Archive of SID

رویکرد شبیه‌سازی–بهینه‌سازی جهت تعیین مشخصات بهینه‌ی سدهای تأخیری پاره‌سنگی در شرایط سیلابی

نفیسه خرم‌شکوه[۱]، محمدرضا نیکو[۲]*، سید محمد علی زمردیان[۳]

چکیده

سدهای تأخیری پاره‌سنگی از جمله روش‌های سازه‌ای مهار کردن سیلاب هستند که هیچ هسته یا غشاء نفوذناپذیری نداشته و به طور عمده جهت مهار سیلاب به کار می‌روند. این سدها بده‌ی اوج سیلاب عبوری را کاهش داده و در زمان وقوع آن تأخیر ایجاد می‌نمایند؛ بدین‌ترتیب خسارات جانی و مالی سیل را در پایین‌دست، کمتر می‌کنند. شاید بتوان گفت برای اولین‌بار، روش‌شناسی جدیدی برای تدوین یک نمونه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی جهت تعیین مشخصات بهینه‌ی سدهای تأخیری پاره‌سنگی در این پژوهش ارائه گردیده است. نمونه‌ی مذکور، برمبنای فرانمونه‌ی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، و نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استوار است. بدین‌منظور، در ابتدا، از داده‌های منتج از آزمایش‌های مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی محیط متخلخل پاره‌سنگی، مربوط به خرم‌شکوه (۱۳۹۱) جهت آموزش و اعتبارسنجی نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده است. در ادامه، با اتصال نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی صحت‌سنجی شده به عنوان یک فرانمونه‌ی شبیه‌ساز رفتار هیدرولیکی سد پاره‌سنگی، به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، نمونه‌ی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، به‌منظور تعیین مشخصات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی با لحاظ تعامل بین متغیرهای طراحی و آب‌نگار سیل عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی، تدوین گردید. نتایج حاصل از روش‌شناسی پیشنهادشده، نشان می‌دهند که ضخامت بهینه‌ی محاسبه‌شده مربوط به محیط متخلخل پاره‌سنگی، بازاء جمیع بده‌ی سیلاب‌های محتمل، ۱۷/۶ سانتیمتر بوده و همچنین قطر متوسط بهینه‌ی سنگدانه‌های تعبیه شده در بدنه، ۲ سانتیمتر حاصل گردیده است. همچنین، بازاء مقادیر بهینه‌ی طراحی، بده‌ی اوج آب‌نگار سیل عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی ٪۴۷/۱۸ کاهش یافته است و طول مدت سیلاب نیز در شرایط بهینه، ٪۳۹/۹۴ افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: سد تأخیری پاره‌سنگی، شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه، فرانمونه، نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مخلوط ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده.

[۱] دانش‌آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
[۲] دانشیار بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
[۳] دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
* نویسنده مسئول مقاله: nikoo@shirazu.ac.ir، تلفن: ۰۷۱۳۶۱۳۳۴۹۷

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

سنگریزه‌ها از دیرباز جهت ایجاد مانع در مسیر جریان و استفاده از آب تجمع‌یافته، به‌کار برده می‌شدند. امروزه سدهای سنگریزه‌ای به سدهایی گفته می‌شود که پیکره‌ی اصلی آنها از سنگ انباشته شده روی هم و یا در لایه‌های متراکم شده 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 غشاء نفوذ ناپذیری ندارند و به طور عمده جهت مهار کردن سیلاب به کار می‌روند. از دلایل نامگذاری این سدها تحت عنوان تأخیری، می‌توان به تأثیرشان بر آب‌نگار سیل ورودی به مخزن در جهت کاهش خسارات پایین‌دست اشاره کرد. به دلیل روند رو به رشد ساخت این سدها در کشور، لازم است که پژوهش‌هایی جهت تعیین مشخصات بهینه‌ی این سدها از لحاظ هیدرولیک جریان درون سد و مسئله‌ی ته‌نشینی یا فرسایش بازه‌ی پایین‌دست آن به‌طور جدی صورت پذیرد. در این حالت، طراحی این سازه با مشخصات بهینه، نتیجه‌بخش خواهد بود و اهداف ایجاد سد تأخیری پاره‌سنگی محقق می‌گردد.

به طور کلی، در محیط متخلخل درشت‌دانه، سرعت جریان و عدد رینولدز افزایش می‌یابند و جریان از محدوده‌ی آرام خارج شده و شرایط جریان دارسی برقرار نیست. به منظور بررسی شرایط جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه، پژوهش‌های آزمایشگاهی متعددی صورت پذیرفته است. ویلکینز (۱۹۵۶) عبور جریان آب را از درون سازه سنگریزه‌ای بررسی کرد و معادله‌ی زیر را پیشنهاد نمود:

$$v = c\mu^{\alpha} m^{b} I^{n} \qquad (۱)$$

در معادله‌ی فوق، v سرعت ظاهری جریان $[LT^{-1}]$، c عامل شکل مرکب، μ لزجت آب $[ML^{-1}T^{-1}]$، m متوسط شعاع هیدرولیکی خلل و فرج است که ویلکینز مقدار آن را برابر با $\frac{d}{10}$، برای $0.4 \le d \le 2$ متر فرض کرد $[L]$. b، α و n نیز ثابت‌های تجربی هستند. از جمله محققان دیگر که رابطه‌ی فوق را بررسی کرده‌اند، می‌توان به دوگان (۱۹۶۷)، فورشهایمر (۱۹۷۲)، لپس (۱۹۷۳) و جیگر (۱۹۷۴) اشاره نمود.

امروزه یکی از ابزارهای معمول جهت پیش‌بینی رفتار ته‌نشست‌ها و جریان در محیط‌های متخلخل، استفاده از نمونه‌های ریاضی است. در این زمینه، نمونه‌های ریاضی به دو دسته نمونه‌های تجربی و نمونه‌های ریاضی مبتنی بر معادلات حاکم بر جریان و ته‌نشست تقسیم می‌شوند. از جمله محققینی که نمونه‌های مذکور را جهت بررسی رفتار ته‌نشست‌ها و جریان در محیط‌های متخلخل به‌کار بردند، می‌توان به فرانسا و آلمیدا (۲۰۰۴) {نمونه‌سازی آب‌نگار سیل خروجی از سدهای سنگریزه‌ای به وسیله‌ی نمونه‌ی پیشنهادی RoDaB}؛ بارتون و باخبرگر (۲۰۰۷) {محاسبه حداکثر حجم ته‌نشست قابل تله‌اندازی در محیط متخلخل با استفاده از یک نمونه‌ی حرکت مرحله‌ای ته‌نشست} اشاره نمود.

در سالهای اخیر تحقیقات مرتبط با بهینه‌سازی ابعاد سدهای تأخیری پاره‌سنگی و نمونه‌سازی بهینه در راستای مقابله با سیلاب رو به فزونی نهاده است، که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به کوشش‌های زیر اشاره کرد: سامانی و همکاران (۲۰۰۴) {ارائه نمونه‌ای برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان درون سدهای سنگریزه‌ای و بررسی حساسیت نمونه بر تغییرات داده‌های سطح آب در بالادست سد با تغییر قطر متوسط سنگدانه‌های بدنه}؛ پارک و همکاران (۲۰۱۱) {تدوین نمونه‌ی یکپارچه‌ی مهار سیلاب با اتصال الگوریتم بهینه‌سازی و برنامه‌ی شبکه غیرماندگار (UNET) درجهت روندیابی هیدرولیکی و کاهش سیلاب در حوضه}؛ دینگ و وانگ (۲۰۱۲) {تدوین یک نمونه‌ی بهینه‌سازی غیرخطی در راستای تعیین آب‌نگارهای انحرافی بهینه جهت تنظیم خروج بده‌ی سیلابی از طریق یک یا چند دریچه‌ی سیلابی}؛ یزدی و صالحی نیشابوری (۲۰۱۴) {اتصال نمونه‌ی شبیه‌سازی MIKE-11 و نمونه‌ی بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II جهت حداقل‌سازی هزینه اقدامات کاهش سیلاب و خسارات بالقوه‌ی سیلاب‌دشت‌ها}. زمردیان و زاهد (۱۳۸۵) با بهره‌گیری از برنامه احتمالی مونت‌کارلو، اثر تغییرات ضخامت محیط متخلخل بدنه‌ی سد را بر میزان گذردهی ته‌نشست‌های غیرچسبنده از بدنه‌ی سد، بررسی کردند. آنها در آزمایش‌هایی با عبور دادن ته‌نشست غیرچسبنده از محیط متخلخل پاره‌سنگی و به کاربردن

www.SID.ir

Archive of SID

داده‌های آزمایش در برنامه‌ی احتمالی مونت‌کارلو، به این نتیجه رسیدند که در حد پایینی منحنی دانه‌بندی مصالح موجود در بدنه‌ی سد، با افزایش ضخامت سد، احتمال عبور ذرات ته‌نشست از بدنه کاهش می‌یابد. بررسی‌ها در حد میانی دانه‌بندی مصالح محیط متخلخل نیز بیانگر این نکته است که تغییر ضخامت بدنه‌ی سد، تأثیر چشمگیری بر احتمال عبور ذرات ته‌نشست از بدنه ندارد. اما در حد بالایی منحنی دانه‌بندی مصالح مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت سد، تأثیری بر احتمال عبور ذرات ته‌نشست تا قطر ۲۵۰ میلیمتر ندارد. همان‌طور که ملاحظه گردید، زمردیان و زاهد (۱۳۸۵)، احتمال عبور ذرات ته‌نشست غیرچسبنده را از محیط متخلخل مورد بررسی قرار دادند و به‌دلیل پیچیدگی‌های رفتاری ته‌نشست‌های چسبنده، هنوز مبحثی که اثر ته‌نشست چسبنده‌ی موجود در جریان را بر طراحی بهینه‌ی ابعاد بدنه‌ی سد در ارتباط با قطر سنگدانه موجود در آن در نظر گرفته باشد، ارائه نگردیده است و در بیشتر موارد اثر فرسایندگی ته‌نشست‌های چسبنده مورد توجه بوده است. نیکو و همکاران (۲۰۱۵) و نیکو و خرم‌شکوه (۱۳۹۵) ضخامت بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی را با استفاده از نمونه‌ی بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک و با به‌کارگیری نمونه‌های تصمیم‌گیری و چانه‌زنی ارائه نمودند. در پژوهش حاضر، روش‌شناسی جدیدی برای تدوین یک نمونه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تک‌هدفه، جهت تعیین مشخصات بهینه‌ی سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه گردیده است که این روش‌شناسی، برمبنای نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و فرانمونه‌ی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه استوار است. در نمونه‌ی تک‌هدفه مذکور، اثر تغییر وزن‌های اختصاص داده شده به اهداف بهینه‌سازی بر نتایج، تحت رویکرد تعامل چندوزنی، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ که در منحنی تعامل بین اهداف متضاد بهینه‌سازی در نمونه‌سازی چندهدفه این اتفاق صورت نمی‌گیرد. همچنین، جهت کاملتر کردن شرایط آزمایش، از مخلوط ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده با نسبت اختلاط وزنی ٪۳۰ در جریان استفاده شد.

مواد و روش‌ها

ساختار نمونه‌ی پیشنهادی

هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک روش‌شناسی جدید شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای تعیین دو فراسنج طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی، یعنی ضخامت و قطر سنگدانه به کار رفته در بدنه‌ی سد است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، روش‌شناسی پیشنهادی، شامل سه گام اصلی است. در گام اول، داده و اطلاعات لازم برای طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی، جمع‌آوری و اهداف اجرایی اصلی انتخاب می‌گردند.

در مرحله‌ی دوم، فرانمونه‌ی شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه با قابلیت اتصال به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برمبنای گروه اطلاعاتی حاصله از گام اول، آموزش و صحت‌سنجی می‌گردد. در گام سوم نیز، نمونه‌ی بهینه‌سازی جهت یافتن خصوصیات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی، با عملکرد هیدرولیکی و زیست‌محیطی قابل قبول، تدوین می‌گردد. در این مرحله، نمونه‌ی شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده، به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، متصل شده و نمونه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی ضخامت محیط متخلخل و قطر متوسط سنگدانه‌ی موجود در بدنه‌ی سد تأخیری حاصل می‌گردد. جزئیات بهینه‌سازی ضخامت محیط متخلخل و قطر متوسط سنگدانه‌ی موجود در بدنه‌ی این سد، با در نظر گرفتن خصوصیات جریان و کارایی هیدرولیکی سد تأخیری پاره‌سنگی، در بخش ساختار نمونه‌ی بهینه‌سازی، بیان خواهد شد.

با توجه به شکل ۱، در راستای بهینه‌سازی خصوصیات سد تأخیری پاره‌سنگی، از فرانمونه‌ی شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه به منظور پیش‌بینی مقادیر تغییرات بده‌ی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی و همچنین تغییرات زمان تداوم سیلاب استفاده گردید. نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی منتج از آزمایش‌های مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی، آموزش و صحت‌سنجی شد و در ادامه به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک اتصال یافت. در واقع، نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه به منظور پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی سد تأخیری

www.SID.ir

Archive of SID

پاره‌سنگی، و با در نظر گرفتن پنج متغیر ورودی شامل؛ ضخامت بدنه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی و قطر میانگین سنگدانه‌های موجود در محیط متخلخل بدنه‌ی سد (به عنوان متغیرهای تصمیم) و نیز بده‌ی جریان، شاخص خمیری ته‌نشست‌های چسبنده و قطر میانگین مخلوط ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده‌ی موجود در جریان (به عنوان متغیرهای حالت) به‌کار برده شد.

در بخش بعد، اجزای اصلی روش‌شناسی پیشنهاد شده، به صورت جزئی شرح داده شده است.

نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

به طور کلی، جهت مدنظر قرار دادن حداکثر شرایط تأثیرگذار در طراحی مشخصات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی، ضروری است که از نمونه‌های بهینه‌سازی استفاده شود. به‌طوری‌که طی عمر مفید این سازه، همزمان با بهینه بودن ابعاد سد، شرایط هیدرولیکی نیز در بهترین حالت عملکرد خود قرار گیرند. همان‌طور که بیان شد، سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی با دو تغییر مواجه است؛ کاهش بده‌ی اوج سیل و افزایش زمان تداوم آن. در حقیقت در این پژوهش، حداکثرشدن میزان کاهش بده‌ی اوج سیلاب و حداقل‌شدن مقدار افزایش زمان تداوم سیلاب تا حد امکان، به عنوان اهداف بهینه‌سازی مشخصات سد تأخیری پاره‌سنگی درنظر گرفته شدند. به‌دلیل متفاوت بودن میزان تأثیر دو تغییر مربوط به آب‌نگار سیل عبوری از بدنه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی در طراحی بهینه‌ی ابعاد این سد، طبق‌نظر کارشناسان به هر هدف، با توجه به اهمیت آن، وزنی اختصاص یافت. سپس هر هدف در وزن مربوطه ضرب گردید و مجموع این دو مقدار به عنوان تابع هدف نهایی در نظر گرفته شد. بنابراین، در تابع هدف بهینه‌سازی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی، حداکثرشدن میزان کاهش بده‌ی اوج سیلاب و حداقل‌شدن میزان افزایش زمان تداوم سیلاب عبوری از بدنه‌ی متخلخل سد، مدنظر قرار گرفت و بدین‌ترتیب ویژگی تابع هدف و قیود متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی به صورت زیر لحاظ گردیدند:

$$\text{Min}\quad h=\left(w_1\times\sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI}{Q_p}^{d_s,q,pi}\right)+\left(w_2\times\sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI}{F_d}^{d_s,q,pi}\right)=\sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI}f(x_1,x_2)^{d_s,q,pi} \qquad (۲)$$

$$Q_p=g(x_1,x_2,t,q,d_s,PI) \qquad (۳)$$

$$F_d=h(x_1,x_2,t,q,d_s,PI) \qquad (۴)$$

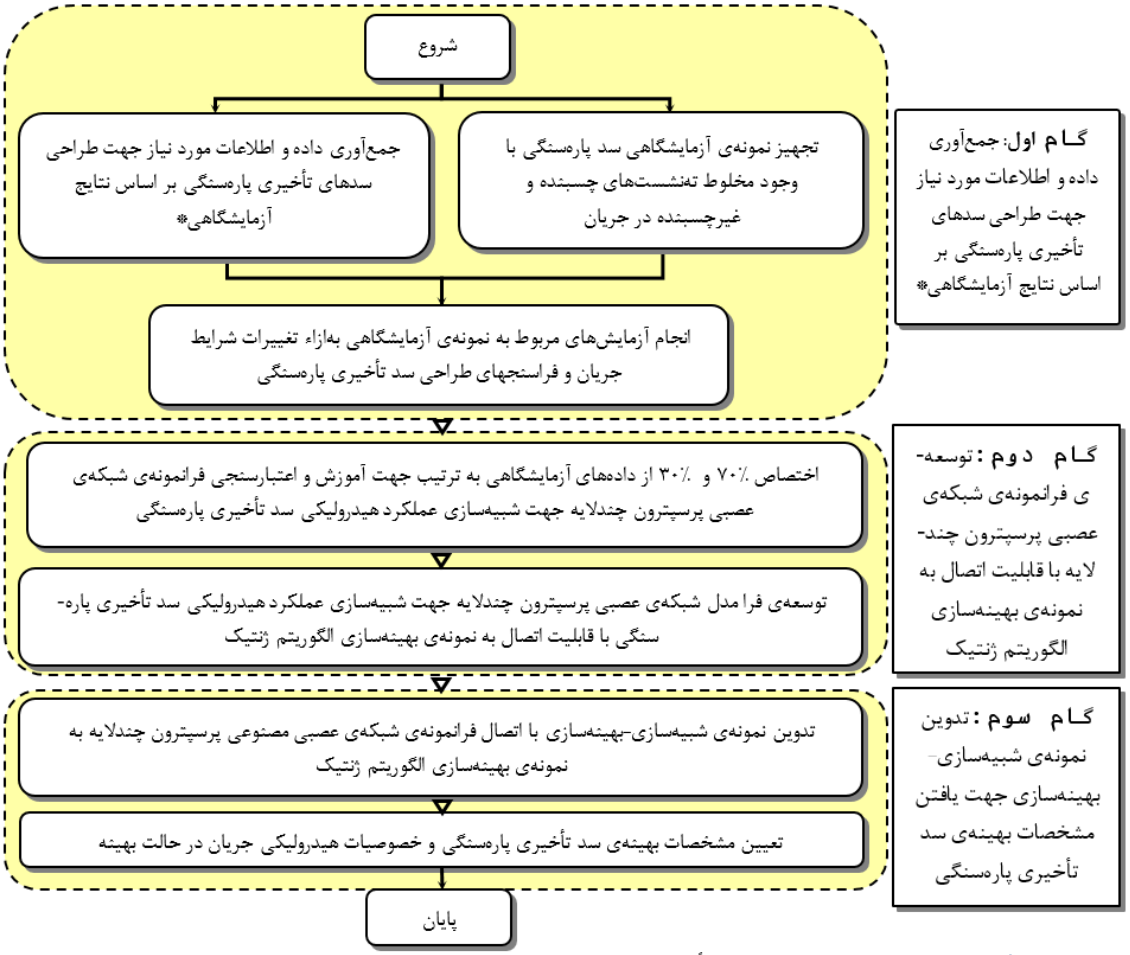
$$d_l\le x_1\le d_u \qquad (۵)$$

$$t_l\le x_2\le t_u \qquad (۶)$$

که در معادلات مذکور، x_i متغیر تصمیم iام ($i=1$ و $i=2$) به ترتیب مربوط به قطر میانگین سنگدانه موجود در محیط متخلخل (d,cm) و ضخامت سد تأخیری پاره‌سنگی (t,cm) هستند)، d_l و d_u به ترتیب حدود پایینی و بالایی قطر سنگدانه‌های موجود در بدنه‌ی سد، t_l و t_u به ترتیب حدود بالا و پایین ضخامت بدنه‌ی سد، w_i وزن اختصاص داده شده به اهداف بهینه‌سازی، $f(x_1,x_2)^{d_s,q,pi}$ فرانمونه‌ی غیرخطی به منظور تخمین ضرائب مربوط به تغییرات آب‌نگار سیل عبوری از بدنه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی با دو فراسنج کاهش بده‌ی اوج سیلاب عبوری از محیط متخلخل و افزیش زمان تداوم آن، g تابعی که به‌وسیله‌ی فرانمونه‌ی غیرخطی تخمین زده می‌شود و درصد تغییرات بده‌ی اوج آب‌نگار سیل عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی را به‌دست می‌دهد، h تابعی که با به کار بردن فرانمونه‌ی غیرخطی تخمین زده می‌شود و درصد تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی را به‌دست می‌دهد، Q_p درصد تغییرات بده‌ی اوج آب‌نگار سیل عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی، F_d درصد تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی، q بده‌ی جریان $[L^3T^{-1}]$، d_s قطر میانگین مخلوط ته‌نشست‌های موجود در جریان (cm) و PI شاخص خمیری ته‌نشست‌های چسبنده موجود در جریان است. شایان ذکر است که در این پژوهش،این فرانمونه با استفاده از نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه حاصل گردیده است. افزون بر آن، از نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه به منظور شبیه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سد تاخیری پاره‌سنگی استفاده شده است که

www.SID.ir

Archive of SID



*داده‌های مربوط به خرم‌شکوه (۱۳۹۱) صرفاً به عنوان ورودی نمونه‌های تدوین‌شده در روش‌شناسی پیشنهادی در این تحقیق، به کار برده شدند.

شکل ۱- روندنمای روش‌شناسی پیشنهادشده جهت تدوین نمونه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مشخصات سد تأخیری پارەسنگی.

در واقع طی این فرآیند شبیه‌سازی، تعامل بین متغیرهای طراحی و آب‌نگار سیل عبوری از سد تأخیری پارەسنگی مدنظر قرار داده می‌شود.

داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش از داده‌های آزمایش‌های مربوط به پایان‌نامه‌ی خرم‌شکوه (۱۳۹۱)، به‌عنوان داده‌های ورودی شبکه‌ی عصبی استفاده شده است. در گروه داده‌های مذکور، اثر تغییرات قطر میانگین سنگدانه موجود در محیط متخلخل، بده‌ی جریان، قطر میانگین مخلوط تەنشست‌ها و شاخص خمیری تەنشست‌های چسبنده موجود در جریان بر بده‌ی اوج و زمان تداوم سیلاب عبوری از نمونه‌ی سد تأخیری پارەسنگی بررسی شده است. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز و در یک نهر مستطیلی با عرض کف و عمق به ترتیب ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر صورت پذیرفت. برای تغذیه‌ی نهر از یک مخزن به حجم ۴/۶۳ مترمکعب استفاده شد که به وسیله‌ی یک دریچه‌ی کشویی فلزی، از نهر اصلی جدا می‌گردید. برای شبیه‌سازی محیط متخلخل سد سنگریزه‌ای، از سبد توری حاوی سنگریزه در ۳ ضخامت مختلف استفاده شد. شبکه‌های توری به‌کاررفته، به اندازه کافی بزرگ بودند تا تأثیر آنها بر جریان آب عبوری قابل چشم‌پوشی باشد.

در ابتدا پس از برقراری بده‌ی پایه در نهر، از بالادست نمونه سد، مخلوط تەنشست‌های چسبنده و غیرچسبنده با نسبت اختلاط وزنی ٪۳۰، تزریق شد. هم‌زمان با شروع تزریق مخلوط تەنشست‌ها، از زمان‌سنج برای اندازه‌گیری مدت زمان تزریق استفاده شد. پس از پایدار شدن محیط متخلخل بدنه‌ی سد از لحاظ تەنشینی، زمان‌سنج متوقف گردید. سپس به منظور برداشت آب‌نگار سیل، شبیه‌سازی سیلاب در نهر صورت گرفت؛ به این صورت که پس از پر شدن مخزن آب تا حدی مشخص و

www.SID.ir

Archive of SID

ثابت شدن بده‌ی پایه در نهر، دریچه‌ی کشویی به طور ناگهانی بالا آورده شد و آب موجود در مخزن به داخل نهر رها گردید. همزمان با ایجاد سیلاب، بده‌ی جریان آب در فواصل زمانی ۵ ثانیه در بالادست و پایین‌دست نمونه سد تا کاهش دوباره مقدار بده و رسیدن به بده‌ی پایه جریان، اندازه‌گیری شد.

در شکل ۲، نمودار دانه‌بندی مخلوط ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده با قطر میانگین ۰/۲ و ۰/۶ میلیمتر نمایش داده شده است. همچنین، در جدول ۱، بیشترین درصد کاهش بده اوج سیلاب و کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب، منتج از آزمایش‌های مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی سد تأخیری پاره‌سنگی ارائه شده است.

بحث و نتایج

همان‌طور که در بخش ساختار نمونه بیان شد، مبنای نمونه‌ی شبیه‌سازی هیدرولیکی، شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه است که به منظور آموزش و اعتبارسنجی این نمونه، از نتایج آزمایشهای انجام‌گرفته برای نمونه‌ی آزمایشگاهی سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده شده است. نمونه‌ی شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه دارای زمان اجرای قابل قبول و همچنین با قابلیت اتصال به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تدوین گردید. به منظور آموزش و صحت‌سنجی نمونه‌ی شبیه‌سازی شده شبکه‌ی عصبی، از نتایج ۳۶ آزمایش برای نمونه‌ی آزمایشگاهی سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده گردید. به ترتیب ٪۷۰ و ٪۳۰ از داده‌های مشاهده شده (به ترتیب ۲۴ و ۱۲ تعداد داده)، به منظور آموزش و صحت‌سنجی نمونه‌ی شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه به کار گرفته شدند.

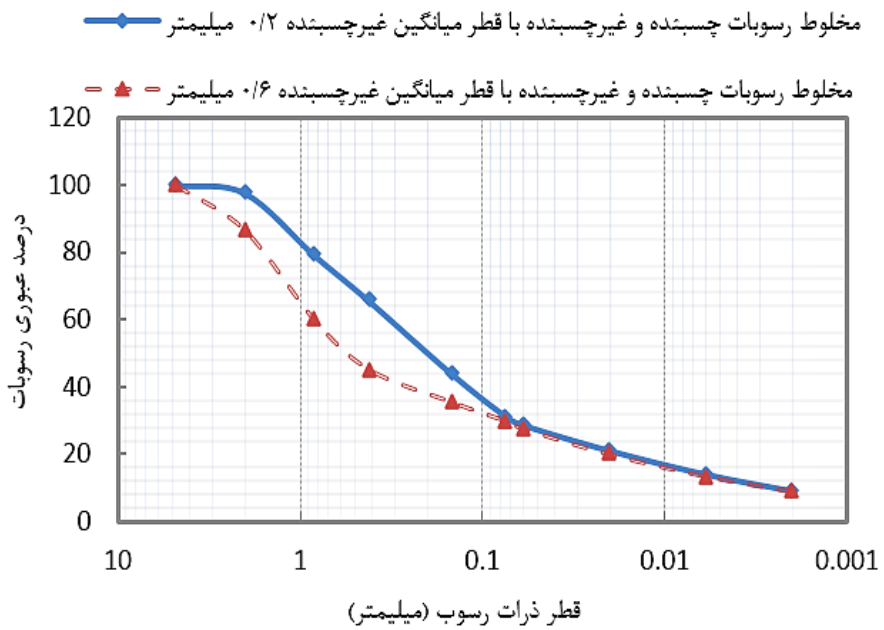
داده‌های ورودی به نمونه‌ی شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی، عبارت از قطر میانگین سنگدانه‌های موجود در محیط متخلخل پاره‌سنگی، ضخامت بدنه‌ی سد پاره‌سنگی، بده‌ی جریان، قطر میانگین و شاخص خمیری ته‌نشست‌های چسبنده موجود در جریان هستند. همچنین، داده‌های خروجی این نمونه نیز، میزان کاهش بده‌ی اوج سیلاب عبوری از بدنه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی و میزان افزایش زمان تداوم آن است.

در شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب، نتایج اعتبارسنجی نمونه‌ی شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌ی عصبی جهت تخمین ضرائب مربوط به تغییرات بده‌ی اوج و زمان تداوم سیلاب عبوری از بدنه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی، ارائه شده اند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، این نمونه در پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی سدهای تأخیری پاره‌سنگی دارای دقت قابل‌قبولی است. در ادامه، جهت تعیین خصوصیات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی، فرانمونه‌ی شبیه‌سازی شبکه عصبی، به نمونه‌ی پیشنهاد شده‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک متصل گردید. نتایج حاصل از روش‌شناسی پیشنهاد شده، نشان می‌دهد که ضخامت بهینه‌ی محاسبه شده مربوط به محیط متخلخل پاره‌سنگی به ازاء جمیع بده‌های سیلاب محتمل، ۱۷/۶ سانتیمتر بوده و قطر متوسط سنگدانه‌های تعبیه شده در بدنه، ۲ سانتیمتر است. همچنین، بیان شد که در سد تأخیری پاره‌سنگی، ضخامتی بهینه است که تا حد امکان، بده‌ی اوج آب‌نگار سیل عبوری از آن، بیشترین مقدار کاهش و زمان تداوم سیلاب، کمترین میزان افزایش را داشته باشد. بنابراین، به ازاء مقادیر بهینه‌ی طراحی، مقدار بده‌ی اوج آب‌نگار سیل عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی ٪۴۷/۱۸ کاهش یافته است و طول مدت سیلاب نیز ٪۳۹/۹۴افزایش داشته است.

در انتها، جهت بررسی اثر تغییر وزن‌های اختصاص‌داده شده به اهداف بهینه‌سازی برای مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم، و نیز برای مقدار جمع وزنی بهنجار شده‌ی اهداف بهینه سازی، نتایج تحلیل حساسیت خروجی نمونه‌ی بهینه‌سازی در ارتباط با دسته‌های وزن‌دهی مختلف، در شکل ۵ ارائه گردیده اند. با توجه به شکل ۵، با کاهش وزن اختصاص‌داده شده به هدف ۱ (کاهش بده‌ی اوج سیلاب) و به طور همزمان با افزایش وزن اختصاص‌داده شده به هدف ۲ (افزایش زمان تداوم سیلاب)، قطر متوسط سنگدانه در حالت بهینه، در ابتدا افزایش یافته و بعد از استفاده از دسته‌ی وزن‌دهی شماره ۳ (در حالتی که وزن‌های اختصاص‌داده شده به هدف ۱ و هدف ۲ برابر بوده اند)، این مقدار ثابت باقی می‌ماند.

www.SID.ir

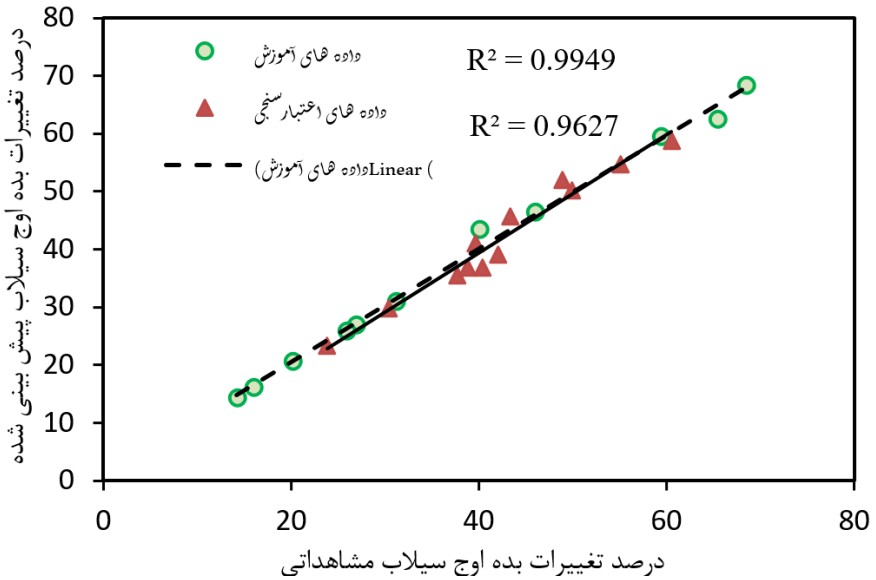
Archive of SID



شکل۲- نمودار دانه‌بندی مخلوط ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده با نسبت اختلاط وزنی ۳۰٪.

جدول ۱- بیشترین درصد کاهش بده‌ی اوج سیلاب و کمترین درصد افزایش زمان تداوم سیلاب حاصل از آزمایش‌های صورت-گرفته بر روی نمونه‌ی آزمایشگاهی سد تأخیری پاره‌سنگی.

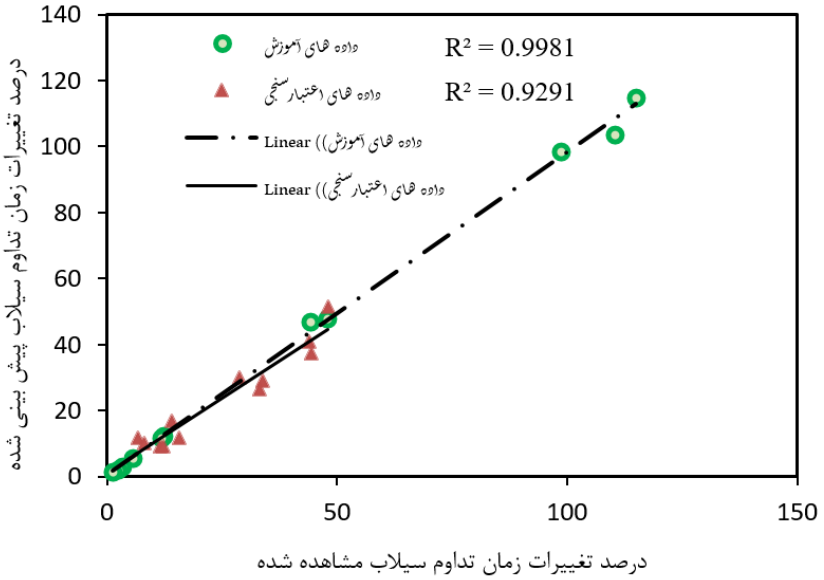
ضخامت بدنه‌ی سد (cm)	قطر میانگین سنگدانه‌های موجود در محیط متخلخل (cm)	قطر میانگین مخلوط ته-نشست‌های جریان (mm)	بده‌ی جریان $[L^3T^{-1}]$	شاخص خمیری ته‌نشست‌های چسبنده- PI	بیشترین کاهش بده‌ی اوج سیلاب عبوری از سد (٪)	کمترین افزایش زمان تداوم سیلاب عبوری از سد (٪)
۱۰	۵	۰/۶	۰/۰۱۸	٦/٤	-	۱/۲
۱۰	۲	۰/۲	۰/۰۱۲	۵/۵	٦٨/٤	-



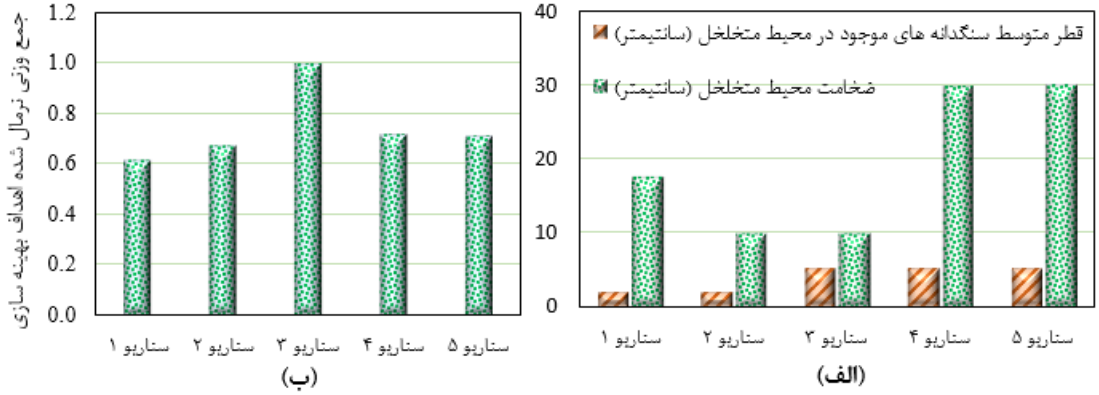
شکل ۳- نتایج اعتبارسنجی فرانمونه‌ی شبکه‌ی عصبی جهت تخمین تغییرات بده‌ی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره-سنگی.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- نتایج اعتبارسنجی فرانمونه‌ی شبکه‌ی عصبی جهت تخمین تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره-سنگی.



سناریوهای وزن دهی اختصاص داده شده به اهداف بهینه‌سازی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
W_1 (وزن اختصاص‌داده شده به کاهش دبی پیک سیلاب)	۰/۸۵	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۱۵
W_2 (وزن اختصاص‌داده شده به افزایش زمان تداوم سیلاب)	۰/۱۵	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۸۵

شکل ٥- نتایج تحلیل حساسیت خروجی نمونه‌ی بهینه‌سازی نسبت به تغییر وزن‌های اختصاص‌داده شده به اهداف بهینه‌سازی: (الف)- مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم، (ب)- مقدار جمع وزنی بهنجارشده‌ی اهداف بهینه‌سازی.

www.SID.ir

Archive of SID

به همین‌ترتیب، ضخامت بهینه‌ی محیط متخلخل پاره‌سنگی تا زمان استفاده از دسته‌ی وزن‌دهی شماره ۳ (در حالتی که وزن‌های اختصاص‌داده شده به هدف ۱ و هدف ۲ برابر بوده‌اند)، کاهش می‌یابد و بعد از آن، این مقدار در بالاترین حالت خود، ثابت باقی می‌ماند. همچنین، در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که با کاهش وزن اختصاص-داده شده به هدف ۱ (کاهش بده‌ی اوج سیلاب) و نیز با افزایش وزن اختصاص داده شده به هدف ۲ (افزایش زمان تداوم سیلاب)، جمع وزنی بهنجار شده‌ی اهداف بهینه-سازی، تا زمان استفاده از دسته‌ی وزن‌دهی شماره ۳ (در حالتی که وزن‌های اختصاص‌داده شده به هدف ۱ و هدف ۲ برابر بوده‌اند) افزایش می‌یابد و از آن پس این مقدار، کاهش یافته، سپس ثابت باقی می‌ماند.

جمع‌بندی نتیجه‌گیری

سدهای تأخیری پاره‌سنگی با کاهش دادن بده‌ی اوج سیلاب عبوری از بدنه‌ی متخلخل خود، و همچنین با افزایش زمان تداوم سیلاب، خطرات سیلاب را در پایین-دست کاهش می‌دهند. به‌منظور طراحی رضایت‌بخش سدهای تأخیری پاره‌سنگی، می‌بایست وضعیت عبور ته-نشست از بدنه و ضخامت بهینه‌ی ابعاد آنها مشخص باشد. در این پژوهش، یک نمونه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به-منظور تعیین مشخصات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی تدوین گردید. سپس در راستای پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی سدهای تأخیری پاره‌سنگی از فرانمونه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه با قابلیت اتصال به نمونه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شد. در واقع، نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده از نمونه‌ی آزمایشگاهی سد تأخیری پاره‌سنگی، تحت آموزش و اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس با اتصال فرانمونه‌ی شبکه‌ی عصبی به نمونه-ی بهینه‌سازی الگوریتم

ژنتیک، خصوصیات بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی حاصل گردید. نتایج نشان می‌دهند که روش‌شناسی پیشنهاد شده، می‌تواند به طور مؤثری در تعیین ابعاد بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی با وجود مخلوط ته‌نشست-های چسبنده و غیرچسبنده در جریان، استفاده شود. شایان توجه است که در روش‌شناسی پیشنهادشده شبیه-سازی-بهینه‌سازی خصوصیات سد تأخیری پاره‌سنگی، به اهداف بهینه‌سازی (کاهش بده‌ی اوج سیلاب و افزایش زمان تداوم آن)، طبق نظر کارشناسان و با توجه به اهمیت هدف، وزن‌هایی اختصاص داده شده است، و سپس جمع وزنی اهداف بهینه‌سازی در نمونه‌ی بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده شده است. این امر منجر به تأثیر توأمان اهداف وزن‌دهی شده در نتایج بهینه‌ی حاصل از نمونه‌ی شبیه-سازی-بهینه‌سازی می‌گردد. از اینرو استفاده از نمونه‌ی تک‌هدفه شبیه‌سازی-بهینه‌سازی جهت انتخاب مقادیر طراحی بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی، دقت قابل قبولی را در پی داشته است.

در راستای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود که ته‌نشست‌های چسبنده و غیرچسبنده با نسبتهای اختلاط متفاوت در جریان استفاده شوند تا حساسیت ابعاد بهینه‌ی سد تأخیری پاره‌سنگی نسبت به تغییرات مقدار ته‌نشست‌های چسبنده در جریان سنجیده شود. همچنین، در پژوهش‌های آینده می‌توان عدم قطعیت‌های موجود را، در طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی طی یک بهینه‌سازی چندهدفه و به منظور تعیین ابعاد بهینه‌ی سد، بررسی کرد.

منابع

1) Barton, J.M.h. and Buchberger, S.G. 2007. Effect of Media Grain Shape on Particle Straining During Filtration. Journal of Environmental Engineering. ASCE. 2:211-219.

2) Ding, Y. and Wang, S.S.Y. 2012. Optimal Control of Flood Diversion in Watershed Using Nonlinear Optimization. Advances in Water Resources. 44:30-48.

3) Dudgeon, C.R. 1967. Flow of Water Through Coarse Granular Materials. University of New South Wales Water Research Laboratory Report. No. 76.

4) Forchheimer P.H. 1901. Wasserbewegun durch boden, zeitschrift des vereins deutscher ingenieure. 49:1736-1749 and 50:1781-1788.

5) Franca M.J. and Almeida A.B. 2004. A Computational Model of Rockfill Dam Breaching Caused by Overtopping (RoDaB). Journal of Hydraulic Research. 2:197-206.

6) Khorramshokouh, N. 2013. Optimal Thickness and Transmission Capacity of Cohesive and Non-Cohesive Sediment in

www.SID.ir

Archive of SID

Detention Rockfill Dam. School of Agriculture, Shiraz University (In Persian).
7) Leps, T.M. 1973. Flow Through Rockfill Embankment Dam Engineering Casagrande. Edited bschfeld, R.C. and Poulos, S.J. John Wiley & Sons. PP. 87-107.
8) Nikoo, M.R. and Khorramshokouh, N. 2017. Multi-Objective Optimization of Detention Rockfill Dam Characteristics Considering Hydraulic Conditions and Application of Borda Count Social Choice and Nash- Harsanyi Bargaining Models. Water and Soil Knowledge. 26(2): 13-25 (In Persian).
9) Nikoo, M.R., Khorramshokouh, N. and Monghasemi, S. 2015. Optimal Design of Detention Rockfill Dams Using a Simulation-based Optimization Approach With Mixed Sediment In The Flow. Water Resources Management, 29(15): 5469-5488.
10) Park, C.H., Joo, J.G. and kim, J.H. 2012. Integrated Washland Optimization Model for Flood Mitigation Using Multi-Objective Genetic Algorithm. Journal of Hydro-Environment Research. 6:119-126.
11) Samani, J. M.V., Samani, H.M.V. and Shaiannejad, M. 2004. Reservoir Routing With Outflow Through Rockfill Dams. IAHR Journal of Hydraulic Research. 42:435-439.
12) Scheidegger, A.E. 1974. The Physics of Flow Through Porous Media (3rd edn). University of Toronto Press. PP. 152-170.
13) 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.
14) Yazdi, J. and Salehi Neyshabouri, S.A.A. 2014. Identifying Low Impact Development Strategies for Flood Mitigation Using A Fuzzy-Probabilistic Approach. Environmental Modeling & Software. 60:31-44.
15) Zomorodian, S.M.A. and Zahed, M. 2007. Optimization of Rockfill Dam Thickness Using Monte Carlo method. International River Engineering Conference. Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (In Persian)

www.SID.ir