طراحی بهینه سرریز های پلکانی جهت حداکثر سازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

فریناز شجاع[1]، فرزین سلماسی[2]، داود فرسادی زاده[3]، امیر حسین ناظمی[4] و علی اشرف صدر الدینی[5]

تاریخ دریافت:88/05/17 تاریخ پذیرش: 90/03/23

[1]- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

[2و3و5]- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

[4]- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده

در این تحقیق عرض و ارتفاع پله‌ها و همچنین شیب و ارتفاع سرریز به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد و سعی گردید روشی جامع برای طراحی بهینه سرریزهای پلکانی ارائه شود. بدین منظور یک برنامه کلی در محیط برنامه نویسی Matlab نوشته شد. در این برنامه، برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. یک سرریز پلکانی با ابعاد بهینه، به جای سرریز صاف سد مخزنی ساروق واقع در استان آذربایجان غربی طراحی گردید. نتایج نشان داد که سرریز پلکانی منجر به افزایش استهلاک انرژی و کاهش ابعاد مستهلک کننده انرژی در پایین دست گردیده است. همچنین به ازای دبی ثابت و شیب‌های مختلف، تغییرات ارتفاع بهینه پله‌ها نامحسوس بوده است. 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 افزایش ارتفاع بهینه پله‌ها می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که به ازای شیب 11/3 درصد و دبی جریان 422 متر مکعب بر ثانیه، ارتفاع مناسب پله‌ها 1/6 متر و استهلاک نسبی انرژی 60/4 درصد بدست می‌آید. به ازای همان شیب ولی دبی جریان 776/9 متر مکعب بر ثانیه (دبی طرح)، ارتفاع مناسب پله‌ها 2/25 متر و استهلاک نسبی انرژی 43/7 درصد بدست می‌آید.

واژه های کلیدی: استهلاک انرژی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، سرریز پلکانی، Matlab.

Optimal Design of Stepped Spillways for Maximizing Energy Dissipation Using Genetic Algorithm

F Shoja[1], F Salmasi [2*], D Farsadizadeh[3], AH Nazemi[4], AA Sadraddini[5]

Received: 8 August 2009 Accepted: 13 June 2011

[1-]MSc of hydraulic structures, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.
[2,3,5-] Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.
[4-] Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

Abstract

In the present study, the width and height of steps, also the slope and height of spillways are considered as varied parameters, and has been tried to represent a comprehensive method for optimal designing of stepped spillways. For this reason, a complete program has been written in Matlab programming environment. In this program, Genetic Algorithm has been used for optimization. A stepped spillway with optimized dimensions was designed instead of a smooth spillway of Saroogh Reservoir Dam, which is located in West Azarbaijan province. The results showed that the replaced stepped spillway led to increase the energy dissipation and declined the dimensions of energy dissipator at toe of the stepped spillway. Also, for a constant discharge and varying slope, the variation of optimum height of steps was negligible. The sensitivity analysis of objective function showed that the relative energy dissipation on the stepped spillway for a constant discharge was independent of optimum height of steps and it was decreasing by increasing the slope of spillway. Also, increasing the discharge led to decrease the energy dissipation and increased the optimum height of steps for a constant slope. Results show with the slope 11.3 (%) and discharge 422 m^3/s, the proper step height is 1.6 m and energy dissipation is 60.42 (%). With the same slope but discharge 776.9 m^3/s (design discharge), proper step height is 2.25 m and energy dissipation is 43.7 (%).

Keywords: Energy dissipation, Genetic Algorithm, Matlab, Optimization, Stepped spillway.

مقدمه

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پایین دست سرریز ادامه دارد. استهلاک بالای انرژی از جمله مهمترین ویژگی این نوع سرریز به‌شمار می‌رود، به طوری که بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان حین عبور آب از روی پله‌های متوالی به پایین دست سرریز کاهش می‌یابد. با احداث سرریزهای پلکانی نیازی به استفاده از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین دست سرریز نبوده و یا اینکه منجر به کاهش ابعاد این سازه می‌گردد، که این خود کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت و بهره-برداری سرریز و سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پایین دست سرریز را به دنبال دارد.

با توجه به اهمیت روزافزون این سرریزها تحقیقات و مطالعات فراوانی در رابطه با هیدرولیک جریان و عوامل موثر بر استهلاک انرژی، در سرریزهای پلکانی صورت پذیرفته است. تحقیقات انجام گرفته، مبتنی بر آزمایشات هیدرولیکی بر روی مدل‌های فیزیکی بوده و یا عملکرد هیدرولیکی جریان بر روی این سرریز توسط روش‌های عددی شبیه‌سازی شده است. هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی سه نوع می-باشد (راجاراتنام 1990 و چانسون 1994):

1- جریان ریزشی: این نوع جریان در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می شود. استهلاک انرژی بر اثر اختلاط جت جریان با هوا، تلاطم جریان روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص روی هر پله ایجاد می‌شود.

2- جریان غیر ریزشی یا شبه صاف: در این نوع جریان یک بستر کاذب[1] که آستانه انتهایی پله‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌سازد، تشکیل می‌گردد. در زیر این بستر کاذب جریان های گردابی تشکیل می‌شود، به طوری که قسمت اعظم انرژی جنبشی جریان بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی در زیر بستر کاذب مستهلک می‌شود.

3- جریان تبدیلی: این جریان حد واسط دو نوع جریان ریزشی و غیر ریزشی بوده و از نظر طراحی اهمیت چندانی ندارد.

پگرام و همکاران (1999) تحقیق جامعی را با هدف بررسی تاثیر مشخصات هندسی پله‌ها و اثر مقیاس بر روی نوع جریان و میزان افت انرژی، با فرض ایجاد شرایط تعادل در پایین‌دست تندآب پله‌ای انجام دادند. برای انجام این تحقیق دو سری سرریز پله‌ای با شیب 0/6 : 1 (افقی:عمودی) و با شکل مشابه، با ارتفاع پله‌های 0/25 تا 2 متر و با مقیاس 1:10 و1:20 ساخته شده و مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین اتلاف انرژی در سرریز پلکانی با سرریز اوجی صاف مقایسه شد.

در این تحقیق با اندازه‌گیری انرژی جریان در پایین دست سرریز پلکانی و اوجی مشابه از نظر ابعاد، میزان اتلاف انرژی در سرریز پلکانی بیشتر از سرریز صاف گزارش شده است. همچنین نتایج حاصله نشان داد که استهلاک انرژی با افزایش شیب سرریز کاهش می‌یابد. درصد استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با ارتفاع 58 متری از مقدار 60% به ازای m =0/3 y_c به 54% برای m =3/5 y_c کاهش می یابد. درصد استهلاک انرژی (EDR) از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$EDR = \frac{100 \times \left(E_1^{sm} - E_1^{st}\right)}{E_1^{sm}} \qquad [1]$$

که در این رابطه E_1^{sm} انرژی جریان در پایین‌دست سرریز صاف، E_1^{st} انرژی جریان در پایین‌دست سرریز پلکانی می‌باشند.

تابارا و همکاران (2005) روش اجزاء محدود[2] را برای محاسبه پروفیل جریان آب بر روی سرریز پلکانی بکار گرفتند. آنها برای محاسبه پروفیل سطح آب بر روی سرریز پلکانی از نرم افزار *ADINA-f* بهره گرفتند. پروفیل سطح آب محاسبه شده در مورد همه سرریزهای پلکانی ساخته شده از لحاظ کیفی منطبق با خصوصیات جریان بوده و از لحاظ کمی نیز مشابه با مقادیر اندازه گیری شده پروفیل سطح آزاد جریان بود. علاوه بر این، استهلاک نسبی انرژی نیز محاسبه و با مقادیر بدست آمده از آزمایش مورد مقایسه قرار گرفت که مطابقت خوبی بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردید.

صادقی (1382) افت انرژی در سرریزهای پلکانی را با کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی بررسی نمود. در این تحقیق هدف تولید، تربیت و آموزش شبکه‌های عصبی به منظور تخمین افت انرژی بر روی سرریز پلکانی بوده که این کار با استفاده از یک سری داده های

[1] Pseudo -bottom

[2] Finite Elements

آماری صورت گرفت. دقت نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی می تـوان اقـدام به تعیین میزان استهلاک انرژی و طراحـی ایـن سـرریز نمود.

اوهوتسو و همکاران (2004) روشی را برای طراحی سرریزهای پلکانی ارائه کردند، به این ترتیب که به ازای مقادیر ثابت شیب، عرض، ارتفاع سرریز، ارتفاع پله‌ها و دبی جریان در سرریز، مقدار انرژی باقی مانده، عمق و سرعت آب در پایین‌دست سرریز پلکانی محاسبه می‌شود. این محققین روش طراحی گام به گام سرریز پلکانی را با معادلات هیدرولیکی برای طراحان ارائه داده‌اند، در صورتی که بهینه‌سازی سرریز پلکانی جهت دستیابی به بیشترین میزان استهلاک انرژی در الگوریتم طراحی مورد توجه نبوده است.

هدف از این تحقیق ارائه روشی برای بهینه‌سازی هندسی سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک است به‌نحوی که بیشترین استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی به ازای بهترین ترکیب از پارامترهای موثر در طراحی این سرریزها ایجاد شود.

مواد و روش‌ها

تعریف مسئله بهینه سازی

الف) تابع هدف

دبی طراحی سرریز معمولاً دبی حداکثر سیل با دوره بازگشت معین (10000 سال در تحقیق جاری) می‌باشد. با توجه به این موضوع، دبی طراحی به عنوان پارامتر معلوم در نظر گرفته شد. از آنجایی که نوع جریان بر روی سرریز پلکانی به ازای دبی طراحی از نوع غیر ریزشی است، لذا طراحی بهینه سرریز در شرایط جریان غیر ریزشی انجام می‌گیرد. هدف از بهینه‌سازی سرریز پلکانی عبارت از تعیین ابعاد بهینه سرریز برای حداکثرسازی استهلاک نسبی انرژی است. رابطه بکار گرفته شده در این تحقیق به عنوان تابع هدف برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی به فرم زیر می‌باشد (اوهوتسو و همکاران 2004):

$$\frac{\Delta E}{E_{\max}} = \frac{E_{\max} - E_{res}}{E_{\max}} = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5\, y_c} = 1 - \frac{E_{res}}{y_c} \times \left(\frac{H_{dam}}{y_c} + 1.5 \right)^{-1} \qquad [2]$$

$$E_{res} = f(a, w, h, H_{dam}, H_d) \qquad [3]$$

E_{res}: مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز که تابعی از شیب سرریز (a)، عرض سرریز (w)، ارتفاع پله‌ها (h)، ارتفاع سرریز (H_{dam}) و بار آبی (H_d) است. $\Delta E / E_{res}$: استهلاک نسبی انرژی، H_{dam} / y_c: پارامتر بدون بعد نسبت ارتفاع سرریز به عمق بحرانی است. در رابطه فوق $H_{dam} = H_{chute} + 2.66$ می باشد که H_{chute} مطابق شکل 1 ارتفاع سرریز می‌باشد.

جریان غیر ریزشی به دو حالت شبه یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم می‌شود. جهت تفکیک این دو حالت از رابطه زیر استفاده می‌شود (اوهوتسو و همکاران 2004):

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{nu} = 1.5 + \left(\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{u} - 1.5 \right) \times \left(1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^{m} \right) \qquad [4]$$

$$m = -\frac{a}{25} + 4$$

در رابطه فوق، h / y_c پارامتر بدون بعد نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی و a شیب سرریز در فاصله $5.7 \le a \le 55$ درجه است. m ضریب متغیر و وابسته به شیب سرریز، H_e بار آبی در هر نقطه روی سرریز می‌باشند. H_e / y_c پارامتر بدون بعدی بوده که برای تفکیک دو جریان شبه یکنواخت و غیریکنواخت در سرریزهای پلکانی به کار گرفته می‌شود. به این ترتیب که اگر $\frac{H_{dam}}{y_c} \ge \frac{H_e}{y_c}$ باشد، جریان از نوع شبه یکنواخت

و اگر چنانچه $0.5 \le \frac{H_{dam}}{y_c} \le \frac{H_e}{y_c}$ باشد جریان از نوع غیر یکنواخت است. با توجه به دو نوع جریان بر روی سرریز پلکانی، نحوه محاسبه E_{res} در شرایط جریان شبه یکنواخت و غیر یکنواخت متفاوت بوده و محاسبه E_{res} در هر یک از این شرایط به صورت زیر است (اوهوتسو و همکاران 2004):

- جریان شبه یکنواخت:

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_I = \left(\frac{f}{8\times\sin a}\right)^{\frac{1}{3}} \times \cos a + \frac{1}{2} \times \left(\frac{f}{8\times\sin a}\right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{نوع A} \quad [5]$$

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_{II} = \left(\frac{f}{8\times\sin a}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{f}{8\times\sin a}\right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{نوع B} \quad [6]$$

شرایط جریان غیر ریزشی با تغییر شیب و پارامتر بدون بعد h/y_c تغییر می‌کند. اگر شیب سرریز در محدوده $19 < a \le 55$ درجه باشد، پروفیل سطح آب مستقل از پارامتر بدون بعد h/y_c بوده و خطوط جریان تا حد زیادی به موازات بستر کاذب می‌باشند که این حالت از جریان به نوع A معروف است. اگر شیب سرریز در محدوده $5.7 \le a \le 19$ درجه باشد بسته به اینکه پروفیل سطح آب به موازات بستر کاذب است یا نه به نوع A یا B تقسیم می‌شود. جریان نوع A به ازای h/y_c کم ایجاد می‌شود و اگر نسبت h/y_c افزایش یابد جریان از نوع B خواهد بود.

- جریان غیر یکنواخت:

$$\left(\frac{E_{res}}{d_c}\right)_{nu} = 1.5 + \left(\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right) - 1.5\right) \times \left(1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e}\right)^m\right) \quad [7]$$

$$m = -\frac{a}{25} + 4$$

در روابط ارائه شده f ضریب اصطکاک سرریز می‌باشد که مقدار آن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$f = f_{\max} - A\left(0.5 - \frac{h}{y_c}\right)^2, \; 0.1 \le \frac{h}{y_c} \le 0.5 \quad [8]$$

$$f = f_{\max}, \; 0.5 \le \frac{h}{y_c} \le \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad [9]$$

در این روابط $f_{\max}$ حداکثر ضریب اصطکاک و A ضریبی است که طبق روابط زیر تعیین می‌شوند $(5.7^o \le a \le 19^o)$:

$$A = -1.7\times10^{-3}a^2 + 6.4\times10^{-2}a - 1.5\times10^{-1} \quad [10]$$
$$For \quad 5.7^o \le a \le 19^o$$

$$f_{\max} = -4.2\times10^{-4}a^2 + 1.6\times10^{-2}a + 3.2\times10^{-2} \quad [11]$$
$$For \quad 5.7^o \le a \le 19^o$$

$$A = 0.452 \quad [12]$$
$$f_{\max} = 2.32*10^{-5}a^2 - 2.75*10^{-3}a + 2.31*10^{-1}$$
$$For \quad 19^o < a \le 55^o$$

در رژیم جریان غیر ریزشی جهت تفکیک دو نوع جریان A و B از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_B = 13\times(\tan a)^2 - 2.73\times(\tan a) + 0.373 \quad [13]$$
$$For \quad 5.7 \le a \le 19$$

ب) قیدهای مسئله

منظور از قید مجموعه‌ای از محدودیت‌ها می‌باشد که به هر یک از پارامترهای تابع هدف می‌توان اختصاص داد. قیدهای مسئله به شرح زیر می‌باشند:

1- جریان ایجاد شده بر روی سرریز باید از نوع غیر ریزشی باشد. بر این اساس رابطه زیر بایستی برقرار باشد.

$$0.25 \le \left(\frac{h}{y_c}\right) \le \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad [14]$$

جهت تعیین $(h/y_c)_s$ از رابطه زیر بهره می‌گیریم:

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6}(\tan a)^{\frac{1}{6}} \quad [15]$$
$$5.7 \le a \le 55$$

اگر چنانچه پارامتر مربوط به ارتفاع پله (h) با $x(3)$ نشان داه شود فرم کلی قیدی که وارد برنامه می-شود به صورت زیر می‌باشد:

$$g(1) = x(3) - y_c \times \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \le 0 \qquad [16]$$

$$g(2) = 0.25 \times y_c - x(3) \le 0 \qquad [17]$$

2- دبی واحد عرض سرریزهای پلکانی نباید بیش از 30 متر مکعب بر ثانیه بر متر باشد. چنانچه پارامتر مربوط به عرض (w) را با $x(2)$ نشان دهیم قید مربوط به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{Q}{w} \le 30 \qquad [18]$$

$$g(3) = Q - 30 \times x(2) \le 0 \qquad [19]$$

3- معادله سرریزها در حالت کلی به صورت $Q = C.W.H_d^{\left(\frac{3}{2}\right)}$ می‌باشد 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 بهینه-سازی می‌باشد، تغییر در عرض سرریز باعث تغییر در H_d که در نهایت 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 را با $x(5)$ نشان بدهیم، خواهیم داشت:

$$g(4) = Q - C \times x(2) \times (x(5))^{\frac{3}{2}} \le 0 \qquad [20]$$

در این تحقیق برای تعیین ضریب تخلیه سرریز، از مقادیر ارائه شده توسط USBR (بی‌نام 1987) استفاده شده است. جهت کاربرد این مقادیر در برنامه بهینه‌سازی، اقدام به تعیین رابطه بین ضریب تخلیه و P/H_d بر اساس مقادیر ارائه شده توسط USBR (بی-نام 1987) ، با نرم افزار Curve Expert گردید. رابطه حاصل به فرم زیر است که در آن مقدار C در سیستم متریک می‌باشد:

$$C = 0.4564 \times \left(4.7801131 - \exp\left(-3.8216156 \times \left(\frac{P}{H_d}\right)\right)\right) \qquad [21]$$
$$(R^2 = 0.992)$$

مقدار P در بهینه‌سازی سرریز ثابت و معادل 4/8 متر در نظر گرفته شده است.

4- فضایی که جهت ساخت سرریز اختصاص داده می‌شود نیز می‌تواند جزو محدودیت‌های مسئله باشد. به این ترتیب 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، در صورتی‌که ارتفاع شوت سرریز (H_{chute}) با $x(4)$ و شیب آن (a) با $x(1)$ نشان داده شود، رابطه زیر را می‌توان ارائه نمود:

$$L = \frac{H_{chute}}{\tan(a)} \qquad [22]$$

$$g(5) = x(4) - L \times \tan(x(1)) \le 0 \qquad [23]$$

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی موثر در فضاهای بسیار بزرگ است که در نهایت منجر به جهت گیری به سمت پیدا کردن جواب بهینه می‌گردد. این الگوریتم با شبیه‌سازی فرآیندهای بقای اصلح در علم زیست‌شناسی اقدام به یافتن مناسب‌ترین پاسخ یک مسئله می‌نماید. در نظام طبیعی با انتخاب اصلح موجوداتی که شایستگی بالاتری دارند، امکان بقاء و تولید مثل بیشتری پیدا می‌کنند و پس از چندین نسل به درجه شایستگی بالاتری می‌رسند. فرآیند طبیعی انتخاب اصلح با ترکیب عملگرهای ژنتیک شبیه‌سازی می‌شوند و

ترکیب آنها فرآیند طبیعی انتخاب اصلح را کپی می‌نماید. مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک به شرح زیر می‌باشد:

1- مسئله به زبان ژنتیک بیان می‌شود. متغیرهای مسئله کدگذاری می‌شوند و معمولا به صورت ژن‌های متشکل از صفر و یک بیان می‌شوند (سیواناندام ودیپا 2008):

2- جمعیتی[1] شامل n کروموزوم به طور تصادفی ایجاد می‌شود.

3- تابع شایستگی[2] f(x) برای کروموزومی مانند x محاسبه می‌شود.

4- جمعیت جدید با گام های زیر تولید می‌شود:

- انتخاب[3]: دو کروموزوم بر اساس شایستگی والد انتخاب می‌شوند. کروموزوم های با شایستگی بالاتر شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارند.
- پیوند یا تلاقی[4]: انجام یا عدم انجام پیوند با یک عدد تصادفی مشخص می‌گردد. در صورت انجام پیوند، والدین به فرزندان جدید تبدیل می‌گردند و اگر پیوند انجام نگیرد، فرزندان دقیقا نسخه‌ایی از والدین خود خواهند بود.
- جهش[5]: انجام یا عدم انجام جهش با یک عدد تصادفی مشخص می‌گردد. جهش برخی از اجزای فرزندان جدید را تغییر می‌دهد.
- پذیرش: فرزندان جدید در جمعیت جدید جای می‌گیرند.

5- جمعیت جدید تولید شده برای اجرای مراحل بعدی به کار گرفته می‌شوند.

6- اگر شرط نهایی ارضاء شود، فرایند متوقف و بهترین جواب جمعیت ارائه می‌شود.

7- در صورت ارضاء نشدن شرط، فرایند از گام دوم در یک حلقه تکرار می‌شود.

با مشخص شدن تابع هدف و روند محاسباتی آن و همچنین مشخص شدن قیدهای مسئله، m-file برنامه در نرم افزارMatlab نوشته شد، به طوری که متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله، به صورت توابعی از x وارد این برنامه می‌شوند. بعد از مشخص شدن تعداد متغیرهای مسئله، جهت تعیین ترکیب بهینه از این متغیرها به نحوی که میزان استهلاک نسبی انرژی به ماکزیمم مقدار خود برسد، از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم افزار Matlab استفاده می‌شود. با توجه به این که روند بهینه‌سازی در جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقدار مینیمم می‌باشد، جهت حل این مشکل در برنامه نوشته شده تابع هدف در (1-) ضرب گردیده است. بعد از وارد کردن اطلاعات مورد نیاز در جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کار خود را جهت انجام جستجو آغاز کرده و روند انجام محاسبات تا زمانی که هر یک از شرایط مربوط به توقف الگوریتم ارضاء نشده‌اند، ادامه می‌یابد. انتخاب گزینه‌های مختلف در جعبه ابزار که مشخص کننده تعداد جمعیت و احتمال جهش و پیوند و... می‌باشند نیز از طریق سعی و خطا تعیین می‌شوند (بی‌نام 2007). مقادیر پارامترها و نوع توابع الگوریتم ژنتیک که ترکیبی از آنها برای بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی بکار برده شده، در جدول 1 ارائه شده است.

در این تحقیق جهت بهینه‌سازی از مشخصات یک سرریز صاف به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. سرریز مذکور مربوط به سد ساروق است که در استان آذربایجان‌غربی و در 17 کیلومتری شمال‌غربی شهرستان تکاب واقع شده است. ارتفاع سرریز از تاج تا کف حوضچه آرامش 27/8 متر، عرض آن 26 متر، شیب آن 10/66 درصد و بار آبی طرح روی آن 5/6 متر است. دبی‌های بهینه‌سازی معادل 560/2، 776/9 و 422 متر مکعب بر ثانیه می‌باشند که به‌ترتیب دبی طراحی سرریز مذکور با دوره بازگشت 10000 ساله، دبی

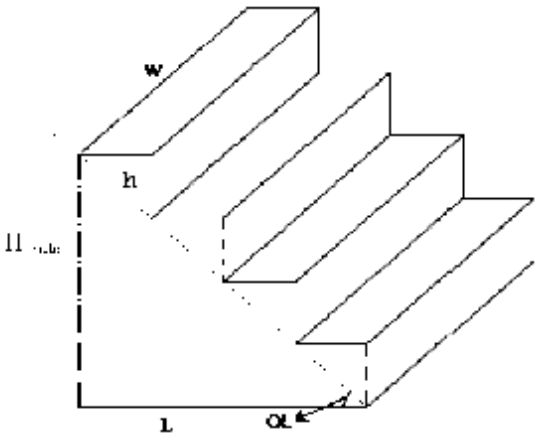
[1] Population
[2] Fitness scaling
[3] Selection
[4] Crossover
[5] Mutation

حداکثر سیل محتمل (PMF) و دبی با دوره بازگشت 1000 ساله می‌باشند (بی‌نام 1383).

جدول1- مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد جمعیت	100
تابع شایستگی	مرتبه‌ای
تابع انتخاب	چرخ رولت
روش تلاقی	دو نقطه‌ایی
نرخ تلاقی	0/916
میزان به چینی[1]	2
نرخ جهش	0/084
تعداد نسل‌ها[2]	150

طراحی بهینه سرریز پلکانی بر اساس مشخصات سرریز سد ساروق با کاربرد الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. فضای شدنی برای هر یک از متغیرهای طراحی یا تصمیم‌گیری با استفاده از مطالعات اولیه و نقشه‌های مربوط به طراحی سرریز و ساختگاه آن تعیین شد. طرح شماتیک سرریز پلکانی و پارامترهایی که به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بکار برده شده اند، در شکل 1 نشان داده شده است. حدود مورد قبول برای متغیرهای طراحی در روند بهینه‌سازی این سرریز در جدول 2 ارائه شده است.



شکل1- طرح شماتیک سرریز پلکانی با متغیرهای بهینه سازی

جدول2- حدود مورد قبول برای متغیرها در روند بهینه‌سازی

متغیرها	حد پایین	حد بالا
شیب سرریز (x_1)	(%) 10/33	(%) 17/63
عرض سرریز (x_2)	(m) 20	(m) 26
ارتفاع پله ها (x_3)	(m) 0/20	(m) 3
ارتفاع شوت (x_4)	(m) 24	(m) 26
بار آبی روی سرریز (x_5)	(m) 4	(m) 5/80

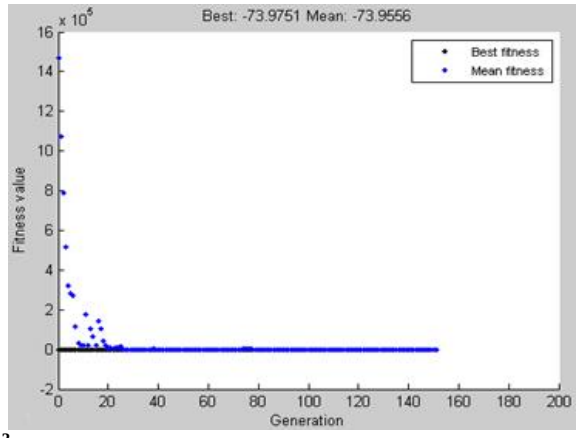
نتایج و بحث

در این قسمت ابعاد بهینه طراحی شده برای سرریز پلکانی با طول‌های افقی مختلف ارائه شده است. برنامه بهینه‌سازی جهت رسیدن به بالاترین مقدار استهلاک نسبی انرژی با دبی سیل طراحی 560/2 متر مکعب بر ثانیه و طول افقی سرریز L=230m، چندین بار اجرا شد که از بین تکرارهای انجام گرفته تکرار 55 بیشترین مقدار استهلاک را نشان داد. هر تکرار شامل 150 نسل می‌باشد که با تولید هر نسل تابع شایستگی

[1] Elitism
[2] Generation

به سمت مقدار بهینه حرکت می‌کند و در نهایت عملیات اجرایی ژنتیک زمانی متوقف می‌شود که تابع شایستگی در چندین نسل متوالی به مقداری ثابت رسیده و دیگر تغییر نکند. شکل 2 مربوط به نمایش منوی حاصله از تکرار 55 می‌باشد. این نمودار تغییرات تابع شایستگی را در نسل‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که مقدار تابع شایستگی به مقداری ثابت رسیده باشد. این نمودار نشان می‌دهد که بهبود تابع شایستگی تا تکرار 30 انجام گرفته و سرعت همگرایی خوب است.

با اجرای برنامه بهینه‌سازی مقادیر بهینه شیب سرریز، عرض سرریز، ارتفاع پله ها، ارتفاع سرریز و بار آبی روی سرریز تعیین شد. با استفاده از این نتایج می توان سایر عوامل مورد نیاز برای طراحی سرریز را نیز بدست آورد. برنامه بهینه‌سازی به ازای طول‌های افقی 220، 210 و200 متر نیز اجرا شد که در هر یک از این حالت‌ها بعد از تکرار 50 جواب‌های بهینه حاصل شد. جدول 3 نتایج حاصل از اجرای برنامه بهینه‌سازی را برای طول‌های افقی مختلف و دبی سیل طراحی 560/2 متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد.

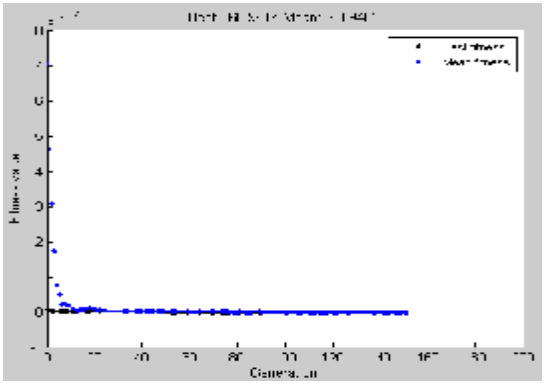


شکل2- نحوه بهبود و همگرایی مقدار تابع شایستگی برای L=230m و Q =560/2 m^3/s

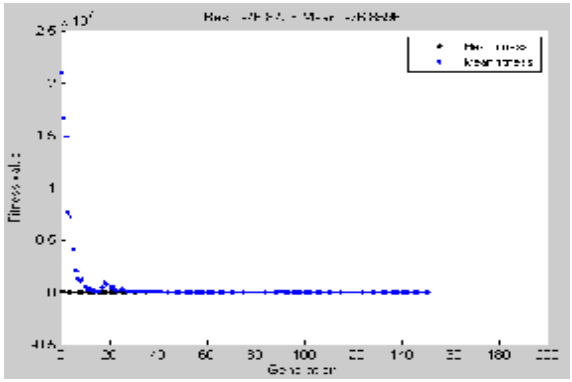
به منظور بررسی تاثیر دبی بیشتر و کمتر از دبی طراحی در روند بهینه‌سازی و استهلاک نسبی انرژی، عملیات بهینه‌سازی به ازای دبی حداکثر سیل محتمل PMF و سیل با دوره بازگشت 1000 ساله نیز انجام شد. بدین منظور، دبی‌های 776/9 و 422 متر مکعب بر ثانیه به‌عنوان ورودی برنامه بهینه‌سازی درنظر گرفته شد. سپس مقادیر بهینه به ازای طول‌های مختلف، بعد از چندین بار تکرار، تعیین شدند. نحوه همگرایی تابع شایستگی و رسیدن به مقدار بهینه به ازای طول‌های افقی مورد نظر در شکل های 3 و 4 آورده شده است. نتایج بهینه‌سازی سرریز پله‌ای با دبی‌های 776/9 و 422 متر مکعب بر ثانیه در جداول 4 و 5 ارائه شده است.

جدول3- نتایج بهینه سازی سرریز پلکانی با طول های افقی مختلف و Q =560/2 m^3/s

پارامتر	مشخصات سرریز صاف	مشخصات سرریز پلکانی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک			
		L=200 (m)	L=210 (m)	L=220 (m)	L=230 (m)
ارتفاع سرریز (m) ($H_{dam}= H_{chute}+ 2/66$)	27/8	28/66	28/66	28/66	28/58
عرض سرریز(w) (m)	26	25/66	25/98	25/86	25/9
شیب سرریز(α)(%)	10/66	13/00	12/38	11/82	11/27
ارتفاع پله ها(h) (m)	-	1/85	1/84	1/83	1/81
ارتفاع بار آبی (H_d) (m)	5/6	4/67	4/64	4/65	4/65
طول افقی پله ها(l) (m)	-	14/23	14/86	15/48	15/54
تعداد پله ها (N)	-	14/10	14/10	14/20	14/40
ارتفاع دیواره جانبی(H_w) (m)	2/50	2/82	2/80	2/81	2/82
عمق آب در پایین دست سرریز(d) (m)	1/13	1/82	1/82	1/83	1/84
سرعت در پای سرریز(v) (m/s)	19/00	12/00	11/88	11/82	11/74
عدد فرود در پای سرریز(F_r)	5/71	2/84	2/82	2/79	2/76
طول حوضچه آرامش (m)	50/00	38/75	38/25	38/21	37/99
ارتفاع دیواره های حوضچه آرامش (m)	8/50	6/46	6/375	6/37	6/33
انرژی کل در بالا دست سرریز(E_{total}) (m)	33/23	34/13	34/089	34/11	34/02
(m) E_{res}	19/53	9/15	8/99	8/94	8/86
$100*\Delta E/E_{total}$	41/23	73/18	73/61	73/79	73/97
$EDR = \frac{100 \times \left(E_{res}^{\ smooth} - E_{res}^{\ stepped}\right)}{E_{res}^{\ smooth}}$	-	%53/12	%54	%54/2	%54/66



شکل 3- نحوه بهبود و همگرایی مقدار تابع شایستگی برای L=230m و Q =776/9 m^3/s



شکل 4- نحوه بهبود و همگرایی مقدار تابع شایستگی برای L=230m و Q =422 m^3/s

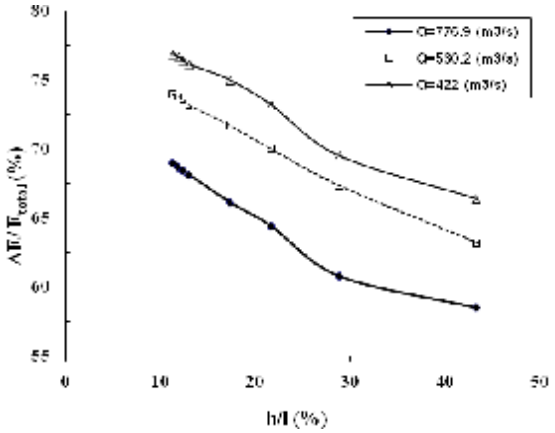
جدول4- نتایج بهینه سازی سرریز پلکانی با طول های افقی مختلف و Q =776/9 m^3/s

پارامتر	مشخصات سرریز پلکانی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک			
	L=200 (m)	L=210 (m)	L=220 (m)	L=230 (m)
ارتفاع سرریز (m) ($H_{dam}= H_{chute}+ 2/66$)	28/66	28/66	28/66	28/66
عرض سرریز(w) (m)	25/99	25/99	25/99	25/99
شیب سرریز(α)(%)	13	12/38	11/82	11/30
ارتفاع پله ها(h) (m)	2/28	2/25	2/25	2/25
ارتفاع بار آبی (H_d) (m)	5/78	5/78	5/78	5/78
طول افقی پله ها (l) (m)	17/54	18/25	19/00	19/86
تعداد پله ها (N)	11/4	11/56	11/58	11/56
ارتفاع دیواره جانبی(H_w) (m)	3/48	3/48	3/47	3/48
عمق آب در پایین دست سرریز(d) (m)	2/24	2/26	2/27	2/285
سرعت در پای سرریز(v) (m/s)	13/34	13/25	13/16	13/1
عدد فرود در پای سرریز(F_r)	2/85	2/81	2/79	2/76
طول حوضچه آرامش (m)	47/78	47/55	47/34	47/14
ارتفاع دیواره های حوضچه آرامش (m)	8/00	7/92	7/89	7/86
انرژی کل در بالا دست سرریز(E_{total}) متر	35/41	35/41	35/41	35/41
(E_{res}) (m)	11/29	11/18	11/10	10/99
($100*\Delta E/E_{total}$)	68/12	68/42	68/70	68/96
$EDR=\frac{100\times\left(E_{res}^{\ smooth}-E_{res}^{\ stepped}\right)}{E_{res}^{\ smooth}}$	%42/14	%42/75	%43/16	%43/73

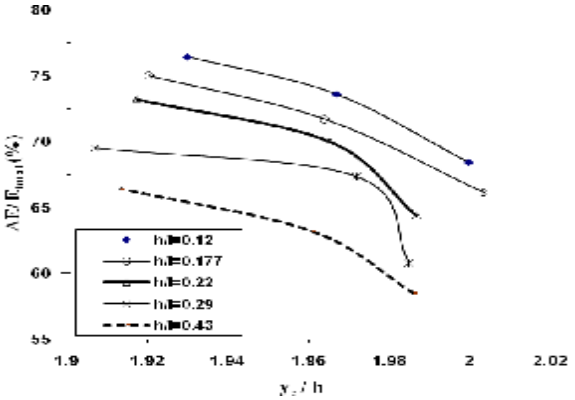
جدول5- نتایج بهینه سازی سرریز پلکانی با طول های افقی مختلف و $Q = 422 m^3/s$

پارامتر	مشخصات سرریز پلکانی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک			
	L=200 (m)	L=210 (m)	L=220 (m)	L=230 (m)
ارتفاع سرریز (m) ($H_{dam}= H_{chute}+ 2/66$)	28/66	28/66	28/66	28/66
عرض سرریز(w) (m)	23/8	23/93	24/51	23/96
شیب سرریز(α)(%)	13/04	12/38	11/95	11/30
ارتفاع پله ها (h) (m)	1/63	1/64	1/62	1/60
ارتفاع بار آبی (H_d) (m)	4/13	4/11	4/08	4/11
طول افقی پله ها (l) (m)	12/5	13/25	13/55	14/15
تعداد پله ها (N)	16/00	15/90	16/00	16/25
ارتفاع دیواره جانبی(H_w) (m)	2/46	2/45	2/44	2/45
عمق آب در پایین دست سرریز(d) (m)	1/58	1/59	1/59	1/61
سرعت در پای سرریز(v) (m/s)	11/21	11/11	11/00	10/97
عدد فرود در پای سرریز(F_r)	2/85	2/82	2/8	2/76
طول حوضچه آرامش (m)	33/74	33/46	33/21	33/13
ارتفاع دیواره های حوضچه آرامش (m)	5/63	5/60	5/55	5/53
انرژی کل در بالا دست سرریز(E_{total}) (m)	33/42	40/33	33/39	33/40
(E_{res}) (m)	7/974	7/87	7/78	7/73
($100*\Delta E/E_{total}$)	76/14	76/45	76/69	76/87
$EDR = \frac{100 \times \left(E_{res}^{\ smooth} - E_{res}^{\ stepped}\right)}{E_{res}^{\ smooth}}$	%59/17	%59/7	%60/16	%60/42

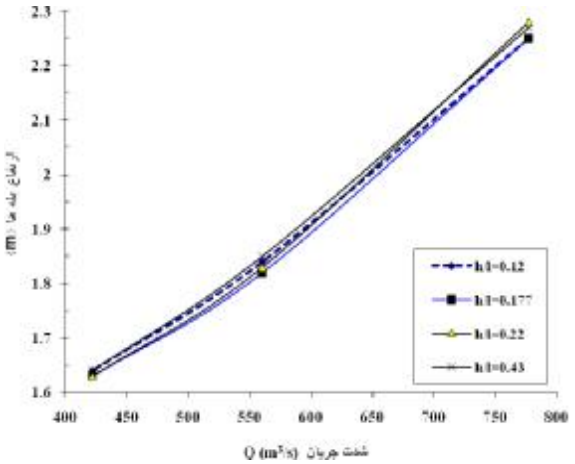
با توجه به نتایج ارائه شده در جداول 3، 4 و 5 مشاهده می‌شود که ارتفاع بهینه پله‌ها به ازای دبی ثابت در طول-های افقی یا به عبارت دیگر در شیب‌های مختلف سرریز تغییر چندانی نکرده‌است. برنامه بهینه‌سازی برای بررسی بیشتر موضوع در محدوده وسیع‌تری از شیب سرریز جهت دستیابی به نتایج کلی‌تر با تغییر فضای شدنی شیب سرریز $5.9^o \leq \alpha \leq 25^o$ اجرا شد. نتایج حاصل از بهینه-سازی و تغییرات استهلاک نسبی انرژی نسبت به شیب سرریز و y_c/h در شکل‌های 5 و 6 و تغییرات ارتفاع بهینه پله‌ها نسبت به دبی جریان در شکل 7 ارائه شده است. بدین منظور از سه دبی 422، 506/2 و 776/9 متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. ضمنا در شکل 6 منظور از l همان طول افقی هر پله می‌باشد. همچنین برای رسم نمودارهای بی‌بعد، لاجرم ارتفاع (H_{dam}) و عرض سرریز(w)، به ازای دبی و شیب‌های مختلف، ثابت و به ترتیب معادل 26 و 25 متر در نظر گرفته شدند.



شکل5- تغییرا ت استهلاک انرژی به ازای شیب سرریز



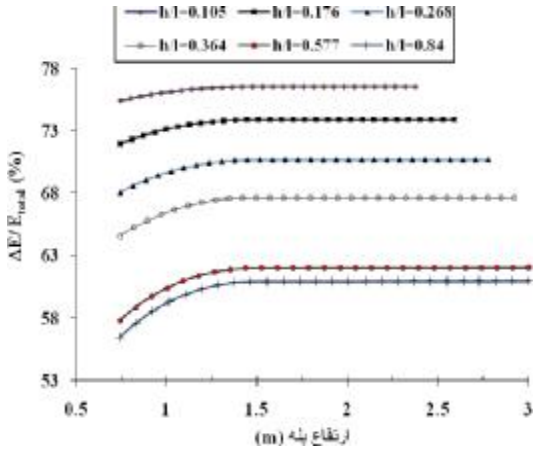
شکل6 - تغییرات استهلاک نسبی انرژی به ازای y_c/h



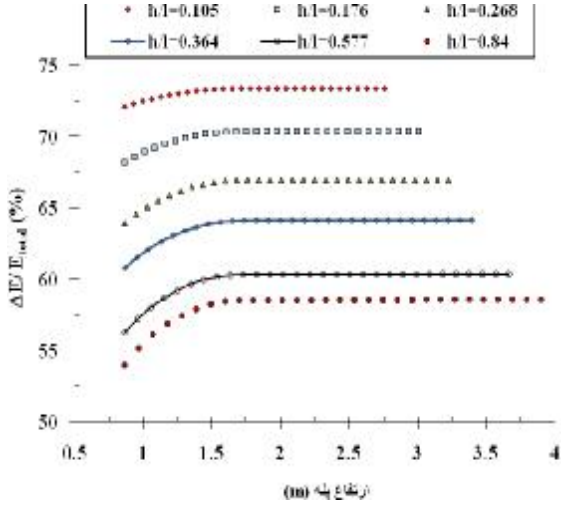
شکل7- تغییرات ارتفاع بهینه پله ها به ازای دبی جریان

تحلیل حساسیت استهلاک نسبی انرژی

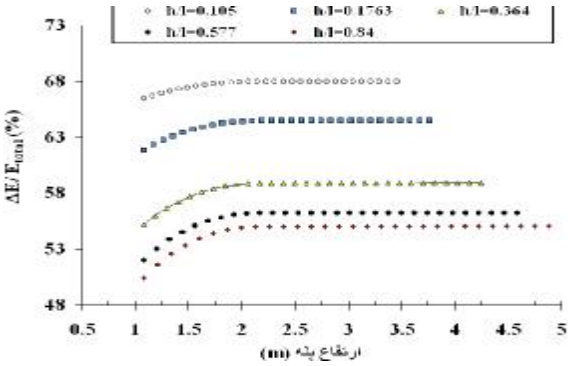
جهت بررسی و تعیین اعتبار نتایج حاصل از بهینه سازی سرریز پلکانی با تابع هدف مبتنی بر روش طراحی ارائه شده توسط اوهوتسو و همکاران (2004)، روند تغییرات و حساسیت استهلاک نسبی انرژی نسبت به شیب، دبی و ارتفاع پله ها در شکل‌های 8 الی 10 نشان داده شده است.



شکل 8- تغییرات استهلاک نسبی انرژی به ازای ارتفاع پله ها با Q=400 m^3/s



شکل9- تغییرات استهلاک نسبی انرژی به ازای ارتفاع پله ها با Q =500 m^3/s



شکل10- تغییرات استهلاک نسبی انرژی به ازای ارتفاع پله ها با Q =700 m^3/s

با توجه به شکل‌های 8 الی10، نتیجه می‌شود که:

- افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی گردیده است به طوری که به ازای شیب ثابتی مانند h/l =0/577، افزایش دبی جریان از 400 به 700 متر مکعب بر ثانیه، منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی از مقدار تقریبی 62% به 56% گردیده است.

- استهلاک نسبی انرژی با افزایش ارتفاع پله‌ها روند صعودی را نشان داده و بعد از رسیدن ارتفاع پله‌ها به مقداری معین ثابت مانده و تغییری نکرده است.

- به ازای دبی ثابت، افزایش شیب سرریز منجر به کاهش استهلاک نسبی انرژی گردیده است.

- به ازای دبی ثابت و در شیب های مختلف، روند تغییرات ارتفاع پله‌ها اختلاف محسوسی نداشته و تقریباً برابرند.

نتیجه‌گیری کلی

- با توجه به روند اجرای برنامه توسط الگوریتم ژنتیک و مشاهده سرعت و قدرت همگرایی تابع شایستگی، این الگوریتم را می‌توان به عنوان روشی موثر جهت تعیین بهترین ترکیب از ابعاد سرریز پلکانی که منجر به رسیدن به بالاترین مقدار استهلاک نسبی انرژی می‌شود، معرفی نمود.

- تبدیل سرریز صاف به سرریز پلکانی منجر به کاهش قابل توجه انرژی جنبشی جریان و در نتیجه باعث کاهش ابعاد حوضچه آرامش می‌گردد. این مسئله کاهش حجم عملیات اجرایی و در نتیجه هزینه‌های مربوط به ساخت و بهره‌برداری را به دنبال دارد.

- در این تحقیق مقدارEDR برای سرریز پلکانی به ارتفاع 28/66 متر و با دبی‌های جریان مختلف، در محدوده 42/14 تا 60/42 درصد بدست آمد، که با توجه به نتایج حاصله توسط پگرام و همکاران (1999)، در محدوده قابل قبولی می‌باشد. بر اساس تحقیقات پگرام و همکاران (1999)، در مورد سرریز پلکانی به ارتفاع 58 متر و ارتفاع پله معادل 2 متر، مقدار EDR از حدود 60 درصد به ازای y_c=0/3 متر تا زیر 50 درصد به ازای y_c=3/5 متر تقلیل یافت.

- از بررسی تغییرات ارتفاع بهینه پله‌ها نسبت به دبی جریان در شیب های مختلف سرریز نتیجه می‌شود که به ازای دبی جریان ثابت، ارتفاع بهینه پله‌ها تقریبا ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر ارتفاع بهینه پله‌ها در استهلاک انرژی تاثیری نداشته و آنچه منجر به تغییرات استهلاک انرژی می‌شود، تغییر شیب سرریز می‌باشد. این مطلب با تحلیل حساسیت استهلاک نسبی انرژی نسبت به پارامترهای طراحی سرریز پلکانی مورد تائید قرار گرفت. همچنین لازم به ذکر است که افزایش دبی افزایش ارتفاع بهینه پله‌ها را به دنبال دارد.

تقدیر و تشکر

از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان‌غربی که با در اختیار قراردادن اطلاعات مورد نیاز، این تحقیق را یاری نمودند قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

بی‌نام، 1383. مطالعات مرحله دوم سد مخزنی ساروق (گوگردچی) تکاب. مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار، شرکت آب منطقه ای آذربایجان غربی.

صادقی ح، 1382. کاربرد شبکه‌های عصبی در بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.

Anonymous, 2007. Matlab 7.5 helps system. Math Works Inc. Natick, Massachusetts.

Anonymous, 1987. Design of Small Dams. USBR, Denver, Colorado.

Chanson H, 1994. Jet flow on stepped spillways. Discussion. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 20(2): 441-442.

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.

Pegram GS, Officer AK and Mottram SR, 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 125(5): 500-510.

Rajaratnam N, 1990. Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 116(4): 587-591.

Sivanandam SN and Deepa SN, 2008. Introduction to Genetic Algorithm. Springer - Verlag. Berlin Heidelberg.

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