

## استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پنستاک سدهای بتنی

وحید نورانی\*<sup>۱</sup>، محمدعلی کی‌نژاد<sup>۲</sup> و نازیلا کاردان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

با رشد تکنولوژی و وابسته بودن صنایع به انرژی الکتریسیته، احداث نیروگاه‌های برق آبی به منظور استفاده از منابع آبی ذخیره شده در مخازن سدها به عنوان یک مهم در کشورهای متفاوت دنیا مطرح می‌شود. بالا بردن بازده و کارایی سدهای مخزنی و نیروگاه‌های برق آبی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی در سال‌های اخیر بوده است. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار مناسب جهت بهینه‌سازی، در بسیاری از زمینه‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق سعی بر آن است تا با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابعاد لوله‌های پنستاک بهینه‌یابی گردد. پنستاک لوله‌ای است فشار قوی که جریان آب را از مخزن سد یا از هر هد آبی بالا به توربین‌های نیروگاه هدایت می‌کند. به این منظور پنستاک‌های سد شهریار میانه و سد Shasta واقع در آمریکا مورد تحلیل قرار گرفته است. در این راستا پس از انجام آنالیز حساسیت، ساختار مناسبی برای الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که الگوریتم ژنتیک از قابلیت بالایی در بهینه‌سازی برخوردار بوده و می‌تواند حجم پنستاک را به میزان قابل قبولی کاهش دهد.

**واژگان کلیدی:** پنستاک، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، آنالیز حساسیت، سد شهریار، سد Shasta.

### ۱- مقدمه

اختصاص می‌یابد که طراحی بهینه آن می‌تواند هزینه ساخت را بطور چشمگیری کاهش دهد.

اصول و روش طراحی پنستاک‌های فولادی و بتنی نخستین بار توسط Souren و Hadjian [۲] ارائه گردیده است که در این روش، پس از طراحی اولیه، مقادیر بدست آمده از طریق سعی و خطا بهینه شده‌اند. در این پژوهش، تابع هزینه پنستاک به عنوان تابع هدف انتخاب شده و پس از تعیین واحد هزینه برای پارامترهای مختلف مانند خاک‌برداری و خاکریزی بازای واحد طول پنستاک، هزینه ساخت و اجرای آن بهینه گردید اما به دلیل دستی بودن محاسبات، ضریب اطمینان در این روش پایین بوده و مدت زمان انجام محاسبات نیز زیاد می‌باشد که این امر موجب غیراقتصادی بودن این روش بهینه‌سازی گردیده است. همچنین سازمان تحقیقات آمریکا [۳] طی تحقیقی به ارائه اصول طراحی پنستاک‌های فولادی پرداخته است. در این تحقیق جزئیات مربوط به اتصالات لوله‌های فولادی نیز ارائه شده است. Andaroodi در سال ۲۰۰۶ [۴] با استفاده از برنامه POPEHYE<sup>۱</sup> به بهینه‌سازی اجزای نیروگاه‌های برق آبی از جمله پنستاک پرداخته و نتایج حاصله را به صورت نمودارهایی ارائه کرد. در پژوهشی دیگر Fresen و Votesch [۵] به بهینه

امروزه نیروگاه‌های برق آبی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی برق می‌باشند چرا که انرژی تولیدی از طریق این نیروگاه‌ها نسبت به انرژی تولیدی از طریق سوخت‌های فسیلی برتری‌هایی دارد که بارزترین آن‌ها کاهش آلودگی محیط زیست و اقتصادی بودن آن است. با توجه به این مهم و نیاز روز افزون بر احداث این تأسیسات، استفاده از نیروگاه‌های برق آبی برای تأمین انرژی رشد چشمگیری داشته است به طوری که امروزه حدود ۲۲٪ انرژی برق جهان از این طریق تأمین می‌گردد [۱]. اما نکته اساسی هزینه بالای ساخت و پیچیدگی عوامل دخیل بر طراحی و ساخت تأسیسات برق آبی می‌باشد و زمانی که ساختمان نیروگاه توأم با سد ساخته می‌گردد اهمیت آن دو چندان می‌گردد زیرا در تأسیسات برق آبی علاوه بر تأمین ایمنی و راندمان سد، ایمنی و کارایی نیروگاه نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد. هر نیروگاه برق آبی از قسمت‌های مختلفی مانند سد (بتنی یا خاکی)، سازه آبگیر، لوله‌های فشارقوی انتقال آب پنستاک، مخازن موج‌گیر، توربین و تجهیزات تولید برق تشکیل یافته است که در این میان پنستاک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اهمیت پنستاک به علت هزینه‌ی بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می‌باشد طوری که حدود ۳۰٪ هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌های برق آبی به پنستاک

<sup>۱</sup> Pre-dimensioning and Economical Optimization of Small Hydropower Plants

روش‌های مختلف تفاوت قابل توجهی وجود داشته و میزان درصد خطا بالا باشد. با گسترش الگوریتم‌های فراکوشی، الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های هوش مصنوعی در زمینه‌های مختلفی از جمله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

Esat و Hall [۹] مطالعاتی در مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مخزن سد انجام داده و به نتایج مطلوبی رسیدند. هدف آنها حداکثر نمودن سود حاصل از تولید نیرو و تأمین آب کشاورزی تحت شرایط ثابت ذخیره و آزادسازی آب از مخزن بود. مطالعات این پژوهشگران نمایانگر مزیت الگوریتم ژنتیک نسبت به برخی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی از قبیل برنامه‌ریزی پویا بوده است. Wardlaw و Sharif [۱۰] نیز از GA<sup>۱</sup> برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مساله تک مخزنی به خوبی استفاده کردند. Loucks و Oliviera [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به ارزیابی منحنی‌های فرمان بهره‌برداری برای سیستم‌های چند مخزنه کرده و نشان دادند که الگوریتم ژنتیک قابلیت استفاده برای تعیین سیاست‌های کارآمد بهره‌برداری را دارا می‌باشد. Wang [۱۲] به طور موفقیت‌آمیزی از GA برای کالیبره کردن مدل بارش- رواناب استفاده نمود. Walters و Savic [۱۳] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی شکل شبکه‌های شاخه‌ای مانند سیستم‌های توزیع آب پرداختند. Murfy و همکاران [۱۴] مدلی جهت بهینه‌سازی شبکه ذخیره آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه نمود. حالت تکامل یافته‌ای از GA در بهینه‌سازی شبکه ذخیره آب توسط Dandy و همکاران [۱۵] ارائه شد که مقایسه آن با سایر روش‌های بهینه‌سازی نشانگر برتری GA می‌باشد. این روش برای بهینه‌سازی شبکه ذخیره آب نیویورک مورد استفاده قرار گرفت. Ritzel و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۹۴ مسأله آلودگی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل نمود. Marcos و همکاران [۱۷] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی استفاده کردند. در این پژوهش هزینه ساخت سد به عنوان تابع هدف و نوع مصالح مورد استفاده، دمای بتن‌ریزی و نیروی برکنش آب به عنوان متغیرهای طراحی مسأله تعریف شدند. با مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی با مقادیر واقعی طراحی می‌توان دریافت که الگوریتم ژنتیک از پتانسیل بالایی در بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی برخوردار است. Faneli و Faneli [۱۸] به بهینه‌سازی حجم بتن‌ریزی سدهای بتنی قوسی با

سازی پنستاک پرداختند. در این تحقیق هدف ماکزیم نمودن انرژی تولیدی نیروگاه بوده که دبی ورودی به نیروگاه به عنوان مهم‌ترین متغیر در افزایش انرژی تولیدی تعریف شده است. لذا با افزایش دبی، ابعاد پنستاک نیز افزایش یافته و طرح پنستاک غیر اقتصادی می‌گردد. حقیقی‌پور و همکاران [۶] در سال ۱۳۸۹ به بررسی تعداد بهینه انشعابات پنستاک در سیستم انتقال آب نیروگاه برق آبی پرداختند. در این تحقیق از مدلی مرکب از یک شبیه‌ساز هیدرولیکی جهت شبیه‌سازی جریانات میرای هیدرولیکی در خطوط انتقال تحت فشار و الگوریتم ژنتیک جهت طراحی بهینه تعداد انشعابات پنستاک استفاده گردیده است. همچنین ماکزیم نسبت سود به هزینه به عنوان تابع هدف تعریف شده است. نتایج حاصله بیانگر دقت و همگرایی بالای مدل انتخاب شده در بهینه‌سازی تعداد انشعابات پنستاک می‌باشد. Dong و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۶ پایداری پنستاک‌های فولادی تحت فشار خارجی را مورد بررسی قرار دادند. پایداری پنستاک تحت فشارهای خارجی و داخلی یکی از مهم‌ترین مواردی است که باید در طراحی پنستاک‌ها مورد توجه قرار گیرد. در تحقیقات قبلی انجام گرفته در این زمینه، به دلیل استفاده از فرض‌های ساده‌سازی، نتایج دقیقی حاصل نشده است لذا در این تحقیق سعی گردیده است تا با حذف فرض‌های ساده‌سازی و با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، تحلیل دقیقی از پایداری پنستاک‌های فولادی ارائه گردد. در این راستا تأثیر نسبت قطر به ضخامت پنستاک و نیز نسبت قطر به فاصله سخت‌کننده‌های اطراف پنستاک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت قطر به ضخامت پنستاک و نیز با افزایش نسبت فاصله به قطر سخت‌کننده‌های اطراف پنستاک، فشار خارجی بحرانی کاهش می‌یابد. Purwati و Wahyun [۸] در سال ۲۰۱۰ به بهینه‌سازی ابعاد پنستاک فولادی نیروگاه برق آبی Ample Gading در اندونزی پرداختند. در این تحقیق، هدف تعیین قطر و ضخامت بهینه برای پنستاک بوده است. برای انتخاب اولیه قطر رابطه تجربی Daaland مورد استفاده قرار گرفته و پس از بهینه‌سازی مقدار تنش‌های شعاعی وارده بر جدار پنستاک، اتلافات انرژی و نیز تأثیر ضربه قوچ مورد بررسی قرار گرفته است. قطر حاصله از رابطه تجربی مساوی ۱/۱۸ بوده و پس از بررسی شش قطر (۲-۱/۸-۱/۶-۱/۴-۱/۲-۱/۲-۱/۲)، قطر بهینه مساوی ۱/۴ متر حاصل شده است.

بنابراین می‌توان گفت طی پژوهش‌های قبلی که در زمینه پنستاک انجام یافته روش منسجم و قدرتمندی مورد استفاده قرار نگرفته است که این امر موجب شده بین نتایج حاصله از

<sup>۱</sup> Genetic Algorithm

می‌رسیم. در فرآیند الگوریتم ژنتیک برای ایجاد نسل‌های جدید با محاسبه میزان برازندگی هر عضو نسل فعلی به آن عضو امتیازی تعلق می‌گیرد سپس عملگرهای ژنتیکی شامل باز تولید، ادغام، جهش و انتخاب اعمال شده و نسل جدید ایجاد می‌گردد که نسل جدید جایگزین نسل پیشین شده و این چرخه ادامه می‌یابد که معمولاً نسل جدید برازندگی بیشتری را نسبت به نسل‌های پیشین دارد. این فرآیند جستجو زمانی به پایان می‌رسد که یا به حداکثر نسل مورد نظر رسیده باشیم یا همگرایی مورد نظر حاصل شده باشد و یا معیارهای توقف دیگری برآورده شوند. در الگوریتم ژنتیک عملگرهای شاخص‌گذاری<sup>۲</sup>، انتخاب<sup>۳</sup>، برش<sup>۴</sup> و جهش<sup>۵</sup> دارای اهمیت و کارایی بالایی هستند [۲۲].

قسمت اول مقاله به بیان ویژگی‌های کلی پستاک و الگوریتم ژنتیک پرداخته است تا خواننده مختصراً با این دو مفهوم آشنا گردد. در قسمت دوم، تابع هدف و قیود مسأله تعریف شده و نیز توضیحاتی در مورد دلایل انتخاب آن‌ها ارائه شده است.

در ادامه، مطالعات موردی معرفی گردیده همچنین با انجام آنالیز حساسیت، آرایش بهینه الگوریتم ژنتیک برای هر کدام از موارد مطالعاتی نشان داده شده است. قسمت انتهایی مقاله نیز به بیان نتایج حاصله، مقایسه و تحلیل آن‌ها اختصاص یافته است.

### ۳- بهینه‌سازی پستاک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

#### ۳-۱- تابع هدف

در مسأله بهینه‌سازی پستاک، کمینه کردن حجم پستاک به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. با تعریف تابع حجم پستاک به عنوان تابع هدف علاوه بر اینکه حجم خود پستاک بهینه شده و مصالح مصرفی کاهش می‌یابد، حجم خاکبرداری برای احداث تونل پستاک نیز کاهش پیدا می‌کند.

بدیهی است، کاهش ابعاد تونل پستاک موجب کمینه شدن حجم بتن‌ریزی تونل نیز می‌گردد. کمینه شدن حجم خاکبرداری و بتن‌ریزی، عمدتاً در پستاک‌های مدفون مطرح بوده و در پستاک‌های روکار هدف از بهینه‌سازی تنها کاهش حجم خود پستاک می‌باشد. پستاک‌های مورد مطالعه در این مقاله از دو نوع روکار و مدفون انتخاب شده‌اند تا بررسی کارایی تابع هدف انتخاب شده از مقایسه نتایج حاصله امکان‌پذیر باشد. پستاک سد Shasta قسمتی به صورت مدفون در بدنه سد بوده و قسمتی دیگر به صورت روکار تا توربین‌های نیروگاه امتداد

استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. Nourani [۱۹] نیز از الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان<sup>۱</sup> (ACO) جهت بهینه‌سازی ابعاد کانال‌ها استفاده نمود و نتایج حاصله از دو الگوریتم بهینه‌سازی را مورد مقایسه قرار داد.

براساس مطالعه پیشینه پژوهش پیداست در زمینه بهینه‌سازی پستاک با استفاده از روش‌های فراکوشی از جمله روش الگوریتم ژنتیک تحقیقی انجام نشده است. از این‌رو در این مقاله سعی می‌گردد از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پستاک به عنوان یک سازه هیدرولیکی بسیار ارزشمند استفاده گردد.

### ۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نخستین بار در سال ۱۹۷۶ میلادی توسط Holland [۲۰] معرفی گردید و پس از آن، این الگوریتم به طور وسیعی در مسائل مهندسی به ویژه در مسائل بهینه‌سازی شبکه لوله‌های آبرسانی، سازه‌های ساختمانی، کالیبراسیون، مدل‌های هیدرولوژیکی و پمپاژ آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. در میان روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک (GA) از توانمندترین روش‌ها بشمار می‌رود زیرا الگوریتم ژنتیک در قیاس با سایر روش‌های مرسوم در بهینه‌سازی، دارای برتری‌های زیر می‌باشد [۲۱]:

الگوریتم ژنتیک به مشتقات تابع هدف نیاز ندارد و فقط از ارزیابی متغیرهای تصمیم‌گیری در تابع هدف استفاده می‌نماید. بنابراین مشتق ناپذیر بودن تابع هدف بر حل مسئله محدودیتی اعمال نمی‌کند در حالی که در روشی مانند روش لاگرانژ، شرط اولیه در بهینه‌سازی، مشتق‌پذیری تابع هدف می‌باشد. این الگوریتم، توانایی تلفیق با سایر روش‌های بهینه‌سازی را دارد. کارایی الگوریتم ژنتیک در فضای طراحی نامناسب و پیچیده که با روش‌های مبتنی بر گرادینت بسیار دشوار و یا حتی غیر ممکن به نظر می‌رسد به طور تئوری و تجربی اثبات شده است. الگوریتم ژنتیک برای اجرای جستجوی مؤثر، فقط به مقادیر تابع هدف نیاز دارد و اطلاعات از پیش تعیین شده را نادیده می‌گیرد که این ویژگی، الگوریتم ژنتیک را نسبت به سایر روش‌های جستجو، روش مناسب تری جلوه می‌دهد.

در GA برای بهینه‌سازی تابع هدف، در هر مرحله، از یک نسل تحت عنوان کروموزوم‌ها (والدین) که در حقیقت پاسخ‌های اولیه مسئله می‌باشند، به یک نسل جدید از کروموزوم‌ها (فرزندان) که در حقیقت پاسخ‌های ثانویه مسأله مفروض می‌باشند)

<sup>2</sup> Fitness Scaling

<sup>3</sup> Selection

<sup>4</sup> Cross Over

<sup>5</sup> Mutation

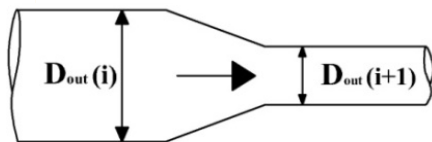
<sup>1</sup> Ant Colony Optimization

در رابطه (۲)،  $V_{out}$  حجم پنستاک،  $i$  شمارنده‌ی مقاطع مختلف پنستاک،  $L_i$  طول پنستاک در مقطع  $D_{out_i}$  قطر خارجی پنستاک در مقطع  $i$ ،  $R$  به ترتیب شعاع و زاویه خم در مقاطع مختلف پنستاک،  $L_{Rei}$  طول پنستاک در محل انقباض و  $D_{out}(Rei)$  قطر متوسط پنستاک در مقطع انقباض می‌باشد. طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$D_{out} = D_{in} + 2t \quad (۳)$$

در رابطه (۲) عبارت اول حجم پنستاک در مقاطع مستقیم، عبارت دوم، حجم پنستاک در محل خم‌های افقی و قائم و عبارت سوم حجم پنستاک در محل تنگ شدگی یا انقباض می‌باشد. با توجه به شکل (۲)  $D_{out}(Rei)$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{out}(Rei) = \frac{D_{out}(i) + D_{out}(i+1)}{2} \quad (۴)$$



شکل ۲- انقباض پنستاک

### ۲-۳- قیود

در طراحی پنستاک بایستی لوله هم از لحاظ هیدرولیکی و هم از لحاظ سازه‌ای مورد تحلیل قرار گیرد. در بهینه‌سازی نیز قیود مسأله در دوگروه قیدهای هیدرولیکی و قیدهای سازه‌ای قرار می‌گیرند. ارضای معادله برنولی بین سازه آبگیر و توربین‌ها به عنوان قید هیدرولیکی و کنترل تنش‌های ناشی از فشار داخلی جریان و نیز فشار خارجی ناشی از عوامل مختلف به عنوان قیدهای سازه‌ای منظور می‌گردند.

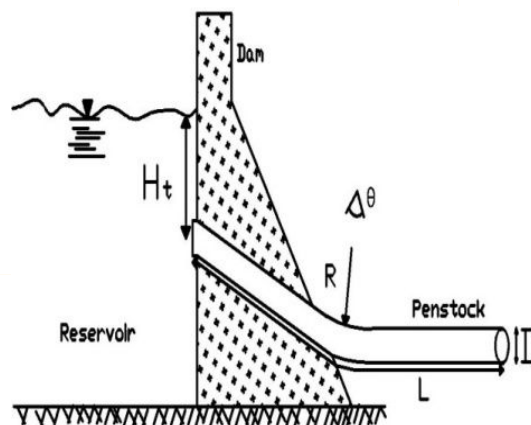
در پنستاک‌های مدفون، فشار خارجی ممکن است ناشی از فشار انقباضی و انبساطی بتن تحت تغییرات دمایی یا فشار آب حفره‌ای ناشی از ترک‌خوردگی سنگ‌ها باشد. گرچه سنگ‌های اطراف پنستاک را می‌توان با دوغاب تحکیم کرد اما ممکن است برخی ترک‌های مویی که پرکردن و تحکیم آن‌ها مشکل است باقی بمانند.

می‌یابد (شکل (۱)). اما پنستاک سد شهریار به صورت کاملاً مدفون می‌باشد. در مسأله بهینه‌سازی، تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \text{Min}[v\{x\}] \quad (۱)$$

که  $C$  تابع هدف،  $v\{x\}$  حجم پنستاک و  $\{x\}$  بردار متغیرها می‌باشد. متغیرهای طراحی که می‌توان در بهینه‌سازی منظور کرد عبارتند از قطر داخلی، قطر بیرونی، شعاع خم، زاویه خم، ضخامت جدار پنستاک، محل قرارگیری سازه آبگیر نسبت به تراز سطح آزاد آب و ابعاد سازه آبگیر. بررسی بیشتر مسأله و انجام تحلیل حساسیت (جدول (۱)) نشان می‌دهد که دو پارامتر قطر بیرونی و قطر داخلی و بالطبع ضخامت جدار پنستاک بیشترین تأثیر را در کاهش حجم پنستاک خواهند داشت. لذا قطر بیرونی و قطر داخلی پنستاک به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. مطابق شکل (۱) تابع حجم پنستاک را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Minimize } V_{out} = \sum_{i=1}^n \frac{\pi D_{out_i}^2}{4} L_i + \frac{\pi D_{out_i}^2}{4} \times \frac{\pi \theta}{180} R + \frac{\pi D_{out}^2(Rei)}{4} L_{Rei} \quad (۲)$$



شکل ۱- نمایش شماتیک پنستاک مدفون در بدنه سد بتنی

Shasta

جدول ۱- آنالیز حساسیت متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی حجم پنستاک

نام سد	متغیرهای طراحی	درصد کاهش حجم	حجم کاهش یافته ( $m^3$ )	حجم بهینه پنستاک ( $m^3$ )
سد Shasta	شعاع خم ( $R_{bend}$ )	٪۵/۳۸	۱۱/۸۸۶	۲۱/۳۴۳
	زاویه خم ( $\theta_{bend}$ )	٪۳/۰۲	۶/۶۷۲	
	تراز سازه آبگیر ( $H_{intake}$ )	٪۴/۲۱	۹/۳۰۱	۱۳/۰۷۹
	ابعاد سازه آبگیر ( $A_{intake}$ )	٪۱/۵۴	۳/۴۰۲	
	قطر داخلی ( $D_{in}$ )	٪۶/۸۳	۱۵/۹۰	۳۸/۲۸۹
	قطر بیرونی ( $D_{out}$ )	٪۹/۴۷	۲۰/۹۲۳	
سد شهریار	شعاع خم ( $R_{bend}$ )	٪۲/۱۸	۶/۸۱۳	۱۳/۲۲
	زاویه خم ( $\theta_{bend}$ )	٪۱/۹۲	۶	
	تراز سازه آبگیر ( $H_{intake}$ )	٪۱/۶۸	۵/۲۵	۵/۹۰۷
	ابعاد سازه آبگیر ( $A_{intake}$ )	٪۰/۴۱	۱/۲۸۱	
	قطر داخلی ( $D_{in}$ )	٪۲/۷۳	۸/۵۳۲	۲۲/۶۵۹
	قطر بیرونی ( $D_{out}$ )	٪۴/۶۱	۱۴/۴۰۸	

افت‌های اصطکاک و موضعی را شامل شده و به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$\Delta H_{out-in} = \sum_{i=1}^n K_e \frac{v_{out}^2}{2g} + \sum_{i=1}^n K_b(i) \left( \frac{A_{out}}{A_i} \right) \frac{v_{out}^2}{2g} + \lambda_i L_i \left( \frac{A_{out}}{A_i} \right) \frac{v_{out}^2}{2g} + K_{con} \left( \frac{A_{out}}{A_i} \right) \frac{v_{out}^2}{2g} + K_{ex} \frac{v_{out}^2}{2g} \quad (6)$$

در رابطه فوق عبارت اول تلفات در ورودی پنستاک، عبارت دوم تلفات در زانویی‌ها، عبارت سوم تلفات اصطکاک در طول پنستاک، عبارت چهارم تلفات در محل انقباض تدریجی و عبارت پنجم تلفات جریان در خروجی پنستاک می‌باشند. همچنین ضریب افت جریان در ورودی جریان به سازه آبگیر،  $K_b(i)$  ضریب افت جریان در زانویی آن،  $K_{con}$  ضریب افت جریان برای انقباض تدریجی پنستاک،  $K_{ex}$  ضریب افت جریان در محل خروجی جریان،  $v_{out}$  سرعت جریان خروجی از پنستاک،  $A_{out}$  سطح مقطع در محل اتصال پنستاک به توربین و  $D_i$ ،  $L_i$ ،  $\lambda_i$ ،  $A_i$  به ترتیب مساحت پنستاک، ضریب اصطکاک، طول پنستاک و قطر پنستاک در مقطع  $i$  می‌باشند.

حالت دوم: شامل بررسی سازه‌ای پنستاک همراه با ملاحظات هیدرولیکی است. در این حالت قطر بیرونی و قطر داخلی و به عبارتی ضخامت جداره پنستاک بایستی طوری بهینه گردند که مقادیر تنش‌های ناشی از فشار داخلی جریان و تنش‌های ناشی از فشار خارجی (بررسی عدم کمناش پنستاک در مقابل فشار خارجی) از مقادیر مجاز طراحی تجاوز نکنند، یعنی:

آبی که با فشار بالا در پنستاک جریان می‌یابد اگر به بیرون و به میان سنگ‌ها نشت کند موجب ایجاد ترک‌های کششی در سنگ‌های اطراف پنستاک می‌گردد. ترک‌های کششی، پایداری سنگ‌های اطراف پنستاک را به خطر انداخته و موجب اعمال فشار خارجی بر پنستاک می‌گردند. در پنستاک‌های روکار، پنستاک تنها تحت تأثیر عوامل محیطی و شرایط جوی قرار گرفته و با گذشت زمان دچار خوردگی می‌شود. بنابراین از لحاظ قیود عملی، مساله بهینه‌سازی پنستاک را می‌توان در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار داد:

حالت اول: تنها اعمال قید هیدرولیکی بدون ملاحظات سازه‌ای است که معادله برنولی بین بالادست (سازه آبگیر) و پایین دست (خروجی جریان از توربین‌ها) نوشته می‌شود:

$$\text{Subject to } \frac{P_{in}}{\gamma_{water}} + \frac{v_{in}^2}{2g} + h_{in} - \Delta H_{out-in} = \frac{P_{out}}{\gamma_{water}} + h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2g} \quad (5)$$

که  $P_{in}$  و  $v_{in}$  به ترتیب فشار و سرعت جریان در مقطع ورودی،  $h_{in}$  ارتفاع مقطع ورودی نسبت به تراز پایه،  $P_{out}$  و  $v_{out}$  فشار و سرعت جریان در مقطع خروجی،  $h_{out}$  ارتفاع محل قرارگیری توربین نسبت به تراز پایه و  $\Delta H_{out-in}$ ، میزان تلفات جریان از ابتدا تا انتهای مسیر پنستاک می‌باشد. عبارت  $\Delta H_{out-in}$

$$V_{Fitness} = V_{out} [(P\sigma_{r1} + P\sigma_{r2} + PP_{max} + 1)^E] + \varepsilon_2 |V_{penalty}|^2 \quad (9)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} P\sigma_{r1} &= (\sigma_{r1} - \sigma_{all}) / \sigma_{all} \\ P\sigma_{r2} &= (\sigma_{r2} - \sigma_{all}) / \sigma_{all} \\ PP_{max} &= (P_{NB} - P_{max}) / P_{NB} \\ V_{Penalty} &= |g(x) - \varepsilon_1| \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه (۸)  $V_{penalty}$  تابع جریمه،  $g(x)$  قید مسأله،  $V_{Fitness}$  تابع برازندگی،  $V_{out}$  تابع هدف و  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  به ترتیب حداقل خطای قابل قبول و ضریب تابع جریمه می‌باشند. مقدار  $\varepsilon_1$  به نوع مسأله بستگی دارد و برای مسائل بهینه‌سازی مختلف مقدار آن متفاوت می‌باشد.  $\varepsilon_2$  نیز یک عدد مثبت بسیار بزرگ می‌باشد و مقدار آن بین دو تا ده تغییر می‌کند. در رابطه (۹)  $P\sigma_{r1}$  و  $P\sigma_{r2}$  و  $PP_{max}$  به ترتیب ضریب جریمه تنش شعاعی، ضریب جریمه تنش طولی و ضریب جریمه فشار خارجی وارده بر پنستاک تعریف می‌شوند،  $\varepsilon$  نیز توان تابع پناستی می‌باشد. مقدار  $\varepsilon$ ، عددی بین صفر و یک می‌باشد که با توجه به مسأله و با اجرای برنامه به ازای  $\varepsilon$  های مختلف مقدار مناسب آن انتخاب می‌شود.

#### ۴- مطالعات موردی

##### ۴-۱- سد Shasta

سد Shasta در ایالت کالیفرنیا آمریکا واقع است و بعد از سد Grand Coulee در واشنگتن دومین سد بزرگ آمریکا بشمار می‌رود. این سد که از نوع سدهای بتنی وزنی می‌باشد بر روی رودخانه Sacramento ساخته شده است (شکل (۳)). میزان انرژی برق آبی این سد ۶۷۶ مگاوات می‌باشد. مخزن سد Shasta میزان  $10^9 \times 55/5$  متر مکعب آب را در خود جای داده است. این سد دارای پنج پنستاک از نوع فولادی می‌باشد. ضخامت پنستاک این سد در قسمت‌های نزدیک سازه آبگیر  $19/5mm$  بوده و در نزدیکی توربین‌ها به  $9/5mm$  کاهش می‌یابد. طول پنستاک  $270m$ ، هد طراحی  $77m$ ، دبی طراحی  $18 m^3/s$ ، افزایش هد ناشی از تأثیر ضربه قوچ ۲۰ درصد می‌باشد. لذا ماکزیمم هد طراحی مساوی  $93m$  برآورد می‌شود.

$$\text{Subject to } \frac{P_{in}}{\gamma_{water}} + \frac{v_{in}^2}{2g} + h_{in} - \Delta H_{out-in} =$$

$$\frac{P_{out}}{\gamma_{water}} + h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2g}$$

$$\sigma_{r(i)} < \sigma_{all} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sigma_{r(i)} < \sigma_{all}$$

$$P_{max(i)} < P_{NB} \quad (7)$$

که  $\sigma_{r1}$  تنش شعاعی ناشی از فشار داخلی،  $\sigma_{r2}$  تنش طولی ناشی از سخت کننده‌های اطراف پنستاک و  $P_{max}$  ماکزیمم فشار خارجی وارد بر پنستاک می‌باشد.  $\sigma_{all}$  مقدار مجاز تنش برای  $\sigma_{r1}$  و  $\sigma_{r2}$  بوده و  $P_{NB}$  به صورت مقدار مجاز تنش برای فشار خارجی بیان می‌شود. در الگوریتم‌های فراکاووشی، از روش‌های مختلفی می‌توان جهت اعمال قیود به تابع هدف استفاده نمود که به عنوان نمونه می‌توان به روش لاگرانژ و روش تابع جریمه اشاره نمود. در این الگوریتم‌ها تنها امکان کمینه نمودن یک تابع وجود دارد، لذا بایستی قیود با تابع هدف ترکیب شوند تا تابع واحدی را تشکیل دهند. تابع نهایی حاصل شده تابع برازندگی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود [۲۰]. روش تابع جریمه یکی از روش‌هایی است که برای ترکیب قیود و تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند حل مسأله با استفاده از تابع جریمه به این صورت است که به هر جوابی خارج از محدوده مجاز، جریمه تعلق می‌گیرد که این جریمه از شایستگی جواب مورد نظر می‌کاهد و الگوریتم را مجبور می‌کند تا نسل‌های بعدی انتخاب در محدوده مجاز مسأله باشند. لذا تابع جریمه با توجه به میزان نقض قیدهای مسأله، مقداری را به تابع هدف اضافه یا کم می‌کند. بنابراین در مقاله حاضر نیز روش فوق برای تشکیل تابع برازندگی استفاده شده است. تابع برازندگی برای دو حالت فوق را می‌توان به ترتیب به صورت زیر تعریف نمود:

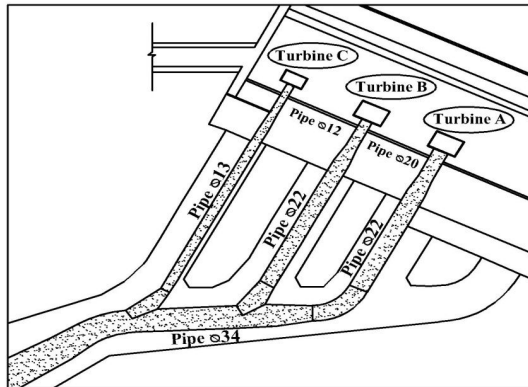
حالت اول)

$$V_{penalty} = |g(x) - \varepsilon_1| \geq 0 \Rightarrow$$

$$V_{Fitness} = V_{out} + \varepsilon_2 |V_{penalty}|^2 \quad (8)$$

حالت دوم)

<sup>۱</sup> Fitness Function



شکل ۴- انشعاب پنستاک سد شهریار در محل توربین ها



شکل ۳- نمایی از سد Shasta

#### ۵- تحلیل حساسیت

کارایی الگوریتم ژنتیک به انتخاب درست عملگرهای آن بستگی دارد از اینرو با انجام تحلیل حساسیت بایستی آرایش بهینه الگوریتم تعیین گردد. در این مقاله سه عملگر شاخص گذاری (Proportion, Top, Rank)، سه عملگر انتخاب (Uniform, Tournament, Roulette)، سه عملگر برش (Uniform, Two Points, Single Point) و دو عملگر جهش (Feasible, Uniform) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۲۱]. همچنین برای تعیین بهترین اندازه جمعیت، الگوریتم برای پنج مقدار مختلف اندازه جمعیت اجرا شده است.

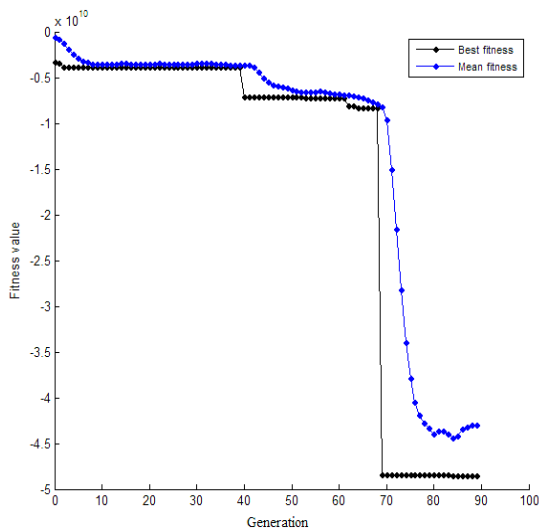
از آنجا که الگوریتم ژنتیک از روش احتمالاتی برای تولید نسل‌ها استفاده می‌کند بنابراین برای تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم، تابع برازش برای هر یک از پارامترها چندین مرتبه محاسبه شده و میانگین آن‌ها به عنوان ملاک سنجش مورد استفاده قرار گرفته است. ماکزیمم تعداد دوره تکرار نیز به عنوان رایج‌ترین معیار خاتمه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شمار می‌رود. اگر تعداد دوره تکرار بزرگ انتخاب شود تعداد تحلیل‌های انجام یافته و در نتیجه زمان بهینه‌سازی افزایش می‌یابد و اگر تعداد دوره تکرار کم باشد احتمال جستجوی کامل فضای پاسخ و رسیدن به جواب‌های بهینه کاهش می‌یابد. با این توضیح پیداست که انتخاب مقدار مناسب تعداد تکرار برای الگوریتم ژنتیک جهت رسیدن به جواب‌های بهینه در کم‌ترین زمان حائز اهمیت است که با انجام آنالیز حساسیت تعداد بهینه تکرار ۱۰۰ انتخاب شده و همگرایی در حدود ۱۰۰ تکرار حاصل شده است. با انجام تحلیل حساسیت آرایش بهینه الگوریتم ژنتیک برای سد شهریار و Shasta به ترتیب به صورت جدول (۲) حاصل شده است.

#### ۴-۲- سد شهریار

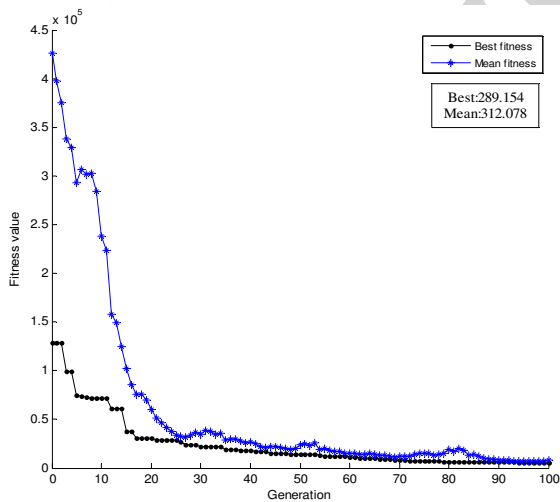
سد شهریار، سد بتنی دو قوسی است که در شهرستان میانه واقع گردیده است. شکل (۴) انشعاب پنستاک‌های سد شهریار در نزدیکی توربین‌ها را نشان می‌دهد. جنس پنستاک از سازه سد تا محل انشعاب آن بتنی بوده و از محل انشعاب تا توربین‌ها، فولادی می‌باشد. پنستاک‌ها به صورت مدفون در داخل تونل قرار گرفته‌اند.

طول پنستاک فولادی ۱۶۲ متر و پنستاک بتنی حدود ۸۶ متر می‌باشد. قطر پنستاک بتنی ۴ متر بوده و قطر پنستاک فولادی از ۱/۲ تا ۳/۴ متر (۱/۲، ۱/۳، ۲، ۲/۲، ۳/۴ m) تغییر می‌کند. نیروگاه دارای سه توربین می‌باشد که پنستاک فولادی در محل توربین‌ها به سه پنستاک با قطرهای ۱/۲، ۲ و ۲/۲ متر انشعاب یافته است. ضخامت پنستاک‌های به قطر ۱/۲ و ۱/۳ متری ۱۲mm و سایر پنستاک‌ها ۱۵mm می‌باشد.

بهترین جواب به ترتیب ۱۹۴/۰۵ متر مکعب و ۱۸۷/۳۴۸ متر مکعب می‌باشد که مقدار انحراف استاندارد ۵/۱۸۹ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۱/۱۳٪ حاصل می‌شود و به ازای ۸ بار اجرا با میانگین ۱۹۲/۱۶۷ متر مکعب و بهترین جواب ۱۸۰/۲۴۵ متر مکعب، انحراف استاندارد ۳/۱۰۴ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۰/۳۶٪ خواهد بود. نتایج فوق در جدول (۳) نیز ارائه شده‌اند.



حالت (الف)



حالت (ب)

شکل ۵- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای سد شهریار در دو حالت (الف) قید هیدرولیکی و (ب) قید سازه‌ای و هیدرولیکی

#### جدول ۲- آرایش بهینه الگوریتم ژنتیک برای سد Shasta و شهریار

عملکرد	مطالعه موردی	
	سد Shasta	سد شهریار
اندازه جمعیت	80	100
تعداد نسل	100	100
عملکرد شاخص‌گذاری	Rank	Rank
عملگر انتخاب	Roulette	Tournament
عملگر برش	Single Point	Two Points
عملگر جهش	Adaptive Feasible	Adaptive Feasible

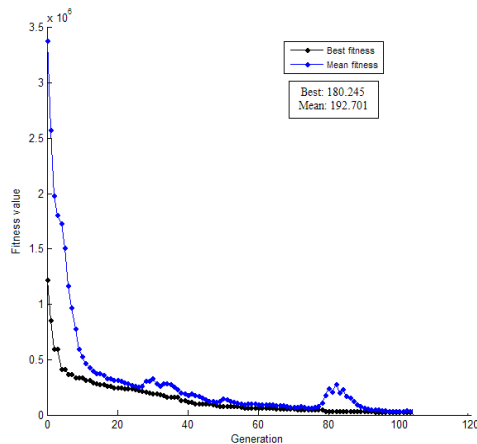
#### ۶- نتایج و بحث

در قید حالت اول نکته مهم کنترل مقادیر افت‌های موضعی و اصطکاکی است که در بهینه‌سازی پنستاک حائز اهمیت است. در این حالت تنها متغیر طراحی، قطر داخلی است که بر میزان تلفات تأثیر خواهد گذاشت. در قید حالت دوم، قطر داخلی و قطر خارجی، متغیرهای مسأله خواهند بود. در این حالت با تغییر قطر داخلی و قطر بیرونی، پنستاک هم از جنبه هیدرولیکی و هم از لحاظ سازه‌ای دستخوش تغییر می‌شود.

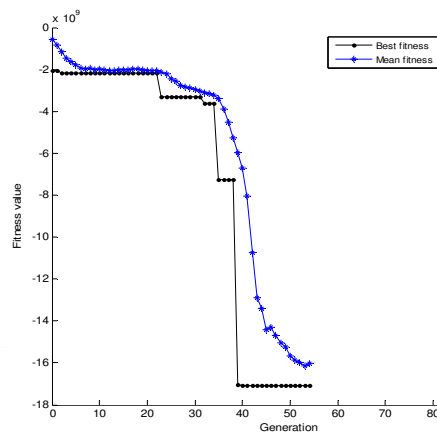
در شکل (۵) نحوه همگرایی الگوریتم برای سد شهریار در دو حالت (الف) و (ب) و در شکل (۶) نیز همگرایی الگوریتم برای سد Shasta در دو حالت (الف) و (ب) نشان داده شده است. در شکل‌های (۵-ب) و (۶-ب) میانگین جواب‌ها و بهترین جواب برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده آورده شده است. از لحاظ آماری و احتمالاتی، اگر اختلاف بین این دو مقدار کم باشد احتمال رسیدن به جواب مناسب بیشتر است. ولی جهت تضمین دستیابی به جواب مناسب لازم است برنامه چندین بار اجرا گردد. برای موارد مطالعاتی با تعداد ۱۰۰ نسل، ۴، ۶ و ۸ بار اجرای برنامه، مورد بررسی قرار گرفته است. برای سد شهریار در ۴ بار اجرای برنامه مقدار میانگین جواب ۳۱۲/۱۸۵ متر مکعب و بهترین جواب ۲۸۹/۱۵۴ متر مکعب می‌باشد. در این حالت انحراف استاندارد ۱۰/۶۲۷ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۲/۱٪ است. در ۶ بار اجرا، میانگین جواب و بهترین جواب به ترتیب ۳۱۳/۶۵۲ متر مکعب و ۳۰۲/۸۱ متر مکعب می‌باشد که مقدار انحراف استاندارد ۷/۲۹۷ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۱/۶۸٪ حاصل می‌شود و به ازای ۸ بار اجرا با میانگین ۳۱۵/۹۳۲ متر مکعب و بهترین جواب ۳۰۵/۷۲۸ متر مکعب، انحراف استاندارد ۳/۹۵ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۰/۲۴٪ خواهد بود.

برای سد Shasta در ۴ بار اجرا، مقدار میانگین جواب ۱۹۸/۶۷۲ متر مکعب و بهترین جواب ۱۹۱/۶۰۷ متر مکعب می‌باشد. در این حالت انحراف استاندارد ۸/۵۱۴ متر مکعب و پراکندگی نسبی ۱/۷۱٪ است. در ۶ بار اجرا، میانگین جواب و





حالت (ب)



حالت (الف)

شکل ۶- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای سد Shasta در دو حالت (الف) قید هیدرولیکی و (ب) قید سازه‌ای و هیدرولیکی

جدول ۳- مقایسه میانگین جواب و بهترین جواب حاصله به ازای سه بار اجرای الگوریتم

نام سد	تعداد تکرار	میانگین جواب ( $m^3$ )	بهترین جواب ( $m^3$ )	انحراف استاندارد ( $m^3$ )	پراکندگی نسبی (%)
سد شهریار	۴	۳۱۲/۱۸۵	۲۸۹/۱۵۴	۱۰/۶۲۷	۲/۱
	۶	۳۱۳/۶۵۲	۳۰۲/۸۱	۷/۲۹۷	۱/۶۸
	۸	۳۱۵/۹۳۲	۳۰۵/۷۲۸	۳/۹۵	۰/۲۴
سد Shasta	۴	۱۹۸/۶۷۲	۱۹۱/۶۰۷	۸/۵۱۴	۱/۷۱
	۶	۱۹۴/۰۵	۱۸۷/۳۴۸	۵/۱۸۹	۱/۱۳
	۸	۱۹۲/۱۶۷	۱۸۰/۲۴۵	۳/۱۰۴	۰/۳۶

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش تکرارها، پراکندگی نسبی کاهش یافته و اختلاف میانگین جواب و بهترین جواب برای سد شهریار به ۳/۲۳٪ و برای سد Shasta به ۶/۲٪ رسیده است. لذا ۸ بار تکرار برای اجرای الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه با ۸ مرتبه اجرای برنامه و تعداد ۱۰۰ نسل برای هر مورد مطالعاتی حدود ۸۰۰ تحلیل در حالت (ب) انجام شده است که به نظر می‌رسد جهت تضمین درستی جواب‌های حاصله کافی باشد. در جدول (۴) درصد کاهش حجم پنستاک سدها در حالت (ب) ارائه شده است. با بررسی نتایج معلوم می‌گردد تنها اعمال قید اول (قید هیدرولیکی) درست نمی‌باشد. زیرا با فرض دبی ثابت، کاهش قطر داخلی افزایش سرعت را دنبال دارد. کاهش قطر و افزایش سرعت موجب افزایش افت‌های اصطکاکی و موضعی می‌شود که مطلوب مسأله نمی‌باشد.

پیداست که کاهش قطر داخلی کم می‌باشد لذا کمینه شدن قطر داخلی پنستاک تأثیر قابل توجهی در هیدرولیک جریان نخواهد داشت. همچنین میزان تغییرات قطر بیرونی بگونه‌ای است که ضخامت جدار پنستاک نیز پاسخگوی تنش‌های داخلی و تنش‌های خارجی وارده بر پنستاک می‌باشد. بنابراین با اعمال قید برنولی در کنار قیود سازه‌ای، پنستاک از لحاظ هیدرولیکی و سازه‌ای تحلیل شده و می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال همزمان قیود، نتایج مناسبی حاصل می‌گردد. با توجه به موارد ذکر شده میزان کاهش حجم پنستاک سد Shasta مساوی ۱۷/۹۶٪ و پنستاک سد شهریار ۷/۴۸٪ می‌باشد. هر چند تغییرات قطر و ضخامت جدار پنستاک زیاد نیست اما به دلیل طول زیاد پنستاک این تغییرات بر کاهش حجم بتن ریزی تأثیرگذار بوده و حجم بتن ریزی تونل پنستاک سد شهریار را به میزان ۵/۲۳٪ کاهش می‌دهد.

در حالت دوم (قید هیدرولیکی توام با قید سازه‌ای) قطر داخلی و قطر بیرونی با هم تغییر می‌کنند. از نتایج حاصله

جدول ۴- نتایج بهینه بدست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

نام سد	قطر موجود (mm)	قطر بهینه (mm)	حجم موجود ( $m^3$ )	حجم بهینه ( $m^3$ )	درصد کاهش حجم
سد Shasta	۲۲۱۴ و ۲۴۲۰	۲۲۰۹ و ۲۴۱۴	۲۲۰/۹۴۳	۱۸۱/۲۴۵	۱۷/۹۶٪
سد شهریار	۱۲۲۴	۱۲۰۰/۲۳۴	۳۱۲/۵۵	۲۸۹/۱۵۴	۷/۴۸٪
	۱۳۲۴	۱۳۱۹/۹۹۶			
	۲۰۳۰	۲۰۲۶/۰۷۴			
	۲۲۳۰	۲۲۲۵/۹۷۹			
بن‌ریزی تونل پنستاک	۷۹۰۰ و ۵۷۰۰	۷۸۶۴/۶۳۷ و ۵۶۸۱/۳۵	۱۲۵۳/۱۴۷	۱۱۸۶/۹۵۱	۵/۲۳٪

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، بهینه‌سازی پنستاک‌های مدفون، موجب کاهش حجم پنستاک و حجم خاکبرداری و بتن‌ریزی نیز می‌گردد. با توجه به اینکه عملیات خاکبرداری و بتن‌ریزی از جمله عملیات پرهزینه بشمار می‌روند به نظر می‌رسد در مناطقی که احداث نیروگاه زیرزمینی و اجرای پنستاک‌های مدفون اجتناب‌ناپذیر می‌باشد انتخاب تابع حجم پنستاک به عنوان تابع هدف، تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های ساخت و اجرای پنستاک خواهد داشت. اما در پنستاک‌های روکار با تابع هدف مشابه، بهینه‌سازی تنها موجب کاهش هزینه ساخت پنستاک می‌گردد. همچنین ملاحظه می‌شود که میزان کاهش حجم پنستاک برای سد شهریار کمتر است. دلیل امر این است که پیچیدگی تابع هدف و قیود در سد شهریار نسبت به سد Shasta بیشتر می‌باشد. همچنین به دلیل انشعاب پنستاک سد شهریار در نزدیکی محل نیروگاه و نیز تغییر در تراز قرارگیری پنستاک‌های انشعاب یافته نسبت به پنستاک اصلی، میزان افت‌های موضعی در سد شهریار بیشتر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله از مدل بهینه‌سازی مقید برای یافتن ابعاد پنستاک با تابع هدف حجم پنستاک و قیود هیدرولیکی و سازه‌ای استفاده گردید. به دلیل پیچیدگی مسئله و غیرخطی بودن تابع هدف و قید، استفاده از الگوریتم‌های مرسوم ریاضی دشوار است از اینرو از روش هوشمند الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. با توجه به قابلیت جستجوی الگوریتم و کارایی بالا، این روش توانسته است حجم موارد مطالعاتی را به میزان قابل قبولی کاهش دهد. پنستاک‌های مورد مطالعه در این مقاله از دو نوع مدفون و روکار انتخاب شده‌اند. کاهش حجم پنستاک سد

#### ۸- مراجع

- [1] IEA, International Energy Agency, "Energy Balances of OECD Countries", 2004-2005, 2008 Edition.
- [2] Souren, B., Hadjian, R., "Optimization and Design of Underground Embedded Penstocks", PhD Thesis, University of Concordia, Department of Civil Engineering, Canada, 1980.

- Distribution Networks", *Journal of Water Resource Planning and Management*, 1997, 123(2), 67-77.
- [14] Murfy, L.J., Simpson, A.R., Dandy, G.C., "Design of a Network Using Genetic Algorithms", *Journal of Water Resource Research*, 1993, 20, 40-46.
- [15] Dandy, G. C., Simpson, A. R., Murphy, L. J., "An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization", *Journal of Water Resource Research*, 1996, 32(2), 449-458.
- [16] Ritzel, B.J., Eheart, J.W., and Rajithan, S., "Using Genetic Algorithm to Solve a Multiple Objective Groundwater Pollution Problem", *Journal of Water Resource Research*, 1994, 30(5), 1598-1603.
- [17] Marcos. M., & Silvosio, Eduardo. M. R., and Fairbairn, "Optimization Of Dam Construction Costs Using Genetic Algorithms", Sixteen ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, 16-18 July, 2003.
- [18] Faneli, A., and Faneli, M.A., "Optimal Proportioning of Arch Gravity Dams", *Journal of Water Power and Dam Construction*, 1992, 3(4), 265-275.
- [19] Nourani, V., "Application of Meta-Heuristic Optimization Approaches to Investigate Velocity Profile Effect on Optimal Design of Open Channels". In Hirsch, G., and Kappel, B., (eds), *Hydraulic Engineering: Structural Applications, Numerical Modeling and Environmental Impacts (Engineering Tools, Techniques and Tables Series)*, Nova Science Pub Inc, US, 2010.
- [20] Holland, J.H., "Adaption in Natural and Artificial Systems", the University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, 1975.
- [21] Sivanandam, S.N., Deepa, S.N., "Introduction to Genetic Algorithm", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [22] Zalzal, A.M., Fleming, P.J., "Genetic Algorithm in Engineering Systems", Published by Institution of Electrical Engineering, London, 1999, 1, 355-372.
- [3] Anonymous, "Welded steel Penstocks", A Water Resource Technical Publication, Engineering Monograph No.3, United State Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1986, Vol, I, pp 10-40.
- [4] Andaroodi, M.R., "Standardization of Civil Engineering Works of Small High Head Hydropower Plants and Development of an Optimization Tool", PhD Thesis, University of Canterbury, Department of Civil Engineering, 2006.
- [5] Fresen, M.H., Votesh, Ch., "Economic Diameter of Steel Penstock", *Transactions, ACSE*, 1983, 103(3), 54-62.
- [۶] حقیقی‌پور، ص، جهرمی، ع، بینا، ر، بینا، م، " بهینه‌سازی تعداد انشعابات پنستاک در سیستم انتقال آب نیروگاه برق آبی"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۶-۱۸ آبان، ۱۳۸۹.
- [7] Dong, W.S., Dang, C.H., Deng, Z.C., Liu, D.C., "Stability Analysis of Penstock under External Pressure Based on GA-NN", *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2006, 23(2), 304-307.
- [8] Purwati, E., Wahyun, H.I., "Optimization on Penstock Dimension of Ample Gading Hydro Electrical Power, Indonesia", *International Journal of Academic Research*, 2010, 2(6), 308-312.
- [9] Esat, V., Hall, M.J., "Water Resources System Optimization Using Genetic Algorithm", *Hydro Informatics '94, Proc., 1st Int. Conf. on Hydro informatics*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1994, pp 225-231.
- [10] Wardlaw, R., Sharif, M., "Evaluation of Genetic Algorithm for Optimal Reservoir System Operation", *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 1999, 125(1), 25-33.
- [11] Oliviera, R., Loucks, D. P., "Operating Rules for Multi Reservoir Systems", *Journal of Water Resource Research*, 1997, 33(4), 1589-1603.
- [12] Wang, Q.J., "The genetic Algorithm and its Application to Calibration Conceptual Rainfall-Runoff Modals", *Journal of Water Resource Research.*, 1991, 27(9), 2467-2471.
- [13] Walters, G.A., Savic, D.A., "Genetic Algorithm for Least cost Design of Water