نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال پنجم / شماره هفدهم / تابستان ۱۳۹۷

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
5th Year / No. 17 / September 2018

طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثر سازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم تکامل- تفاضلی، الگوریتم کرم شب‌تاب و ترکیب هر دو

مهدی اژدری‌مقدم *[۱]
پژمان درخشان علمدارلو[۲]

چکیده

در سال‌های اخیر تحقیقات نشان داده است که سرریزهای پلکانی به‌عنوان راهکار مناسبی جهت استهلاک انرژی موردتوجه قرار داشته‌اند. از اهداف طراحی سرریز پلکانی می‌توان به افزایش شدت استهلاک انرژی در طول سریز و درنتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش اشاره نمود؛ بنابراین طراحی بهینه ابعاد سریز بر اساس حداکثر انرژی مستهلک شده هدف اصلی در این تحقیق است. در این مطالعه ابعاد سرریز به‌عنوان مجهولات در نظر گرفته‌شده است که بر اساس الگوریتم‌های تکاملی-تفاضلی، کرم شب‌تاب و همچنین ترکیب‌شان این مجهولات به‌صورت بهینه طراحی‌شده‌اند. افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی و افزایش ارتفاع بهینه پله‌ها می‌شود و در پایان در این تحقیق از سه دبی جریان ورودی مختلف ۴۲۲، ۵۶۰/۲ و ۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه استفاده گردید. نتایج نشان داد که به‌طور مثال در هر سه دبی میزان استهلاک انرژی در طول افقی پله‌ها (۲۰۰ متر) به روش ترکیب الگوریتم به ترتیب برای هر سه دبی برابر ۷۹، ۷۸ و ۶۸ درصد است.

واژه‌های کلیدی

سرریز پلکانی، استهلاک انرژی، طراحی بهینه، حوضچه آرامش، ترکیب الگوریتم تکامل تفاضلی، کرم شب‌تاب.

۱*. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان. mazhdary@eng.usb.ac.ir
۲. دانشجو مقطع دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

تاریخ دریافت: ۹۶ /۳/۵ تاریخ پذیرش: ۹/ ۲/ ۹۷

مقدمه

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پایین‌دست سرریز ادامه دارد. استهلاک بالای انرژی ازجمله مهم‌ترین ویژگی این نوع سرریز بشمار می‌رود، به‌طوری‌که بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان حین عبور آب از روی پله‌های متوالی به پایین‌دست سرریز کاهش می‌یابد. با احداث سرریزهای پلکانی نیازی به استفاده از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سرریز نبوده و یا اینکه منجر به کاهش ابعاد این سازه می‌گردد که این خود کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت و بهره‌برداری سرریز و سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سرریز را به دنبال دارد (شجاع و همکاران، ۱۳۹۱).

دیدگاه استفاده از هندسه پلکانی شکل در ساخت سرریزها، از زمان‌های قدیم مطرح بوده است. لیکن با در نظر گرفتن عواملی نظیر تأثیر فراوان پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، شناخت فنّاوری‌های جدید در استفاده از بتن غلتکی و همخوانی این روش با ساخت سرریز یاد شده، باعث کاربرد وسیع سرریزهای پلکانی در تعداد زیادی از پروژه‌ها شده است. میزان استهلاک انرژی زیاد ایجادشده توسط پلکان‌ها باعث می‌گردد تا عمق حفاری حوضچه آرامش پائین‌دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیوارهای جانبی آن کاهش یابد و از این نظر صرفه‌جویی زیادی به عمل آید. با توجه به اهمیت موضوع، انجام پژوهش‌های تحقیقاتی بر روی این نوع از سرریزها مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرارگرفته است (چانسون[۱]، ۲۰۰۱).

در آزمایشی که سورنسن[۲] (۱۹۸۵) بر روی سه مدل از سرریز پلکانی سد مونسکسویل در ایالت نیوجرسی آمریکا انجام داد نسبت سرعت جریان در پاشنه سرریز صاف (مدل) به مقدار نظیر آن در سرریز پلکانی بین ۲/۸ تا ۳ بود. نتایج داد نشان داد که سرعت در پاشنه سرریز پلکانی ۹/۲ و برای سرریز صاف ۲۲/۹ متر بر ثانیه است. نتایج این پژوهش نشان داد که سرریز پلکانی انرژی جنبشی را به میزان ۸۴ درصد کاهش می‌دهد. چون در این نوع سرریزها استهلاک انرژی بیشتر از سرریزهای صاف است پس ابعاد حوضچه‌های آرامش کاهش می‌یابد و از نظر اقتصادی صرفه‌جویی زیادی ایجاد می‌شود.

تابارا و همکاران[۳] (۲۰۰۵) روش اجزاء محدود را برای محاسبه پروفیل جریان آب بر روی سرریز پلکانی بکار گرفتند. آن‌ها برای محاسبه پروفیل سطح آب بر روی سرریز پلکانی از نرم‌افزار ADINA-f بهره گرفتند. پروفیل سطح آب محاسبه‌شده در مورد همه سرریزهای پلکانی ساخته‌شده از لحاظ کیفی منطبق با خصوصیات جریان بوده و از لحاظ کمی نیز مشابه با مقادیر اندازه‌گیری شده پروفیل سطح آزاد جریان بود. علاوه بر این، استهلاک نسبی انرژی نیز محاسبه و با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش مورد مقایسه قرار گرفت که هماهنگی خوبی بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردید. الحسینی[۴] (۲۰۱۵) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی افزایش انرژی مستهلک شده در سرریز پلکانی پرداخت. در این مطالعه نتایج پس از مقایسه نشان داد که پله‌ها در دو حالت صاف و شیب‌دار با سه زاویه ۲۷، ۳۲ و ۴۰ درجه هرچه تعداد پله‌ها یا زاویه بیشتر گردد میزان انرژی مستهلک شده نسبت به حالت سرریز صاف افزایش پیدا می‌کند. گامال[۵] و همکاران (۲۰۱۷) برای بهبود انرژی مستهلک شده در سرریزهای پلکانی از قطع کننده استفاده کردند. در این تحقیق پارامترهای قطع‌کننده همچون

۱.Chanson
۲.Sorensen
۳.Tabbara
۴.Al- Husseini
۵.Gamal

ارتفـاع، عـرض، نحـوه قرارگیـری و سـوراخ‌هـای موجـود موردبررسی قرار گرفت. نتایج در دو حالت سـرریز پلکـانی بـه حالت ساده و حالتی که قطع‌کننـده وجـود دارد موردبررسـی قـرار گرفـت و نتـایج نشـان داد کـه در حالـت اسـتفاده از قطع‌کننده میزان انرژی مستهلک شده بیشتر از حالـت سـاده است. سوری و مجتهدی (۱۳۹۴) به ارزیـابی اثـرات هندسـه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انـرژی جریـان عبـوری بـا استفاده از سیستم استنتاج فازی به مطالعه پرداختند. در این تحقیق از مدل نرم‌افزاری Flow-3D جهت مدل‌سازی کمک گرفته‌شده است. جهت مقایسـه نتـایج روش عـددی از مـدل آزمایشگاهی کمک گرفته شد. نتایج نشان داد کـه اسـتهلاک انرژی در حالت شیب معکوس پله‌ها بیشتر از حالت پله افقـی می‌باشد و میزان انرژی مستهلک شده با شیب معکوس رابطه مستقیم دارد. همچنین از سیستم استنتاج فازی نیز به‌عنـوان یک روش کارآمد در تخمین میزان انرژی مسـتهلک شـده در شرایط تغییر پارامترهای مؤثر در الگـوی جریـان عبـوری بـر روی سرریز پلکانی، پیشنهاد شد (سوری و مجتهدی، ۱۳۹۴).

حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به کمک روش‌های عددی توسط نرم‌افزار Flow-3D به تحلیل جریان در سرریز و سازه استهلاک انرژی در سد پرداختند. نتایج محققین نشان داد که مدل آشفتگی RNG مناسب‌ترین مدل است. همچنین در این تحقیق به تغییر دادن هن‌دسه پرتابه نیز اشاره شده است که نتایج نشان داد در یک شعاع پرتابه ثابت با تغییر زاویه منفی پرتاب به زاویه مثبت هم انحنای جریان افزایش می‌یابد و هم طول پرتاب ۴۰ متر می‌گردد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵).

طاطار و همکاران نیز در سال ۱۳۹۵ به بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با مدل عددی Fluent پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی از روش VOF استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داد که به ازای انرژی ثابت بالادست، کاهش دبی به میزان فراوانی باعث کاهش استهلاک انرژی می‌گردد (طاطار و همکاران، ۱۳۹۵).

حیدری و همکاران در سال ۱۳۹۶ در مطالعه‌ای به حداکثرسازی استهلاک انرژی در سرریز گابیونی[1] پلکانی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات به مطالعه پرداختند. نتایج نشان داد که در دبی‌های تخلیه با نرخ بالا، سرریزهای پلکانی گابیونی با عبور مقداری جریان از میان سنگ‌دانه‌ها، نسبت به انواع نفوذناپذیر آن بیشتر موجب افت انرژی جریان می‌شوند و با افزایش دبی جریان ابعاد سرریز و متعاقباً استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان گفت که سرریزهای پلکانی از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین برای اقتصادی‌تر شدن پروژه و کاهش هزینه ساخت ازجمله حذف حوضچه آرامش می‌توان سرریز پلکانی را به‌صورت بهینه طراحی کرد که هدف از این تحقیق ارائه روشی برای بهینه‌سازی هندسی سرریز پلکانی بر اساس میزان انرژی مستهلک شده با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی و کرم شب‌تاب و مقایسه نتایج با ترکیب این دو الگوریتم و همچنین مقایسه با الگوریتم ژنتیک است و همچنین مقایسه با مدل عددی Fluent است. جهت صحت‌سنجی و دقت نرم‌افزار از نتایج (شجاع و همکاران،۱۳۹۱) استفاده‌شده است.

مواد و روش‌ها

الف) تابع هدف

دبی طراحـی سـرریز معمـولاً دبـی حـداکثر سـیل بـا دوره بازگشـت معـین (۱۰۰۰۰ سـال در تحقیـق جـاری) می‌باشد. با توجه بـه ایـن موضـوع، دبـی طراحـی بـه‌عنـوان پـارامتر معلـوم در نظـر گرفتـه شـد. ازآنجـایی‌کـه نـوع جریـان بـر روی سـرریز پلکـانی بـه ازای دبـی طراحـی از نـوع غیـر ریزشـی اسـت، لـذا طراحـی بهینـه سـرریز در

[1]. Gabion

شرایط جریان غیر ریزشی انجام می‌گیرد. هدف از بهینه‌سازی سرریز پلکانی عبارت از تعیین ابعاد بهینه سرریز برای حداکثرسازی استهلاک نسبی انرژی است. رابطه به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق به‌عنوان تابع هدف برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی در رابطه (۱) آمده است (اوهوتسو و همکاران، ۲۰۰۴):

$$\frac{E_{max}-E_{res}}{E_{max}} = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam}+1.5y_c} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{\sin\alpha}\right)^{1/2}\cos\alpha+0.5\left(\frac{f}{\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{1.5+\frac{H_{dam}}{y_c}} = f(\alpha, w, h, H_{max}, H_d) \quad (۱)$$

$$H_{dam} = H_{chute} + 2.66 \quad (۲)$$

E_{res}: مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز که تابعی از شیب سرریز (α)، عرض سرریز (w)، ارتفاع پله‌ها (h)، ارتفاع سرریز (H_{dam}) و بار آبی (H_d) است.

$\frac{\Delta E}{E_{max}}$: استهلاک نسبی انرژی، $\frac{H_{dam}}{y_c}$: پارامتر بدون بعد نسبت ارتفاع سرریز به عمق بحرانی است. در رابطه (۲):

$H_{dam} = H_{chute} + 2.66$ است که H_{chute} ارتفاع سرریز می‌باشد. توجه شود که در سرریز پلکانی H_{chute} و H_{dam} با یکدیگر برابر است.

ب) قیدهای مسئله

منظور از قید مجموعه‌ای از محدودیت‌ها است که به هر یک از پارامترهای تابع هدف می‌توان اختصاص داد. قیدهای مسئله در ادامه آمده است:

۱. جریان ایجادشده بر روی سرریز باید از نوع غیر ریزشی باشد. بر این اساس رابطه (۳) بایستی برقرار باشد.

$$0.25 \le \left(\frac{h}{y_c}\right) \le \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad (۳)$$

جهت تعیین $(h/y_c)_s$ از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6}(\tan\alpha)^{1/6} \quad (۴)$$

در رابطه (۴):

$$5.7 \le \alpha \le 55$$

چنانچه پارامتر مربوط به ارتفاع پله h با x_3 نشان داده شود فرم کلی قیدی که وارد برنامه می‌شود به‌صورت روابط (۵) و (۶) است:

$$g_1 = x_3 - y_c * \left(\frac{h}{y_c}\right) \le 0 \quad (۵)$$

$$g_2 = 0.25 * y_c - x_3 \le 0 \quad (۶)$$

۲. دبی واحد عرض سرریزهای پلکانی نباید بیش از ۳۰ مترمکعب بر ثانیه بر متر باشد. چنانچه پارامتر مربوط به عرض w را با x_2 نشان دهیم قید مربوط به‌صورت رابطه (۸) خواهد بود:

$$\frac{Q}{W} \le 30 \quad (۷)$$

$$g_3 = Q - 30 * x_2 \le 0 \quad (۸)$$

۳. معادله سرریزها در حالت کلی به‌صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$Q = C.W.H_d^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (۹)$$

که در این رابطه C ضریب تخلیه سرریز و H_d بار آبی بر روی سرریز است. با توجه به اینکه عرض سرریز جزو متغیرهای بهینه‌سازی است، تغییر در عرض سرریز باعث تغییر در H_d که درنهایت منجر به تغییر ضریب جریان C خواهد شد. لذا ترکیب این متغیرها با یکدیگر در فضای شدنی باید به نحوی انجام بگیرد که رابطه مربوط به سرریزها با توجه به معلوم بودن مقدار دبی طراحی برقرار باشد. لذا اگر H_d با x_5 نمایش داده شود آنگاه:

$$g_4 = Q - C * x_2 * (x_5)^{\frac{3}{2}} \le 0 \quad (۱۰)$$

فضایی که جهت ساخت سرریز اختصاص داده می‌شود نیز می‌تواند جزو محدودیت‌های مسئله باشد. به‌این‌ترتیب که طول افقی سرریز با توجه به موقعیت منطقه نمی‌تواند از یک مقدار مشخص تجاوز نماید. با توجه به اینکه طول افقی سرریز رابطه مستقیم با شیب و ارتفاع آن دارد، درصورتی‌که ارتفاع شوت سرریز با x_4 و شیب آن با x_1 نشان داده شود، رابطه (۱۲) را می‌توان ارائه نمود:

$$L = \frac{H_{chute}}{\tan(\alpha)} \qquad (11)$$

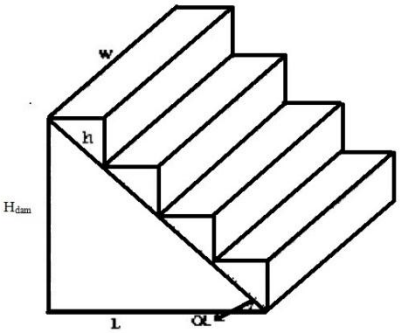
$$g_5 = x_4 - L * \tan(x_1) \leq 0 \qquad (12)$$

با توجه به تحقیق شجاع و همکاران (۱۳۹۱) جهت بهینه‌سازی از مشخصات یک سرریز صاف به‌عنوان مطالعه موردی استفاده‌شده است. سرریز مذکور مربوط به سد ساروق است که در استان آذربایجان غربی و در ۱۷ کیلومتری شمال غربی شهرستان تکاب واقع‌شده است. ارتفاع سرریز از تاج تا کف حوضچه آرامش ۲۷/۸ متر، عرض آن ۲۶ متر و بار آبی طرح روی آن ۵/۶ متر است. دبی‌های بهینه‌سازی معادل ۴۲۲، ۵۶۰/۲ و ۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه می‌باشند که بهترین دبی طراحی سرریز مذکور با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، دبی حداکثر سیل محتمل (PMF) و دبی با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله می‌باشند.

طرح شماتیک سرریز پلکانی و پارامترهایی که به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بکار برده شده‌اند، به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول (۱): حدود موردقبول برای متغیرها در روند بهینه‌سازی

متغیرها	حد پایین	حد بالا
شیب سرریز (x_1)	۱۹ درجه	۵۵ درجه
عرض سرریز (x_2)	۲۰ متر	۲۶ متر
ارتفاع پله‌ها (x_3)	۰/۲ متر	۳ متر
ارتفاع شوت (x_4)	۲۴ متر	۲۶ متر
بار آبی روی سرریز (x_5)	۴ متر	۵/۸ متر

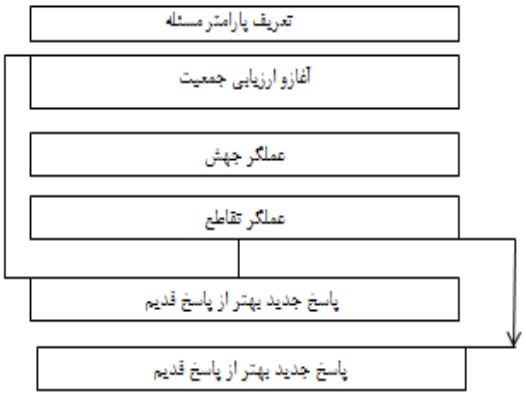


شکل (۱): طرح شماتیک سرریز پلکانی

الگوریتم تکامل تفاضلی[۱] (DE)

DE، یک استراتژی جستجوی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که با تلاش‌های استورن[۲] و پرایس[۳]، در سال ۱۹۹۵ معرفی شد. شبه کد DE در شکل (۲) آورده شده است (پینگ[۴] و همکاران، ۲۰۱۵).

اگرچه DE مشابه دیگر الگوریتم‌های تکاملی است بااین‌حال به‌طور قابل‌توجهی در مفاهیم اصلی با آن‌ها متفاوت است. در این الگوریتم اطلاعات مربوط به فاصله بین اعضای جمعیت و جهت حرکت اعضا در جمعیت فعلی، برای هدایت فرآیند جستجو به سمت بهینه سراسری استفاده می‌شود.

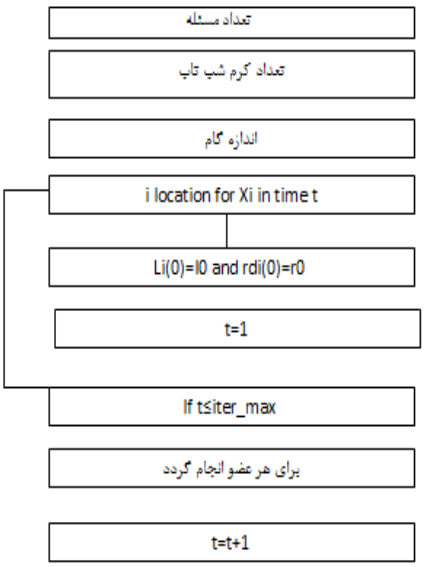


۱. Differential evolution
۲. Storn
۳. Price
۴. Ping

شکل (۲): فلوچارت شبه کد DE

الگوریتم کرم شب‌تاب[۱] (FA)

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع کرم شب‌تاب در سال ۲۰۰۵ توسط کریشنانان[۲] و گهوز[۳] ارائه‌شده است. کریشنانان و گهوز در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ مبانی نظری این الگوریتم را توسعه داده‌اند. شبه کد FA در شکل (۳) آمده است (یانگ[۴]، ۲۰۰۹)



شکل (۳): الگوریتم شبه کد FA

روش پیشنهادی (ترکیب الگوریتم تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب)

الگوریتم کرم شب‌تاب- تکامل تفاضلی بر پایه دو الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب و الگوریتم تکامل تفاضلی است. در این الگوریتم جمعیت اولیه به‌صورت صعودی مرتب می‌شود و سپس به دو زیر جمعیت تقسیم می‌گردد. بر روی زیر جمعیت اول الگوریتم کرم شب‌تاب و بر روی زیرجمعیت دوم الگوریتم تکامل تفاضلی اجرا می‌شود. در زیرجمعیت اول بر اساس الگوریتم کرم شب‌تاب جذابیت هر کرم شب‌تاب با استفاده از معادله (۱۳) تعیین می‌شود.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \qquad (۱۳)$$

که β_0، γ و r_{ij}^2 به ترتیب میزان جذابیت از پیش تعریف‌شده، ضریب جذب نور و فاصله بین دو کرم شب‌تاب i و کرم شب‌تاب هستند.

سپس حرکت هرکدام از کرم‌های شب‌تاب به سمت بهترین (جذاب‌ترین) کرم شب‌تاب صورت می‌گیرد. مطابق با رابطه (۱۴):

$$x_{id} = x_{id} + \beta(x_{jd} - x_{id}) + \alpha(\delta - 0.5) \qquad (۱۴)$$

که α و δ مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک هستند. سپس در زیرجمعیت دوم بهترین مقادیر از میان ضعیف‌ترین‌ها با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی تولید می‌شود که در ادامه روند اجرای این الگوریتم بیان‌شده است. جهش: بدین گونه که تولید اعضا با استفاده از عملگر جهش که در معادله (۱۵) نشان داده‌شده است، انجام می‌پذیرد.

$$V_{i(t)} = X_{best(t)} + F * (X_{r_{1t}} - X_{r_{2t}}) \qquad (۱۵)$$

که $X_{best(t)}$ بهترین بردار داده جاری است و F نیز فاکتور جهش است. $X_{r_{1t}}$ و $X_{r_{2t}}$ بردارهای داده‌ای هستند که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

تقاطع: در ادامه عضو جدید با انجام تقاطع بین عضو تولیدشده از مرحله قبل و عضو فعلی از جمعیت X_i تولید می‌شود که نحوه تولید عضو در معادله (۱۶) آمده است.

---

۵ .Firefly Algorithm
۶ .Kiryshnanand
۷ .Goohuz
۸.Yang

$$y_{i(t)} = \begin{cases} V_{i(t)} & \text{if } R \le CR \\ X_{i(t)} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۱۶)$$

که در آن R یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ است و CR ثابت تقاطع می‌باشد.

جایگزینی: در این مرحله درصورتی‌که عضو جدید تولیدشده دارای شایستگی بالاتر نسبت به عضو قبلی باشد، جایگزین آن می‌شود.

$$X_{i(t+1)} = \begin{cases} Y_{i(t)} & \text{if } f(Y_{i(t)}) \le f(X_{i(t)}) \\ X_{i(t)} & \text{if } f(Y_{i(t)}) > f(X_{i(t)}) \end{cases} \quad (۱۷)$$

درنتیجه در هرکدام از زیر جمعیت‌ها بهترین مقادیر انتخاب‌شده و با ادغام آن‌ها بهترین مقدار از میان داده‌ها به دست خواهد آمد.

روش عددی

بعد از بهینه‌سازی پارامترها برای تحلیل جریان روی سرریز از مدل عددی FLUENT کمک گرفته شد. برای حل از معادله آشفتگی $k-\varepsilon$ حالت استاندارد کمک گرفته‌شده است. در مدل استاندارد که کاراترین و بیشترین کاربرد را در تحلیل جریان‌های آشفته دارند، ثابت‌های معادلات و نیز استخراج خود معادلات توسط جونز[۱] و لاندر[۲] صورت گرفته است. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرد. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک روش نیمه تجربی است که معادله K آن دقیقاً از ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می‌شود، اما معادله حاکم، بر اساس شواهد تجربی و آزمایشگاه و روابط ریاضی حاصل می‌گردد. در استخراج این معادلات K و ε چنین فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد و معادلات حاکم بر این مدل توسط روابط (۱۸) و (۱۹) بیان می‌شود:

$$\rho\frac{DK}{DT} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu}{\delta x_i}\right)\frac{\partial K}{\partial X_i}\right] + G_K + G_b + \rho\varepsilon \quad (۱۸)$$

$$\rho\frac{D\varepsilon}{DT} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu}{\delta_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + G_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{K}(G_K + C_{3\varepsilon}G_b) - G_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{K} \quad (۱۹)$$

δ_εو δ_k به اعداد پرانتل آشفتگی مشهور هستند. ثابت $C_{3\varepsilon}$ در معادله ε اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند.

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad (۲۰)$$

بنابراین چنانچه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد در این صورت در لایه برشی این ثابت برابر ۱ خواهد شد و اگر جهت جریان عمود بر جهت ثقل باشد این مقدار صفر خواهد بود. ترم‌های چشمه و چاه در همه مدل‌های $k-\varepsilon$ مطابق رابطه (۲۱) می‌باشند. ترم‌ها انرژی جنبشی k بر اساس گرادیان سرعت میانگین است.

$$G_k = \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (۲۱)$$

اثر شناوری G_B زمانی مؤثر است که هم ترم دما و هم ثقل در مسئله وجود داشته باشد.

ارائه نتایج

با توجه به اینکه در این تحقیق سه دبی برای بهینه‌سازی هندسه سرریز در نظر گرفته‌شده است، سرریز در چهار حالت طول افقی پله‌ها برای به دست آوردن ابعاد بهینه مشخص گردیده است (طول افقی پله‌ها، ۲۰۰، ۲۱۰، ۲۲۰ و ۲۳۰). برای هر دبی هر چهار حالت ابعاد به‌دست آمده است که به‌عنوان نمونه برای دبی ۴۲۲ مترمکعب برثانیه برای چهار حالت طول افقی در جداول (۲) تا (۵) نتایج آورده شده است.

---

۱. Jonse
۲. Lander

جدول (۲): بهینه‌سازی با طول افقی پله ۲۰۰ متر و دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه

پارامتر	DE	FA	روش پیشنهادی	شجاع و همکاران (۱۳۹۱)
(x_1)	۵۵	۵۵	۵۴/۳۹	
(x_2)	۲۴/۶	۲۳/۸۷	۲۳/۰۷	۲۳/۸
(x_3)	۲/۲۸	۲/۹۰	۱/۲۰	۱/۶۳
(x_4)	۲۶	۲۶	۲۴/۳۰	۲۶
(x_5)	۴/۷۵	۴/۷۷	۴/۸۹	۴/۱۳
استهلاک (٪)	۷۵/۹۶	۷۵/۵۹	۷۹/۲۹	۷۶/۱۴

جدول (۳): بهینه‌سازی با طول افقی پله ۲۱۰ متر و دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه

پارامتر	DE	FA	روش پیشنهادی	شجاع و همکاران (۱۳۹۱)
(x_1)	۵۵	۵۵	۵۴/۷۶	
(x_2)	۲۰/۲۴	۲۰/۹۴	۲۱/۳۵	۲۳/۹۳
(x_3)	۲/۳۲	۱/۸۳	۱/۱۳	۱/۶۴
(x_4)	۲۶	۲۶	۲۴/۰۷	۲۶
(x_5)	۵/۶۸	۵/۴۰	۴/۲۶	۴/۱۱
استهلاک(٪)	۷۶/۰۵	۷۵/۹۹	۷۹/۱۶	۷۶/۴۵

جدول (۴): بهینه‌سازی با طول افقی پله ۲۲۰ متر و دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه

پارامتر	DE	FA	روش پیشنهادی	شجاع و همکاران (۱۳۹۱)
(x_1)	۵۵	۵۵	۵۴/۴۲	
(x_2)	۲۴/۱۵	۲۵/۳۴	۲۰/۳۶	۲۴/۵۱
(x_3)	۲/۴۳	۱/۷۶	۲/۳۵	۱/۶۲
(x_4)	۲۶	۲۶	۲۵/۸۳	۲۶
(x_5)	۴	۵/۸	۵/۰۴	۴/۰۸
استهلاک (٪)	۷۵/۸۷	۷۵/۸	۷۸/۵۷	۷۶/۶۹

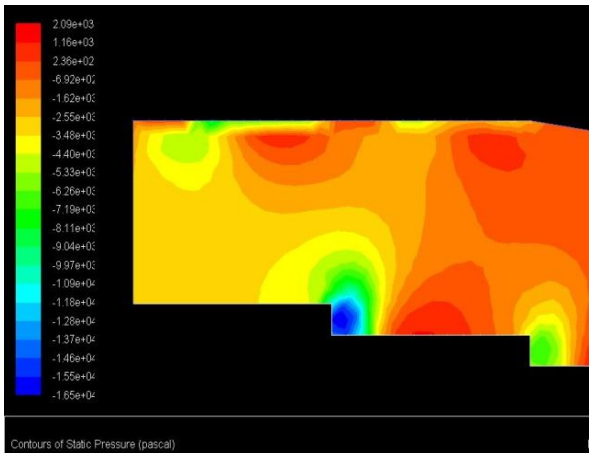
جدول (۵): بهینه‌سازی با طول افقی پله ۲۳۰ متر و دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه

پارامتر	DE	FA	روش پیشنهادی	شجاع و همکاران (۱۳۹۱)
(x_1)	۵۵	۵۵	۵۴/۸۹	
(x_2)	۲۵/۷۵	۲۵/۶	۲۲/۷۹	۲۳/۹۶
(x_3)	۱/۱۹	۱/۵۱	۱/۰۲	۱/۶
(x_4)	۲۶	۲۶	۲۵/۶۵	۲۶
(x_5)	۴/۳۶	۵/۸	۴/۷۷	۴/۱۱
استهلاک(٪)	۷۵/۹۷	۷۵/۹۳	۷۷/۸۴	۷۶/۸۷

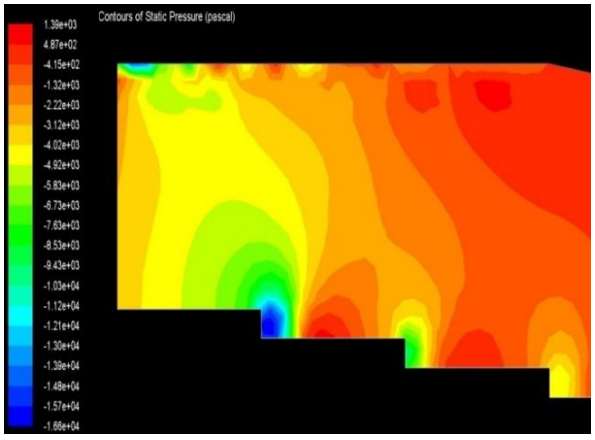
نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در حالت کلی سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف استهلاک انرژی به خصوصی دارد؛ اما نکته قابل اهمیتی که در این سرریزها وجود دارد اقتصادی بودن طرح در کنار افزایش انرژی مستهلک شده است. در روش‌های ارائه‌شده در این تحقیق روش پیشنهادی با توجه به نتایج علاوه بر بهینه کردن ابعاد سرریز نسبت به بقیه روش‌ها انرژی مستهلک شده بیشتری را به‌دست آورده است.

درروش عددی نیز مقادیر استهلاک انرژی به‌دست آمد که در شکل (۴) فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر، در شکل (۵) فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر و در شکل (۶) فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر آورده شده است. با توجه به اینکه در مدل عددی کانتورهای فشار برای دبی‌های

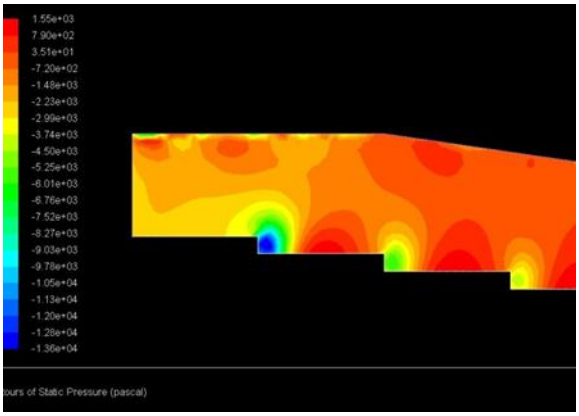
شکل (۴): فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر



شکل (۵): فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر



مختلف در طول افقی ۲۰۰ متر به‌دست آمد می‌توان مقدار انرژی مستهلک شده محاسبه کرد. در جداول (۶)، (۷) و (۸) میزان انرژی مستهلک شده به روش‌های مختلف آورده شده است.



شکل (۶): فشار در ابتدای سرریز برای دبی ۷۶۶/۹ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی ۲۰۰ متر

جدول (۶): میزان انرژی مستهلک شده برای Q=۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی پله ۲۰۰ متر

روش	میزان انرژی مستهلک شده (٪)
روش پیشنهادی	۷۹/۲۹
DE	۷۵/۹۶
FA	۷۵/۵۹
شجاع و همکاران (۱۳۹۱)	۷۶/۱۴
Fluent	۶۷/۱۶

جدول (۷): میزان انرژی مستهلک شده برای Q=۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی پله ۲۰۰ متر

روش	میزان انرژی مستهلک شده (٪)
روش پیشنهادی	۷۸/۴۷
DE	۷۶/۰۵
FA	۷۵/۶۶
شجاع و همکاران	۷۳/۱۸
Fluent	۶۲/۲۷

جدول (۸): میزان انرژی مستهلک شده برای Q=۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه و طول افقی پله ۲۰۰ متر

روش	میزان انرژی مستهلک شده (٪)
روش پیشنهادی	۶۸/۴۷
DE	۶۵/۱۹
FA	۶۵/۴۷
شجاع و همکاران (۱۳۹۱)	۶۸/۱۲
Fluent	۶۷/۷۱

با توجه به اینکه در سرریزهای پلکانی مستهلک شدن انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است در این تحقیق نیز روش پیشنهادی در برآورد این پارامتر به‌خوبی عمل کرده است. همان‌گونه که از نتایج روش‌هایی که در جداول (۶)، (۷) و (۸) آمده است می‌توان گفت که با افزایش دبی در سرریز میزان انرژی مستهلک شده نیز کاهش‌یافته است که از نظر علمی منطقی است و همه روش‌ها روند نزولی در محاسبه انرژی داشته‌اند؛ اما علاوه بر اینکه در سرریزهای پلکانی مقدار انرژی که باید مستهلک شود قابل اهمیت است طراحی سرریز نیز به‌نوبه خود دارای اهمیت بسیاری است، بنابراین روش پیشنهادی در این زمینه نیز از دقت بالایی برخوردار بوده است که نتایج در جداول (۲)، (۳)، (۴) و (۵) آورده شد. پس می‌توان گفت که روش پیشنهادی هم در برآورد میزان استهلاک و هم در به‌دست آوردن پارامترهای طراحی به حالت بهینه به‌خوبی جواب داده است. همچنین با مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش عددی که توسط مدل Fluent

برای میزان انرژی به‌دست آمد می‌توان بیان کرد که روش پیشنهادی دارای دقت بالایی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به روش‌های استفاده‌شده و مقدار به‌دست‌آمده انرژی مستهلک شده از هر روش می‌توان گفت که در روش ترکیب دو الگوریتم تکامل تفاضلی و الگوریتم کرم شب‌تاب (DEFA) که روش پیشنهادی در تحقیق حاضر است، مقدار این انرژی در این ترکیب بیشتر از هر الگوریتم به‌صورت جداگانه است. همچنین مقایسه این ترکیب با روش شجاع و همکاران و مدل عددی Fluent نیز می‌توان گفت این روش در طراحی بهینه ابعاد سرریز نتایج خوبی از خود نشان داده است. با توجه به نتایج با افزایش دبی عبوری از سرریز میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد و با افزایش طول افقی پله‌ها میزان این انرژی افزایش پیدا می‌کند که در هر حالت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر مقدار انرژی مستهلک شده بیشتری را نشان داده و مقادیر ابعاد کمتر از بقیه روش‌ها است. از بررسی تغییرات بهینه زاویه نسبت به دبی جریان نتیجه می‌شود که به ازای دبی ثابت میزان زاویه تقریباً ثابت می‌ماند و همچنین تغییرات ارتفاع پله در دبی ثابت تأثیر بسزایی در انرژی مستهلک شده دارد. درنهایت با مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش‌های دیگر دقت بالا و صحت را می‌توان از مزیت‌های مهم روش پیشنهادی بیان کرد.

مراجع

۱. حسینی، خ. فضل‌اله نژاد، م. کرمی، ح. فرزین، س. (۱۳۹۵). "تحلیل جریان در سرریز و سازه استهلاک انرژی سد گلورد نکا به کمک روش‌های عددی". نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال سوم، شماره یازدهم، صفحات ۱۲-۱.

۲. حیدری، ا. شوریان، م. شیبانی، ح.ر. (۱۳۹۶). حداکثرسازی استهلاک انرژی در سرریز گابیونی پلکانی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات. دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، تهران.

۳. سوری، ن. مجتهدی، ع ر. (۱۳۹۴). "ارزیابی اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری با استفاده از سیستم استنتاج فازی ". نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، جلد ۴۵، شماره ۳، صفحات ۴۲-۲۵.

۴. شجاع، ف. سلماسی، ف. فرسادی‌زاده، د. ناظمی، ا ح. صدرالدینی، ع ا. (۱۳۹۱). "طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثر سازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ". نشریه دانش آب‌وخاک، جلد ۲۲، شماره ۴. صفحات ۸۳-۶۹.

۵. طاطار، س. اژدری، خ. حسینی، ح. گنجی‌نوروزی، ز. (۱۳۹۵). بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با مدل عددی Fluent. چهارمین کنفرانس مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.

6. Al-Husseini, T.R. (2015). “Experimental study of increasing energy dissipation on stepped spillway”. Journal of Kerbala University, Vol. 13 No. 3.

7. Chanson, H. (2001). "The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways". Library of Congress Cataloging-in-publication Data, The Netherlands.
8. Chinnarasri, C. 2002. "Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on The StepFaces of Stepped Spillways". Dam Engineering.
9. Gamal, M. Sobeah, M. Helal, E. El-Fooly, M. (2017). “Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers”. Ain Shams Engineering Journal, In Press, Corrected Proof.
10. Ohtsu I, Yasuda Y and Takahashi M, (2004). “Flow characteristics of skimming flows in stepped channels”. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 130(9): 860-869.
11. Rajaratnam,N. (1990). “Skimming flow in Stepped spillways”. Journal of Hydraulic Engineering ASCE,Vol. 116, No. 4, 578-591.

12. Sorensen, R.M. (1985). “Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(12): 1461-1472.

13. Tabbara M, Chatila J and Awwad R, (2005). Computational simulation of flow over stepped spillway. Journal of Computers & Structures 83: 2215-2224.

14. Yang. X.S. (2009). “Firefly Algorithms for Multimodal Optimization”. In: Watanabe, O. Zeugmann, T.(eds.) SAGA 2009. LNCS, vol. 5792, pp. 169–178. Springer, Heidelberg.

Optimum Design of Stepped Spillway for Maximizing Energy Dissipation Using Differential - Evolution Algorithm, Firefly Algorithm and Combines both

Mehdi Azhdary Moghaddam*[1]
Pezhman Derakhshan Alamdarloo[2]

Abstract

In recent years, research has shown that as a good strategy for energy dissipation of spillway in stepped spillway have been considered. The design goals of stepped spillway can be used to increase the intensity of energy dissipation during spillway and thus reduce the dimensions mentioned stilling basin. Therefore optimum design of spillway on maximum energy dissipated main goal in this research. The dimensions of the spillway is considered as variables based on differential evolution algorithm and Firefly algorithm and also the combination of two algorithms for optimum design is variables. By increasing the flow rate is reduced relative energy dissipation and optimum height of the steps increases. In this study, three different inlet flow 422 (m^3/s), 560.2 (m^3/s), and 776.9 (m^3/s), were used. The results showed that, for example, in three flow the energy dissipation during the horizontal steps of 200 meters by combining the algorithm, respectively, for the three flow is 79%, 78% and 68%.

Keywords

Stepped Spillway, Energy Dissipation, Optimum Design, Stilling Basin, Combining Differential Evolution, firefly Algorithm.

1*. Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchesta, mazhdary@eng.usb.ac.ir.
2 . PhD Student of Sistan and Baluchestan University.

Received:25/5/2017 Accepted:29/4/2018