

## Development a Two-objective Simulation - Optimization Model for Optimal Design of Geometric Dimensions and Slope of the Stepped Spillway of Upstream Siah-Bisheh Dam Using NSGA-II Algorithm

ZAHRA SOHRABI<sup>1</sup>, JAVAD SARVARIAN<sup>1\*</sup>, JAFAR MAMIZADEH<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

(Received: July. 21, 2019- Revised: Sep. 14, 2019- Accepted: Sep. 21, 2019)

### ABSTRACT

For safe pass of flood flow from upstream to downstream of dams, the spillways are used. Among the various spillways, in stepped spillways, the flow is dissipated when passing through the structure. This will reduce the cost of downstream energy-dissipaters structures such as stilling basin. In addition to energy dissipation, the volume and cost of stepped spillways can affect its design. The best design of the stepped spillway is that the remaining energy and the volume and cost of the spillway will be minimized. Therefore, the stepped spillway design is a multi-objective optimization problem. In the present study, a two-objective simulation-optimization model based on the NSGA-II algorithm was used to minimize the possible remaining energy and spillway volume. The results showed with increasing the relative height of spillway stairs, the amount of remaining energy is increased initially and after reaching a peak point, it would be reduced to a constant value. From the perspective of volume and cost of spillway, by increasing the relative height of the spillway stairs, its volume is increased linearly and by increasing the spillway angle, its volume decreased. The results of multi-objective optimization model showed that in the current plan of Siah-Bisheh Dam spillway, the remaining energy and the volume of spillway criteria were considered well. So that 83.7 percent of the flow energy is dissipated.

**Keywords:** NSGA-II Algorithm, Two Objective Optimization, Upstream Siah-Bisheh Dam, Stepped Spillway, Simulation-Optimization Model

## توسعه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز دو هدفه برای طراحی بهینه ابعاد هندسی و شیب سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا با استفاده از الگوریتم NSGA-II

زهرا سهرابی<sup>۱</sup>، جواد سروریان<sup>۱\*</sup>، جعفر مامی‌زاده<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۳۰)

### چکیده

به منظور عبور ایمن جریان سیلاب از بالادست به پایین‌دست سدها از سازه سرریز استفاده می‌شود. در بین انواع سرریز، در سرریزهای پلکانی جریان حین عبور از روی سازه نیز مستهلک می‌گردد. این امر موجب کاهش هزینه تاسیسات مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست آن مانند حوضچه آرامش خواهد شد. علاوه بر استهلاک انرژی، عامل تاثیرگذار دیگر در طراحی سرریز پلکانی که در تحقیقات انجام شده کمتر بدان پرداخته شده است، حجم و هزینه سرریز پلکانی می‌باشد. بهترین حالت طراحی سرریز پلکانی آنست که انرژی باقیمانده حداقل و حجم و هزینه اجرای سرریز نیز حداقل گردد. بنابراین طراحی سرریزهای پلکانی یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه است. در تحقیق حاضر از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز دوهدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II به منظور رسیدن به کمترین انرژی باقی مانده در پنجه سرریز و حصول کمترین حجم سرریز استفاده شد. نتایج حاصله بیانگر آن بود که با افزایش ارتفاع نسبی پله‌های سرریز، مقدار انرژی باقیمانده در پنجه سرریز ابتدا افزایش و بعد از رسیدن به یک نقطه اوج، کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت برسد. از منظر حجم و هزینه سرریز نیز، با افزایش ارتفاع نسبی پله‌های سرریز، حجم آن بصورت تابع خطی افزایش و با افزایش زاویه سرریز حجم آن کاهش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی چند هدفه نشان داد که در طراحی فعلی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا، هم معیار انرژی باقیمانده و هم معیار هزینه و حجم سرریز به‌خوبی لحاظ گردیده‌اند. بطوری که ۸۳/۷ درصد انرژی جریان عبوری از روی سرریز مستهلک می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم NSGA-II، بهینه‌سازی دوهدفه، سد ساه‌بیشه بالا، سرریز پلکانی، مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز.

### مقدمه

به‌منظور عبور جریان‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها از سازه سرریز استفاده می‌شود که باید کارایی و راندمان بالایی در انتقال جریان داشته باشد. از بین تمامی انواع سرریزها، سرریز پلکانی<sup>۱</sup> علاوه بر انتقال جریان اضافی مخزن سد، به عنوان یک سازه مستهلک کننده انرژی نیز عمل می‌نماید. از این رو هزینه‌های مربوط به ساخت و بهره‌برداری سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست سرریز کاهش یافته و یا کاملاً حذف خواهد شد (Khatsumia, 2004 and Frizell et al., 2012). علاوه بر این مزیت اصلی سرریزهای پلکانی، مقرون به صرفه بودن ساخت آن‌ها نسبت به سرریزهای صاف می‌باشد. این امر به دلیل استفاده از بتن متراکم غلطکی (RCC<sup>۲</sup>) در ساخت و اجرای سرریزهای پلکانی است (Frizell et al., 2012). راندمان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی به پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی مانند ارتفاع و طول

پله‌های سرریز، زاویه (شیب) سرریز، دبی جریان عبوری از سرریز و زبری سطح پله‌های سرریز بستگی دارد. از بین تمامی عوامل فوق، ارتفاع پلکان و زاویه سرریز بیشترین نقش را در استهلاک جریان عبوری از روی سرریز دارا می‌باشند (Chanson, 2002). در زمینه برآورد خصوصیات جریان و تعیین میزان استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی پژوهش‌های زیادی در قالب مدل فیزیکی، مدل عددی و ... انجام گرفته است. Pegram et al. (1999) با ساخت دو سرریز پله‌ای با مقیاس متفاوت به بررسی تاثیر مشخصات هندسی پله‌ها و اثر مقیاس بر روی جریان و میزان افت انرژی پرداختند. شیب هر دو سرریز ۱/۰۶ و ارتفاع پله‌ها از ۲۵ سانتی‌متر تا ۲ متر متغیر در نظر گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که در محدوده دبی منظور شده، استهلاک انرژی مستقل از ارتفاع پلکان سرریزها بوده و با افزایش شیب سرریز میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. Ohtsu et al. (2004) با بررسی مشخصات جریان رویه‌ای

\* نویسنده مسئول: j.sarvarian@ilam.ac.ir

1. Stepped spillway  
2. Roller-Compacted Concrete

سرریز پلکانی بر روی استهلاک انرژی با استفاده از مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد در تعداد پله‌های برابر با افزایش شیب اثر ارتفاع سرریز بر استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین معلوم شد تاثیر شیب سرریز و عدد رینولدز در تخمین استهلاک انرژی مهم‌تر از سایر پارامترها هستند.

Sori and Mojtabehi (2015) برای ارزیابی تاثیر پارامترهای عمق بحرانی، تعداد پله‌ها و شیب کف پله‌ها، با ثابت نگه‌داشتن نسبت طول و ارتفاع کلی سرریز، از مدل Flow-3D برای تحلیل میدان جریان استفاده کردند. نتایج حاصله بیانگر آن بود که با افزایش مقدار دبی، میزان استهلاک انرژی کمتر می‌شود و با افزایش تعداد پلکان و شیب معکوس روی هر پله، استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. در ادامه این تحقیق، اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری با استفاده از سیستم استنتاج فازی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارد. Tabari and Tavakoli (2016) به منظور بررسی تاثیر تعداد، ارتفاع و طول پله‌ها و همچنین دبی در واحد عرض بر روی استهلاک انرژی در یک سرریز پلکانی ساده، از مدل عددی Flow-3D استفاده کردند و رابطه بین استهلاک انرژی و عمق بحرانی جریان را تعیین نمودند. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش دبی جریان، افزایش تعداد پله‌ها و کاهش ارتفاع پله‌ها، استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد.

Mooselu et al. (2019) یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز چندهدفه فازی را برای تعیین بهینه پارامترهای سرریز پلکانی مانند ارتفاع پله‌ها و تعداد پله‌های سرریز سد جره در استان خوزستان ایران توسعه دادند. در این تحقیق عدم قطعیت‌های مربوط به سیلاب طراحی نیز در نظر گرفته شد.

در تحقیقات داخلی و خارجی اشاره شده فوق، هدف از شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی، رسیدن به استهلاک انرژی بیشتر یا کمترین انرژی جریان در انتهای سرریز بوده و در هیچ یک از پژوهش‌های فوق به جنبه اقتصادی بودن طرح سرریز پلکانی پرداخته نشده است. این در حالی است که هزینه اجرا عاملی مهم و تاثیرگذار در طراحی سرریزهای پلکانی می‌باشد. این هزینه تابع مستقیمی از حجم مصالح سرریز است. در تحقیق حاضر علاوه بر انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز، حجم مصالح مورد استفاده در ساخت سرریز پلکانی نیز جزو اهداف طراحی سرریز پلکانی در نظر گرفته شده و بر این اساس بهترین حالت طراحی پلکان و شیب سرریز تعیین می‌گردد. بدین منظور از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز مبتنی بر الگوریتم NSGA-II استفاده

بر روی سرریز پلکانی با زوایای ۵/۷ تا ۵۵ درجه و با شیب، ارتفاع پله و دبی معلوم روابطی برای تعیین میزان باقیمانده انرژی جریان در پایین دست سازه سرریز پلکانی در دو حالت جریان شبه‌یکنواخت و غیریکنواخت ارائه کرده و در نهایت یک روش گام به گام برای طراحی سرریز پلکانی پیشنهاد کردند. نتایج حاصله بیانگر آن بود که در جریان شبه‌یکنواخت انرژی باقی مانده به زاویه سرریز و نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی بستگی دارد و در جریان غیریکنواخت مقدار انرژی باقیمانده علاوه بر موارد فوق به ارتفاع سقوط نسبی سرریز نیز بستگی دارد.

Chatila and Jurdi (2004) با مدل‌سازی فیزیکی و مقایسه سرریز صاف و پلکانی با ارتفاع پله‌های متفاوت به این نتیجه رسیدند که تعداد پله‌ها، فاکتور غالب در توسعه انرژی سینماتیک جریان است و بنابراین می‌توان از ابعاد حوضچه پایین دست کم کرد. Haddad et al., (2005) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بررسی بهترین ترکیب از متغیرهای طراحی سرریز پلکانی به منظور کمینه کردن هزینه ساخت سازه پرداختند و بهترین ابعاد مستهلک کننده انرژی در پایین دست را تعیین نمودند. آن‌ها با تایید توانایی این الگوریتم در مقایسه با روش‌های دیگر، استفاده از این روش را توصیه کردند.

Azhdary Moghaddam et al. (2011) برای تاثیر دبی، شیب سرریز، تعداد و آرایش پله و همچنین زبری پله بر روی استهلاک انرژی، تعداد ۱۱۲ مدل سرریز (۹۶ عدد پلکانی و ۱۶ عدد صاف) را در محیط نرم افزار فلوئنت تهیه کردند. مدل‌های پلکانی دارای آرایش، اندازه پله و شیب‌های متفاوتی بودند. بررسی آن‌ها نشان داد دبی و شیب سرریز تاثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی دارد و در دبی‌های بالاتر تعداد و آرایش پله‌ها تاثیر کمتری دارد. در نهایت با در نظر گرفتن پارامترهای موثر، ترکیب منطقی از این پارامترها برای حصول بیشتر استهلاک انرژی پیشنهاد گردید.

Shoja et al. (2012) یک سرریز پلکانی بهینه را برای سد ساروق طراحی و مدل‌سازی کردند. مقایسه این سرریز با سرریز صاف فعلی بیانگر میزان تاثیر به‌سزای سرریز پلکانی در استهلاک انرژی بود. آن‌ها ارتفاع پله و زاویه مناسب را برای دبی‌های مختلف آزموده و میزان استهلاک انرژی هر یک را محاسبه کردند. تحلیل حساسیت تابع هدف نشان داد که استهلاک نسبی انرژی بر روی سرریز پلکانی به ازای دبی ثابت، مستقل از ارتفاع بهینه پله‌ها بوده و با افزایش شیب سرریز کاهش می‌یابد. همچنین به ازای شیب‌های ثابت، افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی و ارتفاع بهینه پله‌ها می‌شود.

Salmasi and Arvanaghi (2013) به بررسی اثر شیب

می‌شود.

بصورت زیر تعریف می‌شوند:

(رابطه ۴)

$$\begin{cases} A = -1.7 \times 10^{-3}\theta^2 + 6.4 \times 10^{-2}\theta - 1.5 \times 10^{-1} \\ f_{\max} = -4.2 \times 10^{-4}\theta^2 + 1.6 \times 10^{-2}\theta + 3.2 \times 10^{-2} \end{cases} \text{ for } 5.7 \leq \theta \leq 19 \text{ } \theta \text{ in degree}$$

(رابطه ۵)

$$\begin{cases} A = 0.452 \\ f_{\max} = 2.32 \times 10^{-5}\theta^2 - 2.75 \times 10^{-3}\theta + 2.31 \times 10^{-1} \end{cases} \text{ for } 19 \leq \theta \leq 55 \text{ } \theta \text{ in degree}$$

- جریان غیریکنواخت:

$$5 + \left[ \left( \frac{E_{res}}{y_c} \right)_u - 1.5 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right] \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$m = -\frac{\theta}{25} + 4 \quad \theta \text{ in degree} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه فوق،  $H_{dam}$  ارتفاع سرریز و  $H_e$  ارتفاع سقوط

نسبی مورد نیاز برای تشکیل جریان شبه یکنواخت بوده و با

استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

(رابطه ۸)

$$\frac{H_e}{y_c} = (-1.21 \times 10^{-5}\theta^3 + 1.6 \times 10^{-3}\theta^2 - 7.13 \times 10^{-2}\theta + 1.3)^{-1} \left[ 5.7 + 6.7 \exp\left(-6.5 \frac{h}{y_c}\right) \right]$$

اگر  $H_{dam} \geq H_e$  جریان شبه یکنواخت و در غیر اینصورت

جریان تشکیل شده بر روی سرریز پلکانی غیریکنواخت می‌باشد.

پس از تعیین باقیمانده انرژی جریان در پایین دست سرریز، شکل

ریاضی تابع هدف اول بصورت زیر می‌باشد:

$$\min(F_1) = E_{res} \quad (\text{رابطه ۹})$$

هدف دوم مساله بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه سرریز

می‌باشد که تابع مستقیم ابعاد و اندازه سرریز است. به عبارت دیگر

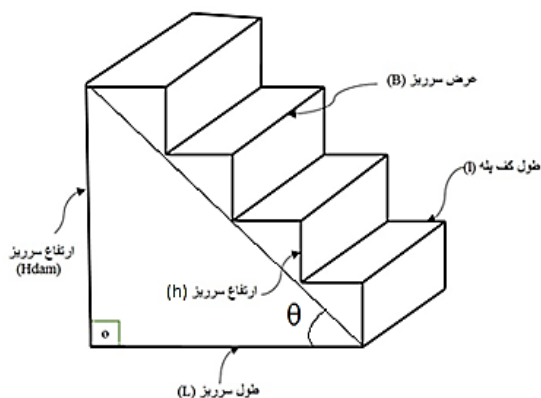
تابع هدف دوم، حداقل‌سازی حجم مصالح سرریز می‌باشد که به-

صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$V_t = B \times h \sum_{i=1}^N (L - l_i) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این رابطه  $V_t$  حجم کل سرریز و  $N$  تعداد پله‌های سرریز

می‌باشد. بقیه پارامترها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. پارامترهای هندسی سرریز پلکانی

## مواد و روش‌ها

مساله تحقیق حاضر یک مساله بهینه‌سازی دوهدفه است و برای ارزیابی فضای جواب‌های مساله از توابع ارزیاب انرژی باقیمانده و حجم سرریز استفاده می‌شود. در این گونه مسایل بر خلاف مسایل تک‌هدفه بهینه‌سازی، جواب نهایی یک نقطه بهینه نخواهد بود و مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب تحت عنوان جبهه پارتو، جواب مساله را تشکیل می‌دهند. در ادامه المان‌های مساله بهینه‌سازی شامل توابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود بهینه‌سازی تشریح می‌گردند.

### توابع هدف و متغیرهای تصمیم

هدف اول مساله بهینه‌سازی، حداقل‌سازی باقیمانده انرژی جریان یا حداکثرسازی استهلاک انرژی جریان در پایاب سرریز می‌باشد. به منظور محاسبه باقیمانده انرژی جریان در پنجه سرریز در این تحقیق از رابطه ارائه شده توسط Ohtsu et al. (2004) استفاده می‌شود که جریان روی سرریز پلکانی به دو نوع شبه یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم‌بندی می‌شود. برای تفکیک بین این دو حالت از جریان از عمق انتهایی جهش در پایین دست سرریز استفاده می‌شود. در صورتی که با تغییر ارتفاع پلکان و زاویه سرریز پلکانی، نسبت عمق انتهایی جهش در پایین دست سرریز به عمق بحرانی مقدار ثابتی داشته باشد، جریان در حالت شبه یکنواخت است. مرز بین جریان شبه یکنواخت و غیریکنواخت بر روی سرریز پلکانی نسبت ارتفاع سقوط نسبی (رابطه ۸) در زیر است. مقدار انرژی باقیمانده جریان در پایین دست سرریز با استفاده از روابط زیر تعیین می‌گردد (Ohtsu et al., 2004).

- جریان شبه یکنواخت:

$$\left( \frac{E_{res}}{y_c} \right)_u = \left( \frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در روابط فوق،  $E_{res}$  باقیمانده انرژی جریان،  $\theta$  زاویه سرریز،  $y_c$  عمق بحرانی و  $f$  فاکتور اصطکاکی می‌باشد. در رابطه فوق برای مقادیر  $\theta \leq 19$  از  $\cos(\theta)$  صرف نظر می‌شود. مقدار  $f$  تابعی از زاویه سرریز و نسبت ارتفاع نسبی پله‌ها  $\left(\frac{h}{y_c}\right)$  بوده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$f = f_{\max} - A \left( 0.5 - \frac{h}{y_c} \right)^2 \quad \text{for } 0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq 0.5 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$f = f_{\max} \quad \text{for } 0.5 \leq \frac{h}{y_c} \leq \left( \frac{h}{y_c} \right)_s \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط فوق،  $h$  ارتفاع پله‌ها بوده و متغیرهای  $A$  و  $f_{\max}$

نامغلوب<sup>۴</sup> و فاصله ازدحامی<sup>۵</sup> تشکیل شده و در هر مرحله ارتقا می‌یابد.

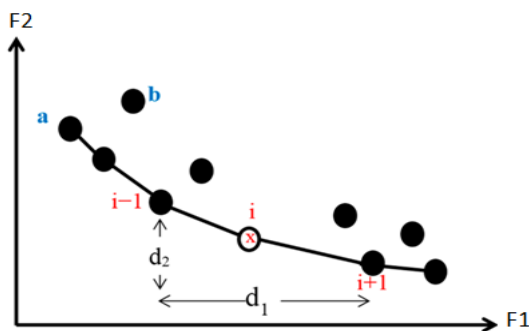
اساس روش مرتب‌سازی نامغلوب بر مفهوم غلبه است و جواب‌هایی که نه بدترند و نه بهتر، به صورت نامغلوب از نظر کیفیت و نظم مرتب می‌شوند. این جواب‌ها اولین مرز از مرزهای نامغلوب را تشکیل می‌دهند و فرآیند تا زمانی که تمام جواب‌ها درون مرزهای نامغلوب قرار گیرند ادامه می‌یابد (Deb et al. 2000).

فاصله ازدحامی برای سنجش تراکم و نظم جواب‌ها در جبهه پارتو مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر اساس متوسط فاصله هر جواب از هر دو جواب مجاور محاسبه می‌گردد. مقدار فاصله ازدحامی ( $d_i$ ) برای توابع هدف  $F_1$  و  $F_2$  بر اساس شکل (۲) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$d_i^1 = \frac{|F_1^{i+1} - F_1^{i-1}|}{F_1^{\max} - F_1^{\min}} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$d_i^2 = \frac{|F_2^{i+1} - F_2^{i-1}|}{F_2^{\max} - F_2^{\min}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$



شکل ۲. فاصله ازدحامی اعضای جبهه پارتو (Deb et al. 2000)

شش گام اساسی در الگوریتم NSGA-II عبارتند از: ۱- تولید جمعیت اولیه؛ ۲- محاسبه معیارهای برازندگی با استفاده از توابع هدف؛ ۳- اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب؛ ۴- محاسبه پارامتر فاصله ازدحامی؛ ۵- انتخاب والدین برای انجام تولید مثل؛ ۶- اعمال عملگرهای تلاقی و جهش. فلوجارت الگوریتم NSGA-II در تحقیق حاضر، به شکل زیر خواهد بود.

برای نیل به اهداف تحقیق حاضر و بر اساس فلوجارت فوق، یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز دوهدفه در محیط نرم‌افزار MATLAB تهیه گردید که در آن هر عضو از جامعه با توابع شبیه‌ساز انرژی باقیمانده جریان و حجم سرریز مورد ارزیابی قرار گرفته و از این مقادیر در سیکل الگوریتم NSGA-II استفاده می‌گردد.

پس از تعیین حجم سرریز، شکل ریاضی تابع هدف دوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\min (F_2) = V_t \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

همانطور که در روابط (۹) و (۱۱) مشاهده می‌شود، توابع هدف وابسته به مشخصات هندسی پلکان و شیب سرریز می‌باشند. از این رو، پارامترهای ارتفاع پلکان سرریز و زاویه سرریز به عنوان متغیرهای تصمیم در تحقیق حاضر در نظر گرفته می‌شوند. این متغیرها مقدار معلوم و مشخصی نداشته و در فرآیند تصمیم‌گیری تاثیرگذار هستند.

### قیود

قیدهای منظور شده در تحقیق حاضر، از نوع قیود هندسی بوده که بر روی متغیرهای تصمیم اعمال می‌گردند. تحقیقات Ohtsu et al. (2004) نشان داد که ارتفاع پله تا حد معلومی روی انرژی جریان عبوری از روی سرریز تأثیر دارد و ارتفاع بیشتر از آن تنها باعث افزایش حجم و هزینه سرریز می‌گردد. حداقل و حداکثر ارتفاع پله به عنوان یکی از قیود این بررسی به شرح زیر است:

$$h_{\min} = 0.1 * y_c \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$h_{\max} = \left(\frac{h}{y_c}\right)_s * y_c \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در رابطه فوق  $\left(\frac{h}{y_c}\right)_s$  رابطه تفکیک جریان ریزشی<sup>۱</sup> و غیرریزشی (روبه‌ای)<sup>۲</sup> و به صورت زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6} (\tan \theta)^{\frac{1}{6}} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

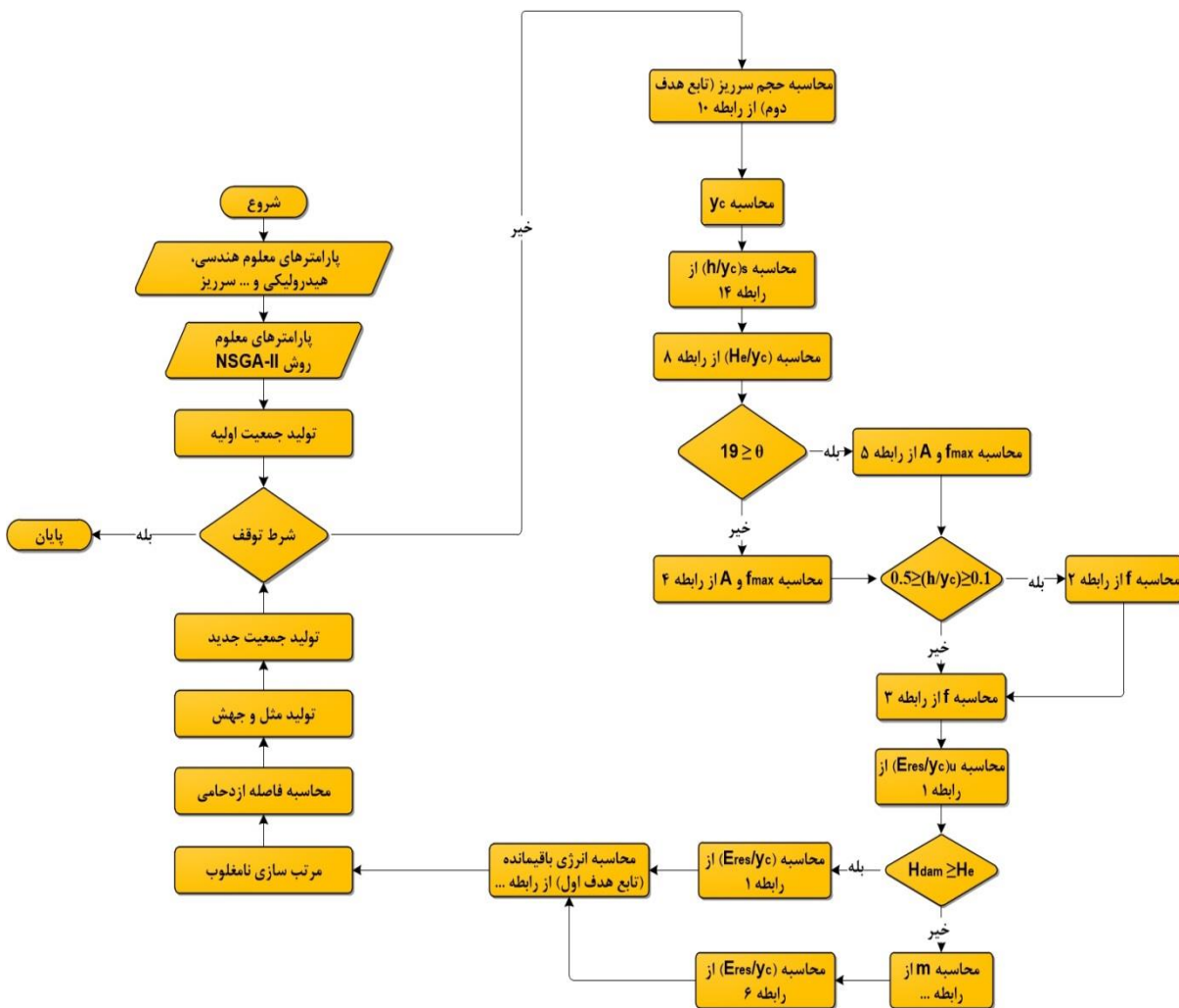
قید فوق علاوه بر تأثیر روی انرژی جریان، به عنوان معیاری که شرایط جریان روبه‌ای بر روی سرریز پلکانی را ایجاد می‌نماید نیز عمل می‌کند. لازم به ذکر است که روابط فوق در محدوده زاویه سرریز  $5.7 \leq \theta \leq 55$  توسط اوتسو و همکاران ارائه شده و این محدوده نیز به عنوان قید بر روی زاویه سرریز در تحقیق حاضر اعمال می‌گردد.

### الگوریتم NSGA-II<sup>۳</sup>

به منظور حل مساله بهینه‌سازی دوهدفه تحقیق حاضر از روش فراابتکاری مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) که توسط Deb et al. (2000) ارائه گردید، استفاده می‌شود. در این الگوریتم که یکی از پرستفاده‌ترین روش‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است، می‌توان از کلیه عملگرهای الگوریتم ژنتیک مانند انتخاب، تلاقی، جهش و... برای رسیدن به جواب بهینه بهره برد. جبهه پارتو در این روش بر اساس دو مفهوم کلیدی مرتب‌سازی

4. Non-dominated sorting  
5. Crowding distance

1. Jet flow or Nappe flow  
2. Skimming flow regime  
3. Non-dominated sorting genetic algorithm-II



شکل ۳. فلوجارت برنامه NSGA-II در تحقیق حاضر

### مطالعه موردی

در این تحقیق از اطلاعات سرریز پلکانی سد سیاه بیشه بالا استفاده می‌شود. سد و نیروگاه سیاه بیشه تنها نیروگاه تلمبه خیره‌ای کشور است. این سد در استان مازندران و ۱۰ کیلومتری شمال تونل کندوان در مسیر رودخانه چالوس احداث شده است. مهمترین هدف از ایجاد این طرح ایجاد تعادل در شبکه مصرفی برق کشور است. شکل (۴) موقعیت جغرافیایی سد سیاه بیشه را بر روی نقشه ایران نشان می‌دهد. شیب سرریز سد سیاه بیشه بالا ۱:۳ (شیب ۱۸/۴۳ درجه)، ارتفاع سرریز ۴۲/۸ متر، طول سرریز ۲۰ متر و دبی طراحی سرریز ۲۰۳ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. ارتفاع پلکان سرریز ۰/۷ متر و طول پلکان ۲/۱ متر است.

### نتایج و بحث

تغییرات انرژی باقی مانده به ازای ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز در شکل (۵-الف) انرژی باقی مانده در پنجه سرریز سد سیاه بیشه بالا در شیب ثابت سرریز (۱:۳) و به ازای تغییر ارتفاع نسبی پله‌ها

( $\frac{h}{y_c}$ ) نشان داده شده است. علاوه بر این تغییرات انرژی باقی مانده در ارتفاع پله ثابت (۰/۷ متر) و به ازای زوایای مختلف نیز در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. موقعیت سرریز سد سیاه بیشه بالا نیز توسط نقطه قرمز رنگ بر روی اشکال مشخص شده است. در شکل (۵-الف) با افزایش ارتفاع نسبی پله‌های سرریز، انرژی باقیمانده در پنجه سرریز کاهش یافته است. دلیل این امر تکامل و رشد گردابه‌های چرخشی ایجاد شده در جریان روبه‌ای بر روی پله‌هاست. با کاهش ارتفاع پله‌ها گردابه‌های چرخشی ایجاد شده کوچک‌تر شده و مقدار انرژی باقی مانده بیشتر می‌شود. پس از ثفرسیدن به ارتفاع نسبی ۰/۵، انرژی باقیمانده به مقدار ثابتی رسیده است. این امر بیانگر آنست که از یک ارتفاع پله مشخص به بعد، استهلاک انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی ناچیز بوده و تنها حجم و هزینه سرریز افزایش می‌یابد.

شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه مقدار انرژی باقی مانده افزوده شده است. زاویه بیشتر باعث کوتاه شدن مسیر حرکت جریان روی سرریز پلکانی شده و در نتیجه انرژی

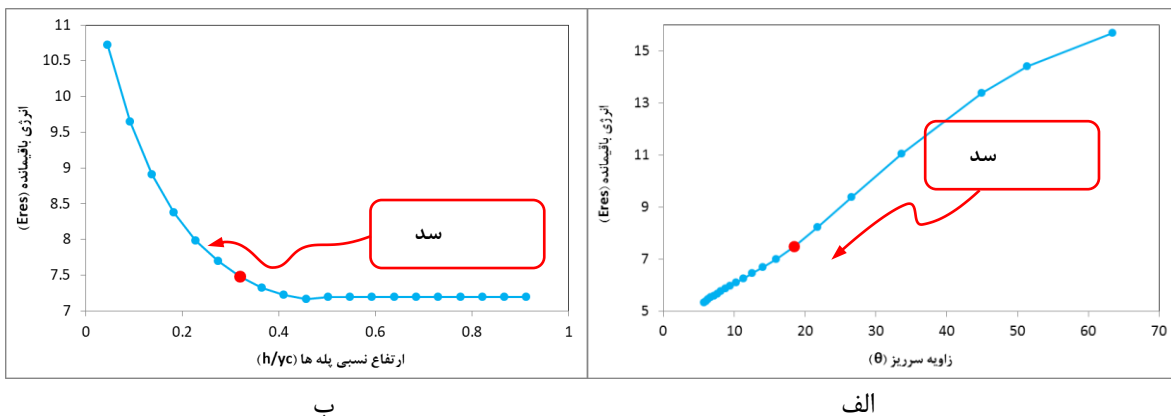


Salmasi and Azhdary Moghaddam *et al.* (2011) (2013) و arvanaghi و Tabari and Tavakoli (2016) مطابقت دارد.

باقی مانده زمان کافی برای مستهلک شدن ندارد. بعد از زاویه ۴۵ درجه، شیب منحنی مذکور مقداری کاهش یافته است. این برداشت با نتیجه تحقیق Pegram *et al.* (1999) دارد.



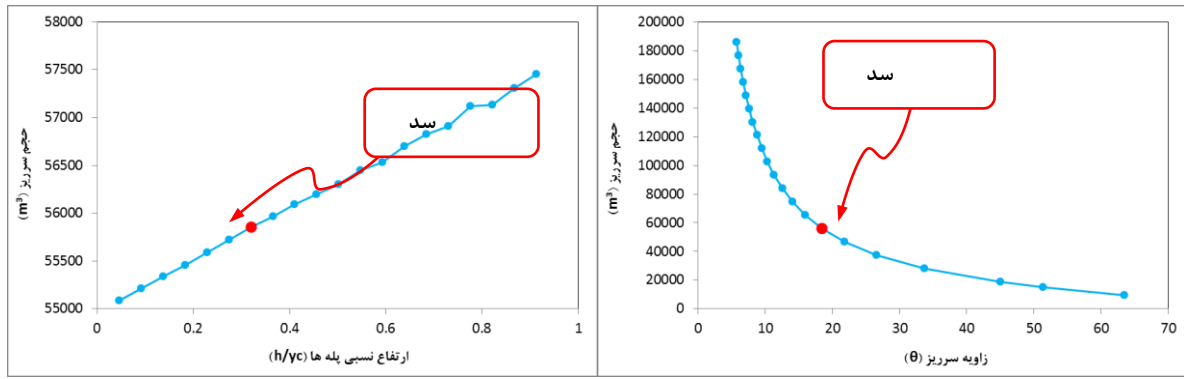
شکل ۴. سد سیاه بیشه و موقعیت آن بر روی نقشه ایران



شکل ۵. تغییرات انرژی باقی مانده نسبت به ارتفاع نسبی پله های سرریز سد سیاه بیشه بالا (الف) تغییرات انرژی باقی مانده به ازای زوایای مختلف سرریز سد سیاه بیشه بالا (ب)

تغییرات حجم سرریز به ازای ارتفاع پله ها و شیب سرریز در شکل (۶-الف) حجم سرریز پلکانی سد سیاه بیشه بالا در شیب ثابت سرریز (۱:۳) و به ازای تغییر ارتفاع نسبی پله ها ( $\frac{h}{y_c}$ ) نشان داده شده است. علاوه بر این، تغییرات حجم در ارتفاع پله ثابت ( $0.7$  متر) و به ازای زوایای مختلف نیز در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. موقعیت سرریز سد سیاه بیشه بالا نیز توسط نقطه قرمز رنگ بر روی اشکال مشخص شده است.

موقعیت سد سیاه بیشه بالا بر روی شکل (۵) نشان می دهد که ارتفاع پلکان و زاویه سرریز این سد دارای مقادیر مناسبی هستند. به طوری که ۸۳/۷ درصد انرژی جریان هنگام عبور از روی سرریز پلکانی سد سیاه بیشه بالا مستهلک می گردد. این امر بیانگر کارایی موثر این سازه در سدها می باشد که در تحقیقات Pegram *et al.* (1999), Ohtsu *et al.* (2004), Shoja *et al.* (2012), Chatila and Jurdi (2004) و ... نیز بدان



شکل ۶. تغییرات حجم نسبت به ارتفاع نسبی پله‌های سرریز سد سیاه بیشه بالا (الف) تغییرات حجم به ازای زوایای مختلف سرریز سد سیاه بیشه بالا (ب)

حفظ تنوع خصوصیات و کم نشدن دقت، تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰ منظور شد. مقادیر نهایی احتمال تلاقی و جهش در این تحقیق نیز با استفاده از روش Taguchi, (1986) به دست آمده است. در جدول (۱) نوع عملگرها و ضرایب به کار رفته در در برنامه NSGA-II نشان داده شده است.

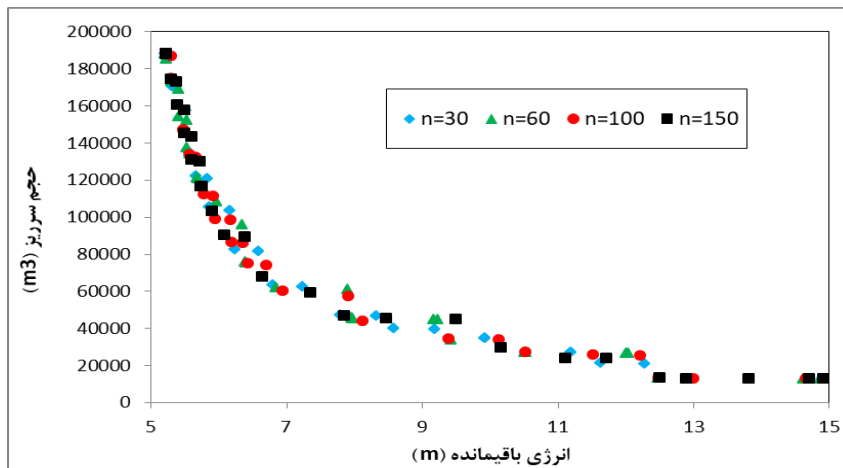
جدول ۱. پارامترهای ورودی برنامه بهینه‌ساز NSGA-II

تعداد نسل (تکرار)	۲۰۰
تعداد جمعیت	۱۰۰
نوع عملگر انتخاب	مسابقه‌ای <sup>۱</sup>
نوع عملگر تلاقی	تک نقطه‌ای
ضریب احتمال تلاقی	۰/۸
نوع عملگر جهش	یکنواخت
ضریب احتمال جهش	۰/۰۲
نوع تابع ازدحامی	distancecrowding
تعداد اعضای جبهه پارتو	۳۰
شرط توقف الگوریتم	رسیدن به حداکثر تعداد نسل

با توجه به شکل (۶-الف)، با افزایش ارتفاع نسبی پله‌های سرریز، حجم آن نیز افزایش پیدا می‌کند و این رابطه در تحقیق حاضر به صورت خطی می‌باشد. در شکل (۶-ب) افزایش زاویه سرریز موجب کاهش طول سرریز در شیب‌های زیاد و در نتیجه کاهش حجم سرریز گردیده است. شیب منحنی این شکل پس از زاویه ۱۵ درجه رو به کاهش گذاشته که این امر بیانگر آنست که در شیب‌های بالاتر از این مقدار، کاهش حجم سرریز ناچیز خواهد بود. موقعیت سد سیاه‌بیشه بالا بر روی شکل (۶) نشان می‌دهد که ارتفاع پلکان و زاویه سرریز این سد تا حدی مناسب می‌باشد به طوری که منجر به ساخت سرریز با حجم و هزینه نسبتاً پایین گردیده است.

نتایج مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز

پارامترهای ورودی مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز شامل مشخصات هیدرولیکی و هندسی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا و پارامترهای ورودی برنامه بهینه‌ساز می‌باشد. برای تعیین دقیق‌تر تعداد اعضای اولیه، تحلیل حساسیت انجام گرفت که نتیجه آن در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس این شکل و به منظور



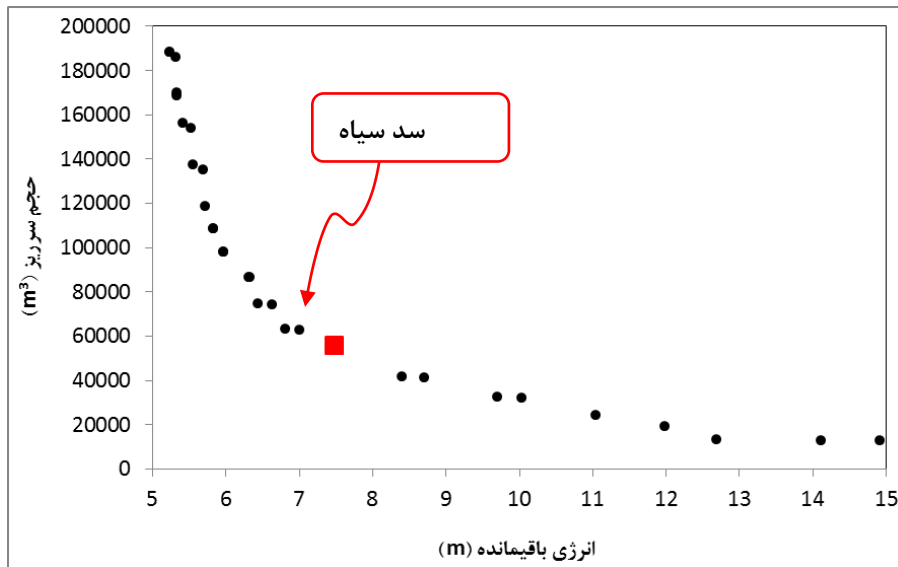
شکل ۷. تغییرات جبهه پارتو به ازای تغییرات جمعیت اولیه الگوریتم NSGA-II



شکل نشان‌دهنده توزیع خوب جواب‌ها بر روی جبهه پارتو است. با توجه به میزان انرژی باقیمانده (۷/۵ متر) و حجم فعلی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا (۵۵۸۵۱/۱ متر مکعب) مشاهده می‌شود که در طرحی فعلی، هم معیار انرژی باقیمانده و هم معیار هزینه و حجم سرریز بخوبی لحاظ گردیده‌اند. در جدول (۲) جواب‌های نهایی واقع بر جبهه پارتو و مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز پلکانی منطبق با هر جواب ارائه شده است.

جبهه پارتو متشکل از حداقل انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز و حداقل حجم سرریز در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل موقعیت سد سیاه‌بیشه بالا نیز با نقطه قرمز رنگ مشخص گردیده است.

شکل محدب جبهه پارتو به خاطر نوع توابع هدف می‌باشد که در این تحقیق هر دو از جنس حداقل (min-min) هستند. این



شکل ۸. جبهه پارتوی برنامه بهینه‌ساز NSGA-II

جدول ۲. مقادیر نهایی مساله بهینه‌سازی NSGA-II برای سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا

ردیف	زاویه (deg)	ارتفاع پله (m)	انرژی باقیمانده (m)	درصد استهلاک انرژی	حجم سرریز (m³)	ردیف	زاویه (deg)	ارتفاع پله (m)	انرژی باقیمانده (m)	درصد استهلاک انرژی	حجم سرریز (m³)
۱	۵/۷۰	۱/۰۹	۵/۳۳	۸۸/۴	۱۷۰۰۰۸/۲۸	۱۶	۱۸۸۲۰۸/۲۶	۸۸/۷	۵/۲۳	۱/۰۹	۵/۷۰
۲	۱۹/۱۰	۰/۷۶	۷/۰۱	۸۴/۸	۶۲۸۶۸/۰۱	۱۷	۵۳۸۲۲/۲۰	۸۳/۸	۷/۴۵	۰/۷۶	۱۹/۱۰
۳	۵۵/۰۰	۰/۲۲	۵/۹۷	۸۷/۰	۹۸۰۰۱/۲۰	۱۸	۱۲۸۹۱/۹۰	۶۷/۶	۱۴/۹۲	۰/۲۲	۵۵/۰۰
۴	۱۰/۸۴	۱/۰۹	۸/۴۰	۸۱/۸	۴۱۷۶۰/۰۸	۱۹	۹۸۱۳۶/۱۳	۸۷/۰	۵/۹۷	۱/۰۹	۱۰/۸۴
۵	۴۴/۰۴	۱/۰۶	۶/۴۳	۸۶/۰	۷۴۵۸۳/۰۴	۲۰	۱۹۴۰۴/۹۴	۷۴/۰	۱۱/۹۹	۱/۰۶	۴۴/۰۴
۶	۱۴/۱۴	۰/۷۶	۵/۷۲	۸۷/۶	۱۱۸۸۴۱/۹۴	۲۱	۷۳۹۷۹/۴۷	۸۵/۶	۶/۶۲	۰/۷۶	۱۴/۱۴
۷	۷/۷۸	۱/۰۹	۵/۲۳	۸۸/۷	۱۸۸۲۰۸/۲۶	۲۲	۱۳۷۵۱۰/۶۰	۸۸/۰	۵/۵۵	۱/۰۹	۷/۷۸
۸	۳۰/۱۶	۱/۰۹	۵/۳۳	۸۸/۴	۱۶۸۶۵۹/۵۲	۲۳	۳۲۳۲۳/۸۶	۷۹/۰	۹/۷۰	۱/۰۹	۳۰/۱۶
۹	۳۰/۱۸	۰/۷۶	۶/۳۱	۸۶/۳	۸۶۵۸۰/۶۱	۲۴	۳۲۰۴۹/۷۶	۷۸/۲	۱۰/۰۴	۰/۷۶	۳۰/۱۸
۱۰	۵۵/۰۰	۰/۷۶	۵/۸۳	۸۷/۳	۱۰۸۴۴۶/۳۳	۲۵	۱۳۰۴۷/۵۶	۷۲/۵	۱۲/۶۹	۰/۷۶	۵۵/۰۰
۱۱	۲۴/۲۵	۰/۷۶	۱۴/۱۲	۶۹/۴	۱۲۹۳۳/۹۵	۲۶	۴۱۳۵۸/۵۳	۸۱/۱	۸/۷۰	۰/۷۶	۲۴/۲۵
۱۲	۹/۸۰	۱/۰۹	۵/۶۹	۸۷/۷	۱۳۵۳۴۶/۲۶	۲۷	۱۰۸۶۹۳/۰۵	۸۷/۴	۵/۸۳	۱/۰۹	۹/۸۰
۱۳	۶/۹۰	۰/۷۶	۵/۴۱	۸۸/۳	۱۵۶۲۸۴/۶۸	۲۸	۱۵۳۹۶۰/۲۱	۸۸/۰	۵/۵۲	۰/۷۶	۶/۹۰
۱۴	۳۷/۵۹	۱/۰۷	۵/۳۱	۸۸/۵	۱۸۵۹۱۱/۳۰	۲۹	۲۴۳۸۶/۲۱	۷۶/۰	۱۱/۰۴	۱/۰۷	۳۷/۵۹
۱۵	۱۲/۱۷	۰/۷۷	۶/۸۱	۸۵/۲	۶۳۴۰۵/۸۷	۳۰	۸۶۴۲۲/۱۶	۸۶/۳	۶/۳۲	۰/۷۷	۱۲/۱۷

## نتیجه‌گیری

و شیب سرریز کمتر باشد، طول آن بیشتر بوده و حجم آن نیز بیشتر خواهد بود. نتایج بهینه‌سازی چند هدفه نیز نشان داد که جواب‌ها بر روی جبهه پارتو دارای نظم خوبی بوده و بخوبی توزیع شده‌اند به طوری که با افزایش انرژی باقیمانده در پنجه سرریز، حجم سرریز کاهش یافته است. با توجه به میزان انرژی باقی مانده و حجم مصالح فعلی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا، مشاهده می‌شود که در طرحی فعلی، هم معیار انرژی باقیمانده و هم معیار هزینه و حجم سرریز بخوبی لحاظ گردیده‌اند. به طوری که ۸۳٪ درصد انرژی جریان عبوری از روی سرریز مستهلک می‌شود. هر یک از نقاط جبهه پارتو می‌تواند پاسخ مساله بهینه‌سازی تحقیق حاضر باشد و طراح می‌تواند بر اساس معیارهای فنی و محدودیت‌های اقتصادی، یکی از این جواب‌ها را انتخاب نماید که در شرایط حاکم بر پروژه بیشترین منافع را داشته باشد.

## REFERENCES

- Azhdary Moghaddam, M., Shahheydari, H., & Jafari Nodushan, E. (2011), Investigation on effect of Discharge, spillway's slope and step's characteristics on the Ogee-stepped spillway on energy dissipation by applying numerical models, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 1(4), 23-34.
- Chanson, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*, A. A. Balkema Publishers, Tokyo.
- Chatila, J. G., & Jurdi, B. R. (2004). Stepped spillway as an energy dissipater. *Canadian Water Resources Journal*, 29(3), 147-158.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *International conference on parallel problem solving from nature* (pp. 849-858). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Frizell, K. W., Renna, F. M., & Matos, J. (2012). Cavitation potential of flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 630-636.
- Haddad, O. B., Sharifi, F., & Naderi, M. (2005). Optimum design of stepped spillways using genetic algorithm. In *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Evolutionary Computing*, Lisbon, Portugal (pp. 325-331).
- Khatsuria, R. M. (2004). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Marcel Dekker, New York, USA.
- Mooselu, M. G., Nikoo, M. R., Rayani, N. B., & Izady, A. (2019). Fuzzy Multi-Objective Simulation-Optimization of Stepped Spillways Considering Flood Uncertainty. *Water Resources Management*, 1-15.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Takahashi, M. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 860-869.
- Pegram, G. G., Officer, A. K., & Mottram, S. R. (1999). Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 125(5), 500-510.
- Salmasi, F., & Arvanaghi, H. (2013), Effect of Slope on Energy Dissipation over Stepped Spillway, *Iranian Journal of Water and Environmental engineering*, 1(1), 47-56.
- Shoja, F., Salmasi, F., Farsadizadeh, D., nazemi, A., & Sadraddini, A. (2012), Optimal Design of Stepped Spillways for Maximizing Energy Dissipation Using Genetic Algorithm, *Water and Soil Science*, 22(4), 60-83.
- Sori, N., & Mojtahedi, A. (2015), Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(3), 25-40.
- Tabari, M. M. R., & Tavakoli, S. (2016). Effects of stepped spillway geometry on flow pattern and energy dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1215-1224.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*, Quality Resources.
- Water Research Institute of Ministry of Energy, (2005), *Hydraulic Model of Flood Discharge System of Upstream and Downstream Siah-Bisheh Dams*, Iran, Final Reports.