

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیک جریان درونگذری در سدهای پاره‌سنگی و روش سنجی آن با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

صادق فرشیدنیا^۱، بهادر فاتحی نویریان^{۲*}، مجتبی صانعی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

چکیده

یکی از راه‌های کنترل سیلاب در مسیل‌ها، ساخت سدهای پاره‌سنگی بدون هسته رسی در مسیر جریان می‌باشد. این سدها، دبی اوج سیلاب عبوری را کاهش داده و زمان تخلیه سیلاب را افزایش می‌دهند. در تحقیق حاضر در فلوم آزمایشگاهی، مدل‌هایی از سد پاره‌سنگی با سنگ‌دانه به قطر متوسط ۲ سانتی‌متر با طول‌های ۱۵۵، ۱۶۵ و ۱۷۵ سانتی‌متر در جهت جریان، با شیب‌های مختلف ساخته شد و برای هر مدل، ۳ دبی مختلف جریان در نظر گرفته شد که در هر دبی، عمق پایاب با استفاده از دریچه کنترل، برای ۵ حالت متفاوت، تغییر داده شد و در مجموع ۴۰۵ آزمایش انجام شده است. پس از انجام آنالیز ابعادی، کمیت‌های بی‌بعد استخراج گردیده و سپس با اعمال رگرسیون غیرخطی چند متغیره که تابع هدف مرتبط با ضریب دبی و کمیت‌های بی‌بعد را نشان می‌دهد استخراج شده است. با انجام آنالیز حساسیت نسبت به حذف کمیت‌های بی‌بعد، مشخص شد با حذف کمیت H_u (ارتفاع سد به عمق آب در بالادست) میانگین مطلق خطای نسبی، ۲/۵ درصد افزایش یافت درحالی‌که با حذف کمیت S_d (شیب وجه پایاب سد) میانگین مطلق خطای نسبی، ۸/۶ درصد افزایش یافت و به‌منظور تعیین مشخصات بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی، برای حداکثر ضریب دبی در نظر گرفته‌شده، مقادیر بهینه استخراج گردید و پارامتر HMCR در همگرایی پاسخ، بسیار تأثیرگذار بوده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی، جریان درون‌گذری، سد پاره‌سنگی

مقدمه

کافی، ساختمان ساده، ارزانی مصالح، کاهش دبی حداکثر و افزایش زمان تداوم سیلاب اشاره کرد. کنترل سیلاب با استفاده از سدهای تأخیری پاره‌سنگی مستلزم طراحی صحیح هیدرولیکی آن‌هاست و خود این طراحی هم نیازمند شناخت اصول حاکم بر جریان درون محیط درشت‌دانه این سدهاست (روش‌فکر، ۱۳۸۹).

کلز مطالعه‌ای در زمینه جریان عبوری از روی و درون سد سنگریزه‌ای با نمای قائم نفوذپذیر در بالادست و نمای قائم و پلکانی پایین‌دست انجام داد، وی از مدل SEEP/W در زمینه تراوش در محیط ریزدانه استفاده کرد و برای آنالیز جریان در محیط درشت‌دانه در آن تغییراتی انجام داد در این تحقیق جریان عبوری به‌طور کامل از روی تاج عبور می‌کرد، جریان عبوری از روی تاج سد به‌صورت جریان متغیر مکانی است نتایج نشان داد که در حالات فوق نیز جریان عبوری از سد، غیر داری است (Kells, 1995). هررا و فلتون، با استفاده از گرادیان هیدرولیکی و اختلاف رقوم سطح آب بالادست و پایین‌دست سد، رابطه‌ای غیرخطی برای دبی جریان عبوری از سد

امروزه خطر وقوع سیلاب می‌تواند تهدید جدی برای اماکن و تأسیسات حاشیه رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت‌ها باشد. روش‌های مختلفی برای کنترل و مهار سیلاب وجود دارد که یکی از این روش‌ها استفاده از سدهای تأخیری پاره‌سنگی می‌باشد. سدهای پاره‌سنگی به سدهایی گفته می‌شود که پیکره اصلی آن‌ها از سنگ انباشته‌شده روی هم و یا در لایه‌های متراکم شده تشکیل شده باشد. از خصوصیات بارز آن‌ها می‌توان به تخلخل و نفوذپذیری زیاد، انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت

- ۱- دکترای مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، عضو پیوسته کمیته ملی سدهای بزرگ ایران
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران
- ۳- دانشیار سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

(* - نویسنده مسئول: Email: b.fatehinobarian@iaut.ac.ir)

پاره‌سنگی ارائه نمودند که با افزایش گرادیان هیدرولیکی مقدار دبی عبوری افزایش می‌یابد (Herrera and felton, 1998). سامانی و همکاران، نمونه‌ای برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان درون سدهای سنگریزه‌ای ارائه دادند و به بررسی حساسیت نمونه بر تغییرات داده‌های سطح آب در بالادست سد با تغییر قطر متوسط سنگ‌دانه‌های بدنه پرداختند (Samani et al., 2004). قاضی مرادی (۱۳۸۵) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر انحراف معیار و اندازه مصالح بدنه سد بر جریان هم‌زمان درون و روگذر غیرمستغرق پرداخت و نتایج نشان داد که با افزایش انحراف معیار مصالح بدنه سد، نسبت دبی روگذر به دبی کل افزایش می‌یابد. ریاحی مدوار (۱۳۸۵)، به بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر دبی درون‌گذر و روگذر در سدهای پاره‌سنگی پرداخت و نتایج نشان داد که شدت جریان هم‌زمان عبوری از سازه با نسبت ارتفاع سد به بار آبی بالادست، نسبت اندازه مصالح به ارتفاع سد و نسبت استغراق، رابطه مستقیم دارد.

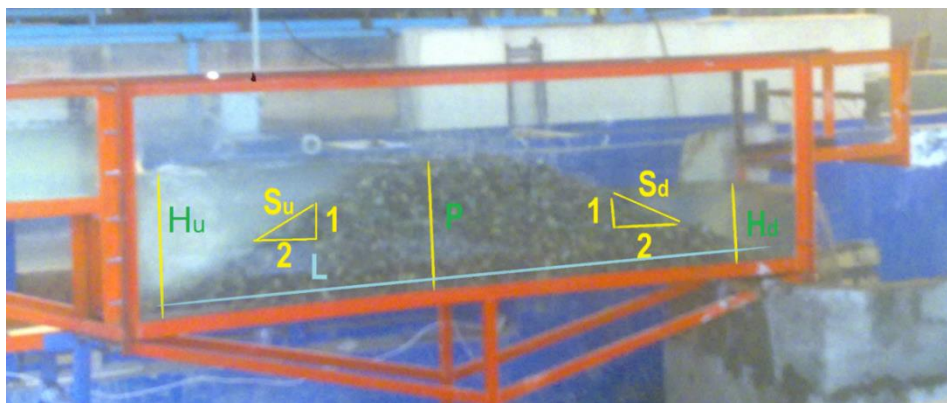
نیکو و همکاران، ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی را با استفاده از نمونه‌ی بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک و با به‌کارگیری نمونه‌های تصمیم‌گیری و چانه‌زنی ارائه نمودند (Nikoo et al., 2015). علی یآوری و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی کاربرد سد پاره‌سنگی در نرم‌افزار HEC-RAS به منظور کنترل سیل پرداختند در این مدل از نتایج رابطه یک‌بعدی دبی - اشل در سدهای پاره‌سنگی، استفاده شد و نتایج نشان داد که حضور سد پاره‌سنگی را می‌توان مشابه حضور سازه‌ای مانند یک‌بند در نظر گرفت که در کنترل سیلاب مؤثر است. استاد علی اشکاری و شایان نژاد (Ostad-Ali-Askari, 2015). K., Shayannejad, 2015). با استفاده از مدل آزمایشگاهی و به‌کارگیری رابطه کسری بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز (f-Re) و معادله یک‌بعدی دبی - اشل سدهای پاره‌سنگی، به بررسی هیدرولیک جریان درون‌گذر سد پاره‌سنگی دولایه پرداختند، ایشان اثر لایه‌ها به‌صورت ضخامت آن‌ها و نیز قطر مصالح بکار رفته را در نظر گرفتند، نتایج نشان داد که لایه‌بندی مصالح، اثرات مطلوب‌تری در کاهش تراوش دارد. خرم شکوه و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی تعیین مشخصات بهینه سدهای پاره‌سنگی در شرایط سیلابی پرداختند که نتایج نشان داد دبی اوج هیدروگراف سیل عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی ۴۷/۱۸ درصد کاهش یافته است و طول مدت سیلاب نیز در شرایط بهینه ۳۹/۹۴ درصد افزایش داشته است. حیدری و همکاران (۱۳۹۹)، به بررسی هیدرولیک جریان ماندگار درون‌گذر در سد پاره‌سنگی قوسی شکل پرداختند که نتایج نشان داد ضخامت قوس و قطر مصالح، مهم‌ترین و بیشترین تأثیر را در ذخیره آب و افزایش پروفیل سطح آب دارد. حسنون و سامانی به بررسی ضریب آگذری معادل سد همگن برای سد ناهمگن پرداختند که نتایج نشان داد می‌توان سد را به‌صورت همگن در نظر گرفت و با استفاده از ضرایب، محاسبات را ساده‌تر انجام داد (Hassanvand and Samani,

2019). حسنون و همکاران (۱۴۰۰)، به بررسی مدل عددی دوبعدی برای بررسی جریان عبوری از درون سد پاره‌سنگی دولایه پرداختند که با انجام بررسی‌ها مشخص شد چیدمان افقی لایه‌ها که در آن لایه ریزتر در پایین قرار دارد نسبت به سایر حالت‌ها، کمترین مقدار دبی عبوری را دارد. رحیمی نژاد و همکاران (۱۴۰۰)، با مطالعه بر روی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD)^۱ از طریق شکاف‌هایی مختلف بر روی رویه بتنی سد در مدل آزمایشگاهی رفتار نفوذ آب درون بدنه سد را بررسی نمودند که هدف ایشان محاسبه ضریب دبی شیار مستطیلی واقع در رویه بتنی بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی در هر دو حالت شرایط مستغرق و آزاد می‌باشد نتایج نشان داد که تطابق قابل قبولی بین دبی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از معادله پیش‌بینی‌شده وجود دارد. حیدری و خداکریمیان به‌منظور اصلاح معادله تئوری یک‌بعدی دبی - اشل در سدهای پاره‌سنگی دو معادله اصلاحی ارائه نمودند که نتایج نشان داد معادله به‌دست‌آمده از آنالیز ابعادی، همخوانی بیشتری نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده دارد (Heydari and Khodakaramian, 2022). در زمینه الگوریتم جستجوی هارمونی در مسائل مختلف مطالعاتی انجام شده است. آیواز و تامر الگوریتم جستجوی هارمونی را برای بهینه‌سازی مسئله مدیریت آب‌های زیرزمینی به کار برد و نتایج نشان داد که الگوریتم به کار گرفته‌شده نتایج یکسان یا بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است (Ayvaz, 2010). فاتحی نوبریان در مدل‌سازی آزمایشگاهی سلول‌های جریان ثانویه در پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای و تأثیر آن بر مشخصات پرش، از الگوریتم جستجوی هارمونی در بررسی استهلاک انرژی پرش، استفاده نمود که نتایج نشان داد این روش فرا کاوشی در بحث بهینه‌سازی سیستم‌های هیدرولیکی عملکرد قابل‌توجهی دارد (Fatehi-Nobarian et al., 2019). شکوهی مهر و همکاران (۱۴۰۰) از الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف حداقل سازی حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه استفاده نمودند که نتایج نشان داد بهره‌برداری بهینه هماهنگ از حوضچه‌ها باعث بهبود سطح عملکرد حوضچه‌ها در مقایسه با روش فعلی بهره‌برداری، شده است به‌طوری‌که متوسط حدود ۶۲ درصد سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه زهکشی را کاهش می‌دهد. به دلیل روند رو به رشد ساخت سدهای پاره‌سنگی، لازم است که پژوهش‌هایی جهت تعیین مشخصات بهینه این سدها از نظر هیدرولیک جریان درون سد به‌طور جدی صورت پذیرد؛ که طراحی این سازه با مشخصات بهینه نتیجه‌بخش خواهد بود و اهداف ایجاد سد تأخیری پاره‌سنگی محقق می‌گردد. هدف از انجام این تحقیق، ارائه روابط ریاضی غیرخطی با استفاده از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مستخرج شده از آزمایشگاه است و سپس، حداکثر شدن

H_u عمق آب در بالادست سد، H_d عمق آب در پایین‌دست سد و ΔX تصویر افقی درون‌گذری در بدنه سد در نظر گرفته شد؛ که در آن اندازه متوسط مصالح بدنه سد یکنواخت 2cm و شیب وجه بدنه سد در بالادست ۱:۲ اختیار گردید. در این تحقیق از طول پایه سد در جهت جریان 155cm، 165cm، 175cm و ارتفاع سد 20cm، 25cm، 30cm و شیب وجه بدنه سد در پایین‌دست ۱:۲، ۱:۳/۵، ۱:۳؛ و ۱ و دبی جریان در محدوده $0.3 \frac{lit}{s}$ تا $2 \frac{lit}{s}$ در سه دبی مختلف برای هر سازه‌ی مورد آزمایش به‌گونه‌ای که باعث روگذری نشود، انتخاب شد و برای هر دبی، عمق آب پایین‌دست با استفاده از دریچه کنترل انتهایی برای ۵ عمق مختلف، تغییر داده شد. پارامترهای فوق با استفاده از روش پی باکینگهام، بی‌بعد گردید و رابطه (۱) ارائه شد. در این رابطه C_d ضریب دبی در سد پاره‌سنگی است.

$$C_d = \frac{Q}{H_u^2 \sqrt{gH_u}} = f\left(\frac{\Delta H}{H_u}, \frac{\Delta X}{H_u}, \frac{d}{H_u}, S_d, \frac{P}{H_u}\right) \quad (1)$$

که پارامترهای آن در ابتدای این بخش توضیح داده شده است. با توجه به اینکه شیب‌های وجوه سد، استاندارد و اجرایی (۳۰ تا ۴۰ درجه برای مصالح درشت‌دانه) انتخاب شده است لذا از هیچ‌گونه توری نگه‌دارنده استفاده نشده است که جزییات ابعادی آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- سد پاره‌سنگی ساخته‌شده در فلوم آزمایشگاهی و پارامترهای مربوطه

روش بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی

گیم و همکاران الگوریتم جدیدی به نام جستجوی هارمونی، بر مبنای پدیده مصنوعی هارمونی موسیقی ابداع کردند. همان‌طور که موسیقیدان در جستجوی یافتن حالتی است که بهترین ریتم و گوش‌نوازی را داشته باشد، الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جستجوی بهترین حالت از نظر کاهش هزینه یا افزایش سود می‌باشند (Geem et al., 2001).

میزان ضریب آبگذری ایمن به‌عنوان هدف بهینه‌سازی در سد پاره‌سنگی، با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پارامترهایی که در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده است پارامترهای هندسی و هیدرولیکی می‌باشند، به طوری که با تغییر هر کدام از پارامترها تأثیر آن بر ضریب آبگذری مشخص می‌گردد و همچنین با تغییر هر کدام از پارامترها تأثیر آن بر ضریب آبگذری مشخص می‌شود. در این تحقیق طول سد در راستای جریان، ارتفاع سد و شیب بدنه پایین‌دست سد متغیر در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمایش‌ها از فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول 8m، عرض 0.30m و ارتفاع 0.60m واقع در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده شد، کنترل دبی ورودی به فلوم، توسط یک شیر تنظیمی بعد از پمپ انجام شده و از دریچه انتهایی فلوم برای کنترل سطح پایاب استفاده گردید و دبی جریان بعد از ورود به حوضچه آرامش، توسط سرریز مثلی اندازه‌گیری شد. پارامترهای مؤثر بر رفتار جریان درون‌گذر در سدهای پاره‌سنگی، Q دبی جریان، P ارتفاع سد، L طول پایه سد در جهت جریان، S_u شیب وجه بدنه سد در بالادست، S_d شیب وجه بدنه سد در پایین‌دست، d اندازه متوسط مصالح بدنه سد، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب ثقل، ΔH اختلاف عمق آب در بالادست و پایین‌دست سد،

تمامی فرضیات انجام‌شده در این پژوهش با ثابت بودن، عرض فلوم، شیب بدنه سد در بالادست، تخلخل مصالح بدنه سد، جرم مخصوص مصالح بدنه و همچنین جرم مخصوص سیال (آب)، لزجت دینامیک سیال، زبری فلوم، شیب جداره فلوم و شیب کف فلوم، بوده است که بر اساس پاسخ‌های الگوریتم بهینه‌سازی هیچ تغییری در آن‌ها رخ نمی‌دهد و همچنین تأثیری در نتایج دامنه پاسخ‌های الگوریتم از خود نشان نمی‌دهند.

فرایند بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در پنج گام خلاصه می‌شود:

گام اول: معرفی مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم

ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت فرمول زیر مشخص می‌شود:

$$\text{Maximize}[f(x)], x_i \in X_i, i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

که در رابطه بالا $f(x)$ تابع هدف، x_i متغیرهای تصمیم می‌باشند. در مدل بهینه‌سازی، محدوده مجاز برای متغیر تصمیم به صورت $x'_i \min < x'_i < x'_i \max$ که $x'_i \min$ و $x'_i \max$ به ترتیب محدوده پایین و بالای هر متغیر تصمیم است. در این گام یک سری پارامترهای مخصوص الگوریتم جستجوی هارمونی از جمله، اندازه حافظه هارمونی (HMS)، سرعت بررسی حافظه هارمونی (HMCR)، سرعت تنظیم قطعات (PAR) و ماکزیمم تعداد تکرارها (NI) یا شرط توقف وارد می‌شود.

گام دوم: تولید حافظه هارمونی اولیه به صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیر تصمیم

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F(x^1) \\ \vdots \\ F(x^{HMS-1}) \\ F(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که $F(x^1)$ مقدار تابع هدف به دست آمده به ازای بردار اول و HM ماتریس حافظه هارمونی است. (Geem et al. 2001)

گام سوم: تولید یک راه حل یا هارمونی جدید

برای ایجاد مقدار برای متغیر i ام، ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود، این عدد تصادفی با HMCR (نرخ احتمال انتخاب از حافظه هارمونی) مقایسه می‌شود و اگر کوچک‌تر از آن باشد، یک مقدار برای متغیر i ام، از ماتریس حافظه و از ستون i ام انتخاب می‌شود و در غیر این صورت یک مقدار تصادفی از فضای جستجو برای متغیر i ام انتخاب می‌شود. در صورتی که از ماتریس حافظه یک مقدار انتخاب شد، سپس عدد تصادفی دیگری تولید می‌شود و با PAR^۲ (احتمال تنظیم گام)، مقایسه می‌شود، در صورتی که عدد تصادفی کوچک‌تر از PAR باشد، این متغیر انتخاب شده از ماتریس حافظه به مقدار کوچکی با توجه به رابطه (۴) تغییر پیدا می‌کند. برای تعیین مقدار تغییر بر روی متغیر انتخاب شده از حافظه ماتریس، پارامتر دیگری به نام bw^۳ (مقدار پهنای باند) تعریف می‌شود که با توجه به رابطه زیر، مقدار متغیر جدید به دست می‌آید:

$$X_{new} = X_{old} + bw \times \varepsilon \quad (4)$$

در این رابطه، X_{old} به عنوان مقدار متغیر ذخیره شده در حافظه هارمونی است و X_{new} به عنوان مقدار متغیر جدید بعد از عملیات

تنظیمی و تغییری ظاهر می‌شود. در واقع ε همان عدد تصادفی از یک توزیع یکنواخت در $[-1,1]$ می‌باشد. به بیان شفاف‌تر می‌توان این تنظیم گام را به نوعی، شبیه به عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک دانست.

گام چهارم: جدید کردن حافظه هارمونی

اگر هارمونی جدید بهتر از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی باشد، جایگزین آن در حافظه می‌شود؛ و هارمونی بدتر، از حافظه خارج می‌شود. در غیر این صورت بدون هیچ جایگزینی، الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود. (میربیک سبزواری و همکاران ۱۳۹۸).

گام پنجم: بررسی معیار توقف

گام سوم و چهارم تا جایی تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی، بررسی تعداد تکرار است. البته می‌توان شرط پایان یافتن الگوریتم را بر مقدار بهینه مشخصی تنظیم کرد و تا یافتن آن مقدار، مراحل الگوریتم را تکرار کرد. به این ترتیب آخرین بردار به دست آمده در الگوریتم، جواب مسئله است (رستمی و همکاران، ۱۳۸۹).

در نمودار شکل (۲) فلوچارت مراحل اول تا پنجم نمایش داده شده است.

هر چه اندازه حافظه هارمونی بزرگ‌تر باشد مسئله از نظر ابعادی بزرگ می‌شود بنابراین بیشتر سعی می‌کنند این پارامتر کوچک‌تر انتخاب شود. (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷). در تحقیق حاضر، برای بررسی نحوه عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی، یک مسئله واقعی تک هدفی ضریب آبدگری در سد پاره‌سنگی مورد بررسی قرار گرفت. این مسئله از جمله مسائل بهینه‌سازی مقید می‌باشد که به منظور تعریف مسئله، لازم است که تابع هدف و قیود مسئله تعریف شوند. تابع هدف در مسئله، ضریب درون‌گذری آب در سد پاره‌سنگی به صورت ماکسیمم در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی به کار گرفته شده در این تحقیق مطابق جدول (۱) می‌باشد.

که در آن Max-It حداکثر تعداد تکرار، n_{New} تعداد هارمونی‌های جدیدی که ایجاد می‌شوند، می‌باشد. در مطالعه حاضر، با توجه به توابع هدف، پارامترهای $[H_u], [\Delta H], [\Delta X], [S_d], [P]$ به عنوان متغیرهای مستقل استفاده می‌شوند که قیدهای به کارگیری آن‌ها در الگوریتم جستجوی هارمونی به قرار جدول (۲) می‌باشد که در آن دامنه تغییرات با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محدود شده است.

نتایج و بحث

تغییرات ضریب دبی (C_d) با پارامترهای بی‌بعد به صورت منفرد

- 1- Harmony memory consideration rate
- 2- Pitch Adjusting Rate
- 3- Bandwidth

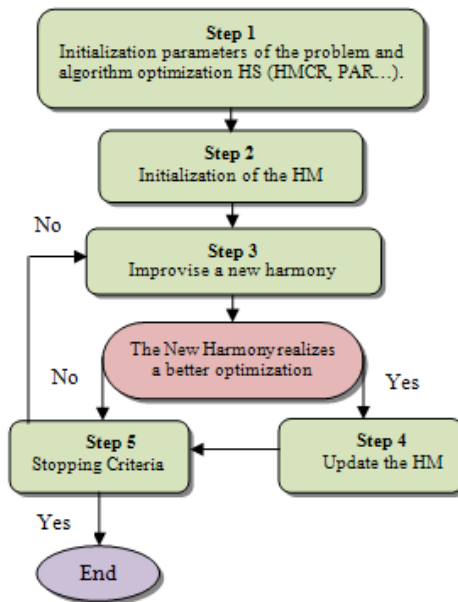
دبی با $\frac{\Delta H}{H_u}$ ، در شیب‌های پایاب بدنه سد مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شیب وجه پایاب بدنه سد، ضریب دبی کاهش می‌یابد و با افزایش $\frac{\Delta H}{H_u}$ ، مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد. در نمودار C، رابطه ضریب دبی با نسبت قطر سنگ‌دانه‌ها به ارتفاع آب در بالادست سد ($\frac{d}{H_u}$)، در طول‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{d}{H_u}$ ، مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد و تقعر نمودار به سمت بالا است. در نمودار D، تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت تصویر افقی پروفیل جریان درون سد به عمق آب در بالادست در طول‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{\Delta H}{H_u}$ ، مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد.

پس از آنالیز ابعادی، میزان ضریب دبی مشاهداتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_d = \frac{Q}{H_u^2 \sqrt{gH_u}} \quad (5)$$

که رابطه‌ی تغییرات C_d مشاهداتی با پارامترهای بی‌بعد در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این قسمت به توضیح شکل ۳ پرداخته می‌شود، در نمودار A، رابطه ضریب دبی با نسبت اختلاف اعماق سراب و پایاب به عمق سراب ($\frac{\Delta H}{H_u}$)، در طول‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{\Delta H}{H_u}$ ، مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد و با افزایش طول سد پاره‌سنگی، مقدار C_d ، کاهش می‌یابد. در نمودار B، رابطه ضریب



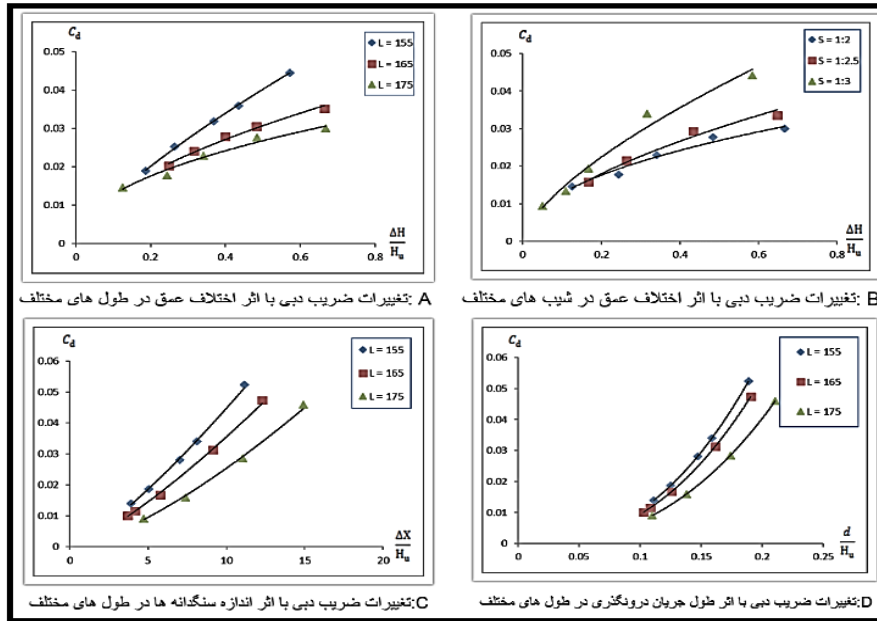
شکل ۲- فلوجارت پایه جستجوی هارمونی (Geem et al., 2001)

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی به کار گرفته شده در تحقیق حاضر

پارامتر	Max-It	HMS	nNew	HMCR	PAR
مقدار	۵۰۰۰	۱۰	۱۰	۰/۹-۰/۵-۰/۲۵-۰/۱	۰/۸

جدول ۲- قیدهای به کار گرفته شده متغیرهای مستقل در تحقیق حاضر

پارامتر	$[H_u]$	$[\Delta H]$	$[\Delta X]$	$[S_d]$	$[P]$
دامنه	$۸/۳ \leq H_u \leq ۳۰$	$۰/۷ \leq \Delta H \leq ۱۷/۲$	$۳۳/۵ \leq \Delta X \leq ۱۴۸/۵$	$۰/۳۳ \leq S_d \leq ۰/۵$	$۲۰ \leq P \leq ۳۰$



شکل ۳- تغییرات ضریب دبی با پارامترهای بی بعد

مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. هر دو رابطه ضریب تبیین و میانگین مطلق خطای نسبی در رابطه‌ی شماره ۷ نشان داده شده است:

$$MARE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{C_{dcal} - C_{dobs}}{C_{dobs}} \right| \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

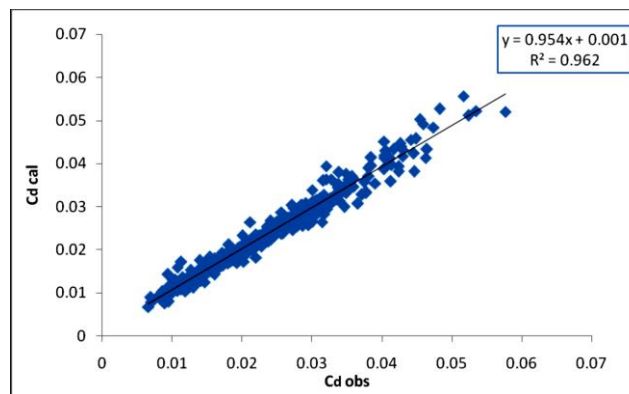
که در آن C_{dobs} ضریب دبی مشاهده‌ای، C_{dcal} ضریب دبی محاسباتی و N تعداد داده‌ها می‌باشد. $MARE$ می‌تواند بین صفر و یک باشد اما هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد یعنی رابطه استخراج شده صحت و اعتبار بیشتری دارد. شکل (۴) نشان می‌دهد که میزان همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهده‌ای برای معادله منتج از آنالیز ابعادی (رابطه ۶) از پراکنندگی کمتری برخوردار است.

رابطه کلی ضریب دبی جریان درون گذری

پس از انجام آزمایش‌ها و بی‌بعد کردن پارامترها، ضریب دبی برحسب پارامترهای بی‌بعد، برازش داده شد و رابطه‌ی غیرخطی (۶) استخراج گردید.

$$C_d = 57.59 \left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]^{0.53} \left[\frac{\Delta X}{H_u} \right]^{-0.97} \left[\frac{d}{H_u} \right]^{2.46} [S_d]^{0.13} \left[\frac{P}{H_u} \right]^{-0.10} \quad (6)$$

که در این رابطه، ضریب تبیین $R^2 = 0.96$ و میانگین مطلق خطای نسبی $MARE = 0.0603$ می‌باشد؛ و مشخصات آماری و مقایسه‌ای رابطه (۶) با داده‌های مشاهده‌ای استخراج شده از رابطه (۵)، در شکل (۴) ارائه شده است. پارامترهای ضریب تبیین (R^2) و میانگین مطلق خطای نسبی ($MARE$) جز پارامترهای آماری بوده، به طوری که هر چه ضریب تبیین به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد و میانگین مطلق خطای نسبی به عدد صفر میل کند اعتبار رابطه افزایش پیدا می‌کند، دلیل اصلی انتخاب این پارامترها ارزیابی مقادیر محاسباتی با



شکل ۴- مقایسه ضریب دبی مشاهده‌ای و محاسباتی با استفاده از رابطه (۶)

جدول ۳- روابط برازش داده‌شده حاصل از حذف پارامترهای بی‌بعد

ردیف	رابطه برازش داده‌شده	R^2	MARE
۱	$C_d = 42.09 \left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]^{-0.53} \left[\frac{\Delta X}{H_u} \right]^{-0.96} \left[\frac{d}{H_u} \right]^{2.35} [S_d]^{0.12}$	۰/۹۶	۰/۰۶۲۰
۲	$C_d = 25.67 \left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]^{0.52} \left[\frac{\Delta X}{H_u} \right]^{-0.88} \left[\frac{d}{H_u} \right]^{2.24}$	۰/۹۶	۰/۰۶۵۵
۳	$C_d = 0.015 \left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]^{0.328} \left[\frac{\Delta X}{H_u} \right]^{0.486}$	۰/۸	۰/۱۴۴۵
۴	$C_d = 0.26 \left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]^{0.38} \left[\frac{d}{H_u} \right]^{0.89}$	۰/۹	۰/۱۰۳۰
۵	$C_d = 0.022 \left[\frac{\Delta X}{H_u} \right]^{-0.484} \left[\frac{d}{H_u} \right]^{0.347}$	۰/۵۵	۰/۲۶۵۱

آنالیز حساسیت مدل

پس از آنالیز ابعادی و استخراج رابطه کلی ضریب آبگذری سد پاره‌سنگی لازم بود که آنالیز حساسیت مدل انجام شود در این راستا ابتدا یکی از پارامترهای بی‌بعد حذف گردید و رابطه غیرخطی جدید ارائه شد که تأثیر حذف پارامتر را در تغییرات ضریب تبیین و میانگین مطلق خطای نسبی لحاظ گردید. به طوری که با حذف برخی از پارامترهای بی‌بعد میزان ضریب تبیین به‌شدت کاهش و میانگین مطلق خطای نسبی افزایش یافت، با حذف کمیت‌های بی‌بعد و استفاده از سایر کمیت‌های بی‌بعد موجود، روابط جدیدی برازش داده می‌شود که در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که حذف پارامترهای $\left[\frac{P}{H_u} \right]$ و $[S_d]$ ، تغییر قابل توجهی در مقدار R^2 و MARE ندارد و رابطه ۶ نسبت به

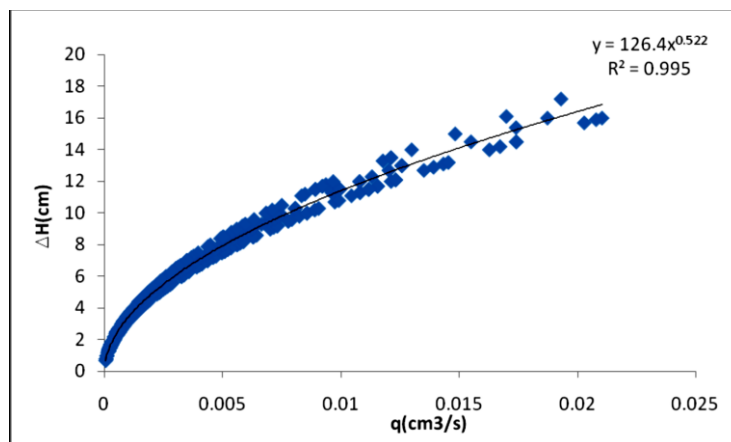
حذف این پارامترها حساسیت زیادی ندارد؛ اما حذف پارامتر $\left[\frac{\Delta H}{H_u} \right]$ به‌شدت مقدار R^2 را کاهش و مقدار MARE را افزایش می‌دهد، یعنی رابطه نسبت به حذف این پارامتر حساسیت زیادی دارد.

صحت‌سنجی داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روابط هررا - فلتون و هنسن

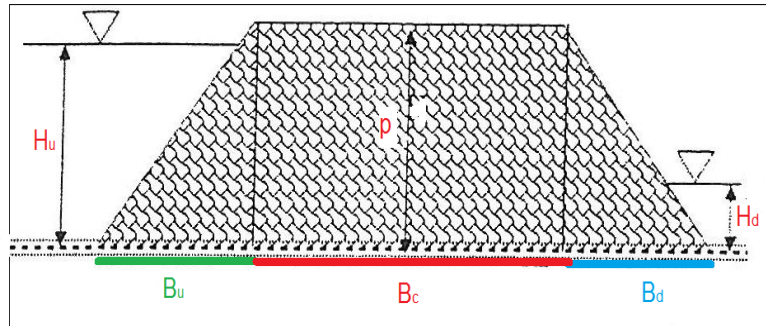
هررا و فلتون (Herrera and felton, 1998)، برای دبی جریان رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$q = (1.72 + 0.772\Delta H)(0.78i^{1.86}) \quad (۸)$$

که در آن q دبی جریان، i گرادیان هیدرولیکی و ΔH اختلاف رقوم سطح آب دو طرف سازه می‌باشد. داده‌های آزمایش حاضر را در رابطه فوق قرار می‌دهیم و نمودار شکل (۵) استخراج می‌شود که نشان می‌دهد با افزایش مقدار ΔH ، مقدار دبی افزایش می‌یابد.



شکل ۵- رابطه بین دبی و اختلاف سطح آب در بالادست و پایین‌دست با استفاده از رابطه هررا - فلتون



شکل ۶ - پارامترهای مشخص شده در رابطه گیلیلان و همکاران (Gillilanet al., 1998)

مناسبی دارند.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر رابطه دبی - اشل به صورت شکل (۸) و رابطه (۱۲) با ضریب تبیین ۰/۸۴ استخراج گردید.

$$H_u = 0.26q + 6.83 \quad (12)$$

نمودار شکل ۸ نشان‌دهنده روند به دست آمدن دبی متناظر با اشل (ارتفاع آب در بالادست سد)، منطبق بر معادله ۱۲ را نشان می‌دهد.

بهینه‌سازی با الگوریتم جستجوی هارمونی

روش‌های فرا ابتکاری، به تغییر پارامترهای اساسی خود حساس هستند که می‌توان با تحلیل حساسیت، میزان تأثیر هر کدام از پارامترها را در جواب بررسی کرد. در این مطالعه تحلیل حساسیت روی پارامتر HMCR صورت گرفت که سرعت همگرایی تابع هدف برای مقادیر ۰/۱۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۹۰ مورد بررسی قرار گرفت؛ و گام زمانی، نشان‌دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم در یافتن جواب بهینه است.

با استفاده از رابطه هررا - فلتون و داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر رابطه ۹ استخراج شد که ضریب تبیین آن ۰/۹۹ می‌باشد.

$$\Delta H = 126.4q^{0.522} \quad (9)$$

همچنین گیلیلان و همکاران (Gillilanet al., 1998) رابطه

زیر را جهت تعیین دبی جریان ارائه نمودند.

$$Q = H_u W (5.24nR^{0.5} (0.8 \frac{B_u + B_c + 0.5B_d}{P})^{-1.5} (\frac{H_u}{P})^{1.4})^{0.54} \quad (10)$$

که در آن Q دبی، W طول سد در عرض رودخانه (متر)، n تخلخل، R شعاع هیدرولیکی و بقیه پارامترها در شکل (۶) نشان داده شده است.

که طبق این رابطه و داده‌های پژوهش حاضر نمودار شکل (۷) استخراج می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات میزان دبی جریان نسبت به عمق آن، خواهد بود.

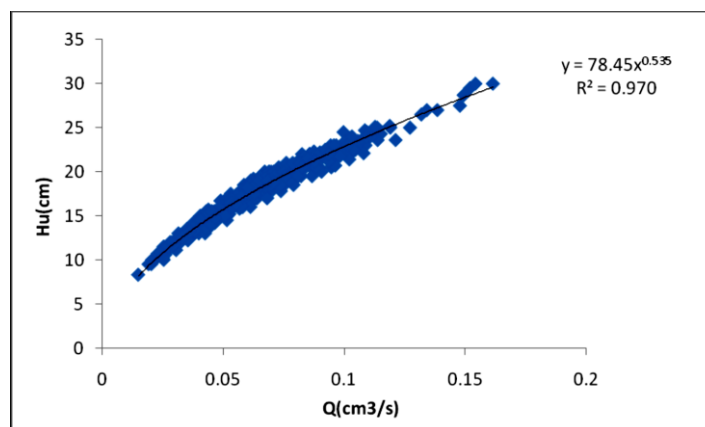
با استفاده از رابطه گیلیلان و همکاران (Gillilanet al., 1998)

و داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر رابطه (۱۱) استخراج می‌گردد.

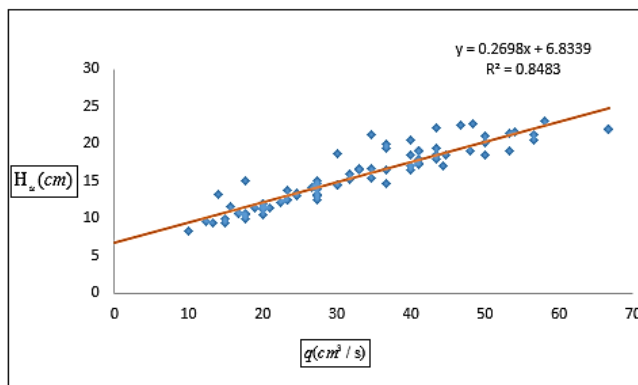
$$H_u = 78.45Q^{0.535} \quad (11)$$

که ضریب تبیین آن ۰/۹۷ می‌باشد.

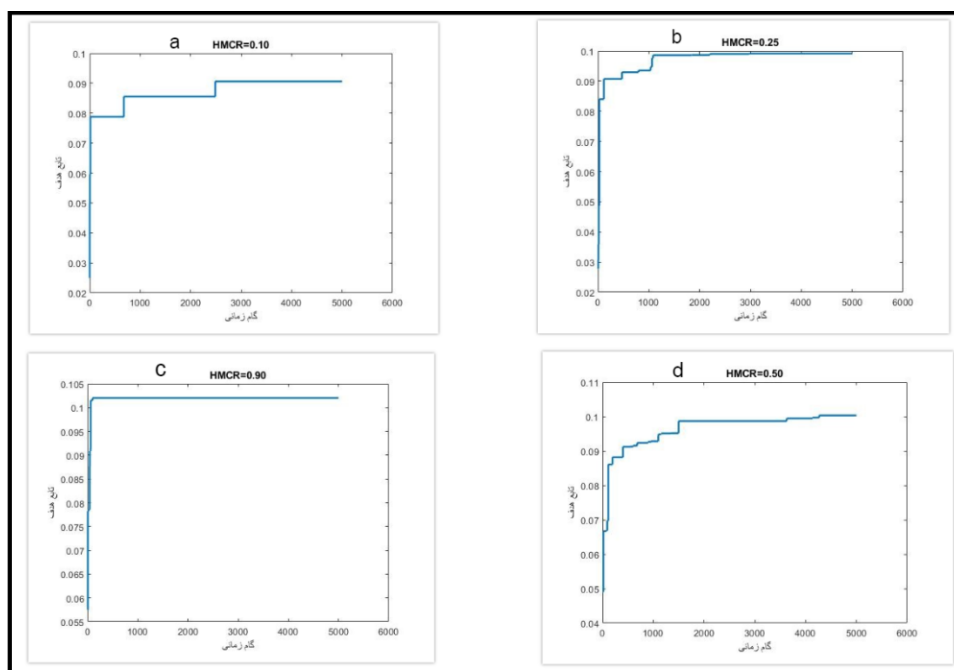
و این روابط با توجه به ضریب تبیین‌های آن‌ها نشان می‌دهد که داده‌های استخراج یافته با روابط هررا- فلتون و هنسن سازگاری



شکل ۷ - رابطه بین دبی و عمق آب در بالادست با استفاده از رابطه گیلیلان و همکاران (Gillilanet al., 1998)



شکل ۸- رابطه دبی - اشل تحقیق حاضر



شکل ۹- نحوه همگرایی تابع هدف با تغییر HMCR، a=0.10، b=0.25، c=0.90 و d=0.50

جدول ۴- پارامترهای بهینه حاصل از الگوریتم جستجوی هارمونی

پارامتر	C_d	H_u	ΔH	ΔX	S_d	P
مقدار (cm)	۰/۱۰	۲۰	۱۷/۰۲	۳۳/۵۰	۰/۵۰	۲۰

استخراج گردید.

نتیجه گیری

ساخت سدهای پاره‌سنگی یکی از آسان‌ترین راه‌های سازه‌ای کنترل سیلاب است. با توجه به اینکه مصالح بکار رفته در این سدها از سنگ‌دانه‌های موجود در محل تأمین می‌شود از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشند. در تحقیق حاضر، سد پاره‌سنگی با مقطع

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش HMCR، سرعت همگرایی الگوریتم بیشتر می‌شود به طوری که در HMCR=0.90 تابع هدف در همان ابتدای گام زمانی همگرا می‌شود. در بهینه‌سازی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی، حداکثر ضریب آبگذری از بدنه سد مدنظر قرار گرفت و رابطه (۶) به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و قیود متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی لحاظ گردید. پس از بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه‌شده طبق جدول (۴)

منابع

حسوند، ک. و سامانی، ج.م.و. ۱۴۰۰. بررسی عددی جریان از درون سد پاره‌سنگی دولایه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۶): ۱۶۸۴-۱۶۷۳.

حیدری، م.، رسولی، ز. و حسینی مبرا، س.ع. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سدهای پاره‌سنگی. نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.

خرم شکوه، ن.، نیکو، م.ر. و زمردیان، س.م.ع. ۱۳۹۸. رویکرد شبیه‌سازی بهینه‌سازی جهت تعیین مشخصات بهینه سدهای تأخیری پاره‌سنگی در شرایط سیلابی. مجله مهندسی منابع آب. ۱۲(۴۲): ۱۴۰-۱۳۲.

رحیمی نژاد، ز.، موسوی جهرمی، س.ح.، خسروجردی، ا.، حسین پور درویشی، ح. و سامانی، ج.م.و. ۱۴۰۰. مطالعه تجربی ضریب دبی شیار بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی). نشریه حفاظت منابع آب و خاک. سال دهم. ۴: ۸۰-۶۳.

رستمی، ج.س.، خلقی، م. و بزرگ حداد، ا. ۱۳۸۹. مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی. مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۳): ۷۱-۶۱.

روشنفکر، ع.، ظهیری، ج. و کاشفی پور، س.م. ۱۳۸۹. ارائه روابط جهت محاسبه ضرایب جریان غیرداری در محیط‌های سنگریزه‌ای. نشریه آب و خاک. ۲۴(۵): ۸۵۵-۸۶۳.

ریاحی مدوار، ح. ۱۳۸۵. تعیین دبی جریان هم‌زمان درون گذر و روگذر در سدهای پاره‌سنگی با استفاده از آنالیز ابعادی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.

شایان نژاد، م. و اشجار زاده، س. ۱۳۹۳. بررسی هیدرولیکی جریان از سد سنگی دولایه با استفاده از یک مدل تجربی. بولتن بین‌المللی منابع آب و توسعه.

شکوهی مهر، ا.، یزدی، ج. و صالحی نیشابوری، س.ع.ا. ۱۴۰۰. بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شهری با کنترل بهینه دریچه‌ها با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (مطالعه موردی شبکه زهکشی حوضه آبریز شرق تهران). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۶(۱): ۱۹۴-۱۸۱.

قاضی مرادی، ا. ۱۳۸۵. گزارش تحقیقاتی بررسی اثرات جریان‌های روگذر روی خصوصیات جریان در سدهای تأخیری و پاره‌سنگی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

دوزنقه‌ای بدون استفاده از توری مشبک، پارامترهای هندسی آن تغییر داده شده است و دبی عبوری از آن موردبررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج تحقیق حاضر مشخص شد در سدهای پاره‌سنگی طول سد در جهت جریان، ارتفاع سد و شیب پایین‌دست بدنه سد در میزان دبی جریان مؤثر هستند. به طوری که هرچه طول سد در جهت جریان و ارتفاع سد و شیب بدنه سد بیشتر شود میزان دبی عبوری جریان از سد کمتر شده که در نهایت رابطه‌ای برای این آنگذری استخراج گردید که رابطه‌ای منطقی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برقرار می‌شود. علاوه بر آن با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد حذف برخی کمیت‌های بی‌بعد تأثیر بیشتری بر صحت رابطه مستخرج شده می‌گذارد. به طوری که حذف کمیت‌های $\left[\frac{P}{H_u}\right]$ ، $[S_d]$ ، $\left[\frac{d}{H_u}\right]$ ، $\left[\frac{\Delta X}{H_u}\right]$ ، $\left[\frac{\Delta H}{H_u}\right]$ میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) به مقدار ۳۴٪، ۷۱٪، ۷۶٪، ۸٫۶٪ و ۲٫۸٪ می‌شود که نشان می‌دهد حذف کمیت $\left[\frac{\Delta H}{H_u}\right]$ به صورت چشمگیری روی صحت رابطه مؤثر می‌باشد و حذف کمیت $\left[\frac{P}{H_u}\right]$ تأثیر چندانی روی صحت رابطه ندارد. از طرفی استخراج یک رابطه دبی اشل ساده و قابل فهم، سبب بهره‌برداری بهتر از سدهای پاره‌سنگی می‌شود. با استفاده از تابع هدف مستخرج شده چند متغیره غیرخطی و به کارگیری الگوریتم جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی داده‌ها در بازه‌های پیوسته صورت گرفت که مقادیر بهینه از نظر فنی و اقتصادی مطلوب را ارائه می‌دهد.

اساساً محدودیت‌هایی که در این نوع تحقیقات وجود دارد، به این شکل می‌باشند که نسبت تعداد پارامترهای مؤثر مستقل بر پارامتر وابسته بسیار زیاد بوده که اگر تمامی پارامترهای دخیل با هدف استخراج یک رابطه کلی جز متغیرهای مسئله قرار داده و مورد آزمایش انجام قرار گیرد، تعداد آزمایش‌ها به صورت چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند و همچنین خطای رابطه استخراجی نیز افزایش پیدا کرده که برای اخذ نتیجه بهتر پیشنهاد می‌شود، تأثیر پارامترهای دیگر که در این تحقیق ثابت فرض شده است بررسی گردد و با نتایج پژوهش حاضر مقایسه شود.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش از امکانات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده گردیده است که از کلیه کارکنان آن بخصوص بخش فنی و آزمایشگاهی تشکر می‌نمایم.

- the equivalent hydraulic conductivity of rockfill dam in vertical and horizontal arrangements. *Irrigation sciences and engineering (jise)*. 42(3): 75-88.
- Herrera, N.M. and Felton, G.K. 1998. Hydraulic of flow through a rockfill dam using sediment – free water. *Trans of ASCE*. 34(3): 871-875.
- Heydari, M. and Khodakaramian, Z. 2022. One-dimensional discharge – stage theory relationship modifying in non- core rockfill dams using laboratory model advanced technologies in water efficiency. 1: 108-120.
- Kells, J.A. 1995. Spatially varied flow over rockfill embankment. *Canadian. Civil engineering journal*. Vol. 120:820-827.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E. 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*. 188: 1567-1579.
- 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.
- Ostad-Ali-Askari, K. and Shayannejad, M. 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., Samani, H.M.V. and Shaiannejad, M. 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams, *IAHR Journal of hydraulic research*. 42:435-439.
- میربیک سبزواری، م، ترابی پوده، ح. و یونسی، ح. ۱۳۹۸. کاربرد الگوریتم جستجوی هارمونی در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد دز برای دوره بلندمدت. نشریه دانش آب و خاک. ۲۹(۴): ۱۰۹ – ۱۲۰.
- یاوری، ح.ر، رباطی، ا. و جلال کمالی، ن. ۱۴۰۱. بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از مخازن با استفاده از الگوریتم فرا کاوشی WCA (مطالعه موردی سد جیرفت). *مجله پژوهش آب ایران*. ۱۶(۳): ۶۱ – ۷۳.
- Ayvaz, M.T. 2010. Solution of groundwater management problems using harmony search algorithm. In *Recent Advances in Harmony Search Algorithm* (pp. 111-122). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fatehi-Nobarian, B., Hajikandi, H., Hassanzadeh, Y. and Jamali, S. 2019. Experimental and analytical investigation of secondary current cells effects on hydraulic jump characteristics in trapezoidal channels. *Tecnología y ciencias del agua*. 10(3): 190-218.
- Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V., 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*. 76(2): 60-68.
- Gillilan, S.E., Hansen, D. and Laursen, E.M., 1998. *Environmental Hydraulics: New Research Directions for the 21st Century*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(3).
- Hassanvand, K. and Samani, H.M.V. 2019. Assessing

Optimizing the Experimental Study of the Hydraulic of the Internal Flow the Rock-Fill Dams and Its Methodology Using the Harmony Eearch Algorithm

S.Farshidnia¹ . B. Fatehi-Nobarian^{2*}. M. Saneie³

Received: Mar.07, 2023

Accepted: Sep. 1, 2023

Abstract

One of the ways to control floods in the rivers is to build rock-fill dams without clay core in the flow path. These dams reduce the peak flow of the passing flood and increase the flood evacuation time. In the current research in the laboratory flume, models of rock-fill dam with aggregates with an average diameter of 2 cm with lengths of 155, 165 and 175 cm in the flow direction were built with different slopes and 3 different flow rates were considered for each model. In each discharge, the depth of the footing of wall was changed using the control valve, for 5 different modes, and a total of 405 tests were performed. After performing the dimensional analysis, dimensionless quantities were extracted and then by applying multivariable nonlinear regression, which shows the objective function related to the discharge coefficient and dimensionless quantities. By performing a sensitivity analysis on the removal of dimensionless quantities, it was found that by removing the quantity the height of the dam to the depth of the water upstream, the absolute average of the relative error increased by 2.5%. While by removing the quantity (slope of the abutment of the dam), the absolute average of the relative error increased by 8.6%.

Keywords: Harmony Search Algorithm, Internal flow, Optimizing, Rock-fill dam

1- Ph.D. of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering of Hydraulic Structures, Associate Member of IRCOLD, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering of Hydraulic Structures, Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran

3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, (SCWMRI), Agriculture Research, Education and Extension, Organization (AREEO), Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: b.fatehinobarian@iaut.ac.ir)