶	۰/۲
قطر رسوب قابل استفاده با توجه به مقدار دبی جریان (mm)					

وزنی رسوب عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی، برای هر ۲ مرحله استفاده از رسوب غیر چسبنده و مخلوط رسوبات و همچنین داده‌های مربوط به قطر سنگدانه و رسوب، وارد برنامه احتمالی مونت‌کارلو گردید و درصد احتمال عبور ذرات رسوب از محیط متخلخل در هر مرحله، از این روش بدست آمد. لازم

رسوبات عبوری از سد در هر مرحله از آزمایش، بعد از جمع‌آوری، در هوای آزاد خشک شده و جرم آن‌ها اندازه‌گیری می‌شد. در انتهای هر آزمایش، رسوبات ته‌نشین شده در بالادست نمونه سد نیز جمع‌آوری شده و بدین‌طریق محیط برای شروع آزمایش بعدی آماده می‌گردید. در این قسمت، مقادیر

احتمال عبور ذرات رسوب بر حسب تغییرات ضخامت محیط متخلخل پاره‌سنگی رسم گردید. از طرفی دیگر، هیدروگراف‌های برداشت شده از بالادست و پایین‌دست نمونه سد برای هر مرحله از آزمایش، جهت یافتن بیشترین مقدار کاهش دبی پیک سیلاب و کمترین مقدار افزایش در زمان تداوم آن، مورد مقایسه قرار گرفتند. در ادامه، درصد رسوب عبوری از بدنه محیط متخلخل پاره‌سنگی مربوط به آزمایش‌هایی که بیشترین اثر را بر هیدروگراف سیلاب داشتند، روی نمودار تغییرات درصد احتمال عبور ذرات رسوب بر حسب تغییرات ضخامت محیط متخلخل پاره‌سنگی برده شد و ضخامت متناسب با این مقادیر، به عنوان ضخامت بهینه انتخاب گردید.

بحث

بعد از برداشت هیدروگراف‌های سیلاب از بالادست و پایین‌دست نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی در حالات مختلف ترکیب ضخامت بدنه و قطر سنگدانه محیط متخلخل و قطر رسوب تزریق‌شده به جریان، ترکیباتی از این اجزا که بیشترین کاهش را در دبی پیک سیلاب و کمترین افزایش را در زمان تداوم آن ایجاد کردند به عنوان ترکیبات مؤثر انتخاب شدند. در جدول (۳) بیشترین درصد کاهش دبی پیک و کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب و همچنین درصد عبوری رسوب غیرچسبنده از محیط متخلخل پاره‌سنگی مربوط به این ترکیبات مؤثر را از بین همه حالات آزمایش مشاهده می‌نمایید. در جدول (۴) نیز موارد گفته شده برای حالتی ملاحظه می‌گردد که از مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده با درصد اختلاط وزنی ۳۰٪ در جریان استفاده شده باشد.

به ذکر است که روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از روش‌های احتمالاتی است که بر اساس درصد احتمال عبور رسوب از بدنه متخلخل سد تأخیری پاره‌سنگی، در تعیین ضخامت بهینه این سد مورد استفاده واقع می‌گردد. منظور از روش احتمالی بیان مراحل رانش، انتقال و گیر کردن ذرات خاک در بدنه متخلخل سد بر اثر نیروی وزن و تراوش است. این کار فرضاً می‌تواند بوسیله نوشتن معادلات حاکم بر همه ذرات خاک انجام شود؛ که منجر به تعدادی معادلات دیفرانسیلی می‌گردد که برای حل آن‌ها اطلاعات کاملی درباره سیستم لازم است و حل آن‌ها نیاز به محاسبات طولانی دارد. نتایج حاصله، موقعیت‌ها و سرعت‌های ذرات خاک در سیستم را به صورت تابعی از زمان بیان می‌کند. راستای حرکت ذرات در هر برخورد با حفرات سد پاره‌سنگی تغییر می‌کند که این امر بوسیله تصادفی انتخاب کردن جهت حرکت در هر مرحله از حرکت مدلسازی می‌شود. بنابراین ذراتی که با حرکت تصادفی جابجا می‌شوند، مسیری زیگزاگی شبیه به مسیر حرکت ذرات در حفرات را طی می‌کنند. البته مسیر حرکت ذره در واقع تصادفی نیست؛ زیرا حرکت تمامی ذرات رسوب در سیستم و در نتیجه دفعات دقیق برخوردها قابل محاسبه می‌باشند. اگرچه این کار عملی نیست و این برخوردها متغیر تصادفی فرض می‌شوند و حرکت یک ذره در میان پاره‌سنگ‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با مسیر تصادفی دوبعدی مدل‌سازی می‌شود (زمردیان و فتحی‌گلاب، ۱۳۸۲). در این پژوهش جهت یافتن ضخامت بهینه بدنه متخلخل سد، افزون بر ضخامت‌های به کار برده شده در آزمایشگاه، چندین ضخامت دیگر نیز وارد برنامه مونت‌کارلو شدند. سپس نمودار تغییرات درصد

جدول (۳): بیشترین درصد کاهش دبی پیک و کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب از بین همه حالات آزمایش و درصد عبوری رسوب غیرچسبنده در هر حالت

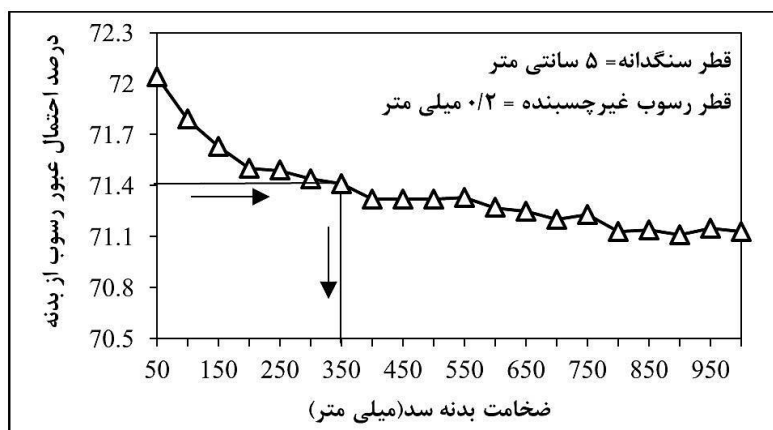
بیشترین و کمترین تغییرات در هیدروگراف سیل	ترکیبات سنگدانه و رسوب مورد استفاده در آزمایش و درصد عبوری رسوب مربوطه
قطر سنگدانه محیط متخلخل (سانتی متر)	قطر رسوب غیرچسبنده (میلی متر)
بیشترین درصد کاهش دبی پیک = $62/13$	درصد رسوب عبوری از بدنه $[g/ms]$
۵	۰/۲
کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب = $1/0.52$	۸۲/۰۸۸

جدول (۴): بیشترین درصد کاهش دبی پیک و کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب از بین همه حالات آزمایش و درصد عبوری مخلوط رسوبات در هر حالت

بیشترین و کمترین تغییرات در هیدروگراف سیل	ترکیبات سنگدانه و رسوب مورد استفاده در آزمایش و درصد عبوری رسوب مربوطه
قطر سنگدانه محیط متخلخل (سانتی متر)	رسوب غیرچسبنده d_{50} موجود در مخلوط رسوبات (میلی متر)
بیشترین درصد کاهش دبی پیک = $68/44$	درصد رسوب عبوری از بدنه $[g/ms]$
۲	۰/۲
کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب = $1/0.75$	۵۹/۸۰۸

سنگدانه با قطر میانگین ۵۰ میلی متر در محیط متخلخل و رسوب غیرچسبنده ۰/۲ میلی متر در جریان، داده‌های مربوط به دبی تخمینی حدود $19/8 \text{ lit/s}$ (دبی بیشتر از محدوده دبی‌های مورد آزمایش)، قابل انطباق با داده‌های خروجی از مونت - کارلو بود. در شکل (۴) دیده می‌شود که به‌ازای درصد عبوری ذرات رسوب برابر با $71/409$ ، ضخامت بدنه 350 میلی متر می‌باشد. در واقع با قطر رسوب غیرچسبنده برابر با $0/2$ میلی متر، دبی تخمینی جریان حدود $19/8 \text{ lit/s}$ و قطر سنگدانه ۵۰ میلی متر در محیط متخلخل، ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی حدود ۷ برابر قطر متوسط سنگدانه‌های محیط متخلخل و برابر با 350 میلی متر حاصل می‌گردد. همچنین داده‌های آزمایشگاهی مربوط به حالت ترکیب رسوب غیرچسبنده $0/6$ میلی متر و سنگدانه با قطر ۵۰ میلی متر در حالت استفاده از دبی $15/8 \text{ lit/s}$ ، قابلیت تطابق با داده‌های خروجی از برنامه مونت کارلو را داشت.

سپس، جهت تعیین ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی، درصد رسوبات عبوری مربوط به ترکیبات مؤثر مذکور، روی نمودارهای تغییرات درصد احتمال عبور رسوب در برابر تغییرات ضخامت بدنه مربوط به همان ترکیبات، مشخص شده و ضخامت هم‌ارز به عنوان ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی انتخاب گردید. این روند با وجود رسوبات غیرچسبنده در جریان در اشکال (۴) و (۵) قابل مشاهده می‌باشد. شایان ذکر است که مبنای کارکرد روش مونت کارلو در بررسی مراحل رانش، انتقال و درصد احتمال به دام افتادن ذرات خاک در حفرات محیط متخلخل، بر قطر حفره‌های محیط متخلخل، نیروی وزن ذرات و نیروی تراوش استوار بوده و اثر دبی جریان در این امر، در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین به‌ازای مقادیر مختلف دبی جریان، خروجی برنامه مونت کارلو یعنی درصد احتمال عبور رسوب از محیط متخلخل، یکسان خواهد بود. اما طبق نتایج آزمایشگاهی انتظار می‌رود که با افزایش دبی تا حدی مشخص، درصد عبوری رسوب افزایش یافته و سپس ثابت شود (خرم‌شکوه، ۱۳۹۱). بنابراین بر اساس شکل (۴)، برای حالت ترکیب



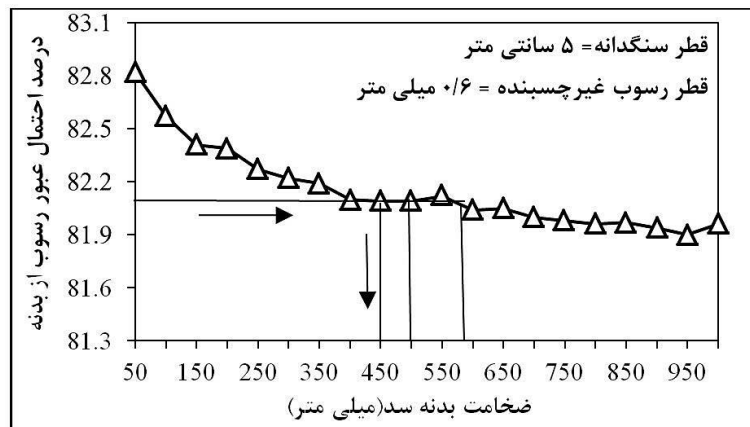
شکل (۴): تعیین ضخامت بهینه نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی، متناسب با درصد رسوب غیرچسبنده عبوری با توجه به هیدروگراف مربوطه

میلی‌متر در جریان و سنگدانه ۲۰ میلی‌متر در حالت استفاده از دبی ۱۷/۸ lit/s (سومین دبی مورد آزمایش)، قابلیت تطابق با داده‌های خروجی از برنامه مونت کارلو را داشت. ضخامت بهینه انتخاب شده در این حالت، در شکل (۸) قابل مشاهده است. در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد که به‌ازای درصد عبوری ذرات رسوب غیرچسبنده برابر با ۶۸/۸۰۵، ضخامت بدنه حدود ۲۰۰ میلی‌متر حاصل می‌گردد و بر اساس شکل (۷)، به‌ازای درصد عبوری ذرات رسوب برابر با ۵۹/۸۰۸، ضخامت بدنه حدود ۱۵۰ میلی‌متر بدست می‌آید؛ که به جهت مسائل اقتصادی، می‌توان ضخامت بدنه را به ۱۵۰ میلی‌متر کاهش داد. در حقیقت، ضخامت بهینه ۷ تا ۸ برابر قطر سنگدانه‌های به کاررفته در بدنه سد حاصل می‌گردد؛ حال آنکه در این حالت، d_{50} رسوبات غیرچسبنده موجود در مخلوط رسوبات، ۰/۶ میلی‌متر می‌باشد. شایان ذکر است که بهترین اثر سد تأخیری پاره‌سنگی بر هیدروگراف سیل، زمانی رخ می‌دهد که رسوب‌گرفتگی بدنه در حد تعادل باشد. یعنی با توجه به شرایط ترکیب رسوب و سنگدانه در حالت بهینه که ممکنست به‌ازای یک ترکیب ثابت، چند ضخامت بهینه در یک محدوده مقداری حاصل گردد، اگر مقدار گذردهی رسوب از بدنه چشم‌گیر باشد، با افزودن بر ضخامت بدنه و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، می‌توان این میزان گذردهی را کاهش داد و به حد تعادل رسانید. در این

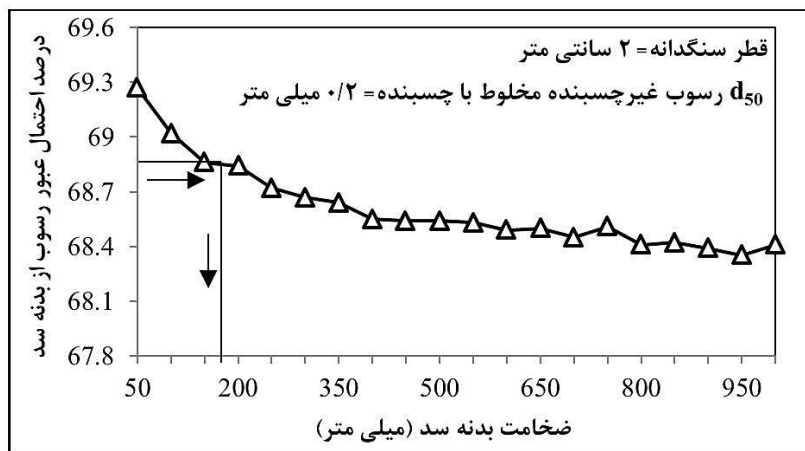
ضخامت بهینه انتخاب شده در این حالت، در شکل (۵) دیده می‌شود. همانطور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، به‌ازای درصد عبوری ذرات رسوب غیرچسبنده برابر با ۸۲/۰۸۸، مقدار ضخامت بدنه، ۴۵۰ میلی‌متر حاصل می‌شود که از لحاظ قابلیت انتقال ذرات رسوب، هم‌ارز ضخامت‌های ۵۰۰ و ۵۸۰ میلی‌متر است. بنابراین با توجه به مسائل اقتصادی، ضخامت بدنه ۴۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که در مرحله ساخت سدهای تأخیری پاره‌سنگی، ضخامت موردنظر می‌تواند با توجه به قابلیت اجرایی و نکات موردنظر، به سایر مقادیر بهینه نیز تغییر یابد. در راستای تعیین ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی در حالت وجود مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده در جریان با درصد اختلاط وزنی ۳۰٪، درصد عبوری مخلوط رسوبات مربوط به ترکیبات مؤثر مذکور، در اشکال (۶) و (۷)، مشخص شده و ضخامت هم‌ارز، به عنوان ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی انتخاب گردیده است. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، برای حالت ترکیب سنگدانه ۲ سانتی‌متر در محیط متخلخل و مخلوط رسوبات با d_{50} غیرچسبنده ۰/۲ میلی‌متر در جریان، داده‌های مربوط به دبی ۱۵/۸ lit/s (دومین دبی مورد آزمایش)، قابل انطباق با داده‌های خروجی از برنامه بود. هم‌چنین داده‌های آزمایشگاهی مربوط به حالت ترکیب مخلوط رسوبات با d_{50} غیرچسبنده ۰/۶

رسوب را به میزان لازم افزایش داد. این تغییرات ضخامت بدنه تا جایی صورت می‌گیرد که کارایی سد تأخیری پاره‌سنگی با بهترین اثر بر هیدروگراف سیل همراه باشد.

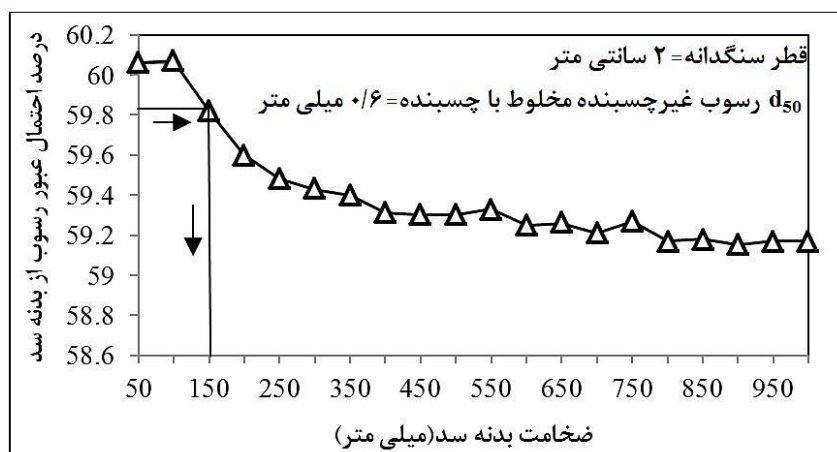
حالت، عکس قضیه نیز صادق است، یعنی اگر ترکیب رسوب موجود در جریان و سنگدانه بدنه به صورتی باشد که گذردهی رسوب دارای مقداری کم و گرفتگی بدنه قابل توجه گردد، می‌توان با کاهش ضخامت بدنه تا حدی که مشکل اجرایی پیش نیاید، گذردهی



شکل (۵): تعیین ضخامت بهینه نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی، متناسب با درصد رسوب غیر چسبیده عبوری با توجه به هیدروگراف مربوطه



شکل (۶): تعیین ضخامت بهینه نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی، متناسب با درصد عبوری مخلوط رسوبات چسبیده و غیر چسبیده با توجه به هیدروگراف مربوطه



شکل (۷): تعیین ضخامت بهینه نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی، متناسب با درصد عبوری مخلوط رسوبات چسبیده و غیرچسبیده با توجه به هیدروگراف مربوطه

نتیجه‌گیری

برای یک سد تأخیری پاره‌سنگی، ضخامتی بهینه است که دبی پیک هیدروگراف سیل عبوری از آن، بیشترین مقدار کاهش را داشته باشد و همچنین زمان تداوم سیلاب، دچار کم‌ترین افزایش شود. از دیدگاه هیدرولیک جریان و اجزای بدنه، در حالت وجود مخلوط رسوبات با d_{50} غیرچسبیده برابر با $0/6$ میلی‌متر در جریان، ضخامت بهینه ۷ تا ۸ برابر قطر سنگدانه‌های به کاررفته در بدنه سد (۲ سانتی‌متر) می‌باشد. در این حالت دبی جریان، $17/8 \text{ lit/s}$ بوده است. همچنین ضخامت بهینه نمونه سد تأخیری سانتی‌متر در بدنه متخلخل سد، برابر با ۲۰۰ میلی‌متر و در حالت استفاده از مخلوط رسوبات با d_{50} غیرچسبیده $0/2$ میلی‌متر در جریان و سنگدانه با قطر

۲ سانتی‌متر حاصل گردیده است. در این حالت، دبی مورد آزمایش برابر با $15/8 \text{ lit/s}$ بوده است. زمانی که فقط از رسوبات غیرچسبیده $0/2$ میلی‌متر در جریان با دبی تخمینی $19/8 \text{ lit/s}$ استفاده شد، ضخامت بهینه ۷ برابر قطر سنگدانه‌های موجود در محیط متخلخل (۵ سانتی‌متر) گردید. در حالتی از آزمایشات نیز که از ترکیب رسوبات غیرچسبیده با قطر میانگین $0/6$ میلی‌متر در جریان با دبی $15/8 \text{ lit/s}$ و سنگدانه‌های با قطر ۵ سانتی‌متر در بدنه سد استفاده شده بود، میزان ضخامت بدنه متخلخل سد برابر با ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۸۰ میلی‌متر حاصل گردید که با توجه به ملزومات اجرایی و اقتصادی، قطر قابل اجرا در عمل انتخاب می‌گردد.

منابع

- خرم‌شکوه، ن. ۱۳۹۱. ضخامت بهینه و ظرفیت انتقال مخلوط رسوبات چسبیده و غیرچسبیده در سدهای تأخیری پاره‌سنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی به راهنمایی دکتر زمردیان، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.
- زمردیان، م. ع. و م. زاهد. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی ضخامت سدهای پاره‌سنگی با روش احتمالی مونت کارلو. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، اهواز.
- زمردیان، م. ع. و م. زاهد. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی هیدروگراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران، شهرکرد: دانشگاه شهرکرد، دوره ۵، شماره ۸، ص. ۸۱-۸۸.

- زمردیان، م. ع. و م. فتحی گلاب. ۱۳۸۲. بهینه‌سازی ضخامت فیلتر سد ایزدخواست با استفاده از روش احتمالی مونت کارلو. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، ص. ۹۶۱-۹۵۳.
- نادری پیکام، م. ۱۳۹۱. توسعه مدل ریاضی دو بعدی برای جریان در سدهای پاره‌سنگی با مصالح غیر همگن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- Joy, D. M., W. C., Lennox and N. Kouwen. 1991. Particular transport in porous media under non-linear flow condition. *Journal of Hydraulic Research*, 29(3): 373-385.
- King, F. H., 1898. Principles and conditions of the movement of groundwater. U.S. Geol. Survey, 91th. Ann. Report, Part 2, pp. 59-294 as in Swartzendruber, D., 1962. non-Darcy flow behavior in liquid-saturated porous media. *Journal of Geophysical Research*, 67(13): 5206.
- Leps, T. M. 1973. Flow through rockfill embankment dam engineering casagrande. Edited Bschofeld R.C. and Poulos, S.J. John Wiley & Sons, PP.87-107.
- Ostad-Ali-Askari, K. and M. Shayannejad. 2015. Usage of rockfill dams in the HEC-RAS software for the purpose of controlling floods. *American Journal of Fluid Dynamics*, 5(1): 23-29.
- Samani, J. M. V., H. M. V. Samani. and M. Shayannejad. 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Research*, 42(4): 435-439.
- Thauvin, F. and K. K. Mohanty. 1998. Network modeling of non-Darcy flow through porous media. *Transport in Porous Media*, 31(1):19-37.
- Wilkins, J. K. 1956. Flow of water through rockfill and Its application to the design of dam. Proceedings of the second Australian New Zealand conference on soil mechanic and foundation engineering, pp. 141-149.
- Zeng, Z., R. Grigg. 2006. A Criterion for non-Darcy flow in porous media. *Transport Porous Media*, 63: 57-69.

Experimental Investigation of Non-Cohesive and Mixed Sediment Effects on Optimum Thickness of Detention Rockfill Dams

Nafise Khorramshokouh¹, Seyed Mohammad Ali Zomorodian²

Abstract

From ancient times, flood and its mitigation methods have been important to human in order to reduce damages threatening people and nature. Detention rockfill dams which are from the structural methods can control the flood risks in downstream by decreasing the maximum discharge of the flood and increasing the total time of its hydrograph. In order to have an efficient design of these dams, the important conditions of sediment transportation through dam body and also the optimum thickness of the dam should be known. The optimum thickness of detention rockfill dam leads into the maximum reduction in flood peak discharge and also causes the increment of flood duration to get minimized. To find this optimum thickness, some experiments were done on a simulated porous media in a lab. Then, the experimental results were utilized in Monte Carlo probabilistic method in order to find the percentage of sediment transportation probability. Results depict that by using mixed sediment with non-cohesive mean diameter of 0.6 mm within the water flow, optimum thickness would be 7 to 8 times greater than the rockfills with mean diameter of 2 cm in the dam body; while using non-cohesive sediment with mean diameter of 0.2 mm in the flow causes the optimum thickness of the detention rockfill dam to be 7 times greater than body rockfills with diameter of 5 cm.

Keywords: detention rockfill dam, mixed cohesive and non-cohesive sediments, Monte Carlo probabilistic method, optimum thickness.

¹Graduated M.Sc. of hydraulic structures, water engineering department, Shiraz University, Email: nafise.khorramshokouh@gmail.com, 09171168684

²Associate Professor of water engineering department, Shiraz University, Email: mzomorod@shirazu.ac.ir, 09171323076, (Corresponding author)