

## افزایش توان جریان در لوله‌های فشار قوی انتقال آب نیروگاه‌های برقآبی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

نازیلا کاردان<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۴

### چکیده

به کارگیری نیروگاه‌های برقآبی، یکی از راهکارهای مقابله با کمبود آب در جهان به شمار می‌رود. از سویی دیگر افزایش نیروی الکتریسته تولیدی با استفاده از انرژی آب بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به هزینه بالای احداث سد و تامین بار آبی مورد نیاز نیروگاه‌های برقآبی، طراحی بهینه این تاسیسات در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در میان اجزای تشکیل دهنده این تاسیسات، پنستاک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اهمیت پنستاک به دلیل هزینه‌ی بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می‌باشد طوری که بالغ بر سی درصد هزینه‌های نیروگاه به ساخت این سازه هیدرولیکی اختصاص می‌یابد. از این رو طراحی بهینه برای کاهش هزینه‌های احداث نیروگاه‌های برقآبی ایفا خواهد نمود. استفاده از روش‌های بهینه‌یابی فرا کاوشی برای بهینه‌سازی سازه‌های مختلف، یکی از مهم‌ترین مباحث مطرح شده در طراحی این سازه‌ها بوده است. در میان الگوریتم‌های فرا کاوشی، روش بهینه‌یابی اجتماع ذرات به عنوان یک ابزار قوی و مناسب در بسیاری از زمینه‌ها مورد توجه بوده است. موضوع این پژوهش ارائه طرح بهینه برای بیشینه نمودن توان جریان بر خوردی به توربین‌های نیروگاه و کاهش افت فشار با هدف کنترل جریان‌های میرا در مسیر پنستاک بوده که در این راستا الگوریتم اجتماع ذرات به عنوان مطالعه موردی انتخاب و به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصله، جریان خروجی از پنستاک‌های سد شهریار به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان افت انرژی در مجموع از مقدار ۲۹/۱۱ متر به ۱۱/۹۲ متر کاهش یافته که این امر خود موجب افزایش راندمان و کارایی لوله‌های فشار قوی انتقال می‌گردد. میزان افت فشار ناشی از تغییرات ناگهانی جریان در سیستم انتقال، قبل از بهینه‌یابی ۳۱۵/۹ کیلوپاسکال است که با تغییر در ابعاد پنستاک، مقدار آن به ۱۱۶/۷ کیلوپاسکال کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد با کاهش افت فشار، از آسیب‌های ناشی از ایجاد جریان‌های میرا در سیستم انتقال به شدت کاسته می‌شود. همچنین توان جریان نیز از ۲۵ مگاوات به ۲۸ مگاوات افزایش یافته است که در مجموع معادل ۱۱٪ درصد افزایش توان جریان خروجی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اجتماع ذرات، بهینه‌یابی، پنستاک، توان جریان، نیروگاه برقآبی.

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، شماره تماس: ۰۹۱۴۴۱۸۶۵۷۹  
[n.kardan@azaruniv.edu](mailto:n.kardan@azaruniv.edu) (مسئول مکاتبه)

## مقدمه

بحران کمبود آب و بکارگیری نسل جدید انرژی‌های سازگار با محیط زیست که مطابق با ویژگی‌های توسعه پایدار نیز باشد، از مهم‌ترین چالش‌های روز دنیا به شمار می‌رود. یکی از راهکارهای مقابله با این چالش، احداث سد و ایجاد نیروگاه برقآبی است. نیروی برقآبی یا هیدروالکتریسیته اصطلاحی است که به انرژی الکتریکی تولیدی از نیروی آب اطلاق می‌شود. در حال حاضر هیدروالکتریسیته سهم بسیار بزرگی از انرژی الکتریکی تولیدی جهان را پوشش می‌دهد. نیروی برقآبی همچنین ۶۳٪ از انرژی الکتریکی تولیدی از منابع تجدیدپذیر را نیز شامل می‌گردد. مهم‌ترین مزیت استفاده از نیروگاه‌های برقآبی عدم نیاز به استفاده از سوخت‌ها و به دنبال آن حذف هزینه‌های مربوط به تامین سوخت است. همچنین عمر متوسط نیروگاه‌های آبی در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی بیشتر است (لطف‌اللهی و کاردان، ۱۳۹۲). نکته اساسی در استفاده از نیروگاه‌های برقآبی، هزینه بالای ساخت و پیچیدگی عوامل دخیل بر تاسیسات آن می‌باشد. زمانی که ساختمان نیروگاه برقآبی و تاسیسات آن توأم با سد ساخته شود اهمیت آن دو چندان می‌گردد زیرا علاوه بر تامین ایمنی و راندمان سد، ایمنی و کارایی نیروگاه نیز باید مورد توجه قرار گیرد. هر نیروگاه برقآبی از قسمت‌های مختلفی مانند سد (بتنی یا خاکی)، سازه آبگیر، لوله‌های فشار قوی انتقال آب پستاک، مخازن موج‌گیر، توربین و تجهیزات تولید برق تشکیل یافته است. در میان اجزای تشکیل دهنده نیروگاه برقآبی، پستاک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اهمیت پستاک به علت هزینه‌ی بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می‌باشد طوری که حدود ۳۰٪ هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌های برقآبی به آن اختصاص می‌یابد. از این‌رو طراحی بهینه این عضو سازه‌ای می‌تواند در کاهش هزینه‌های احداث توأم سد و نیروگاه موثر واقع گردد (لطف‌اللهی و کاردان، ۱۳۹۲).

به منظور آشنایی بیشتر با پستاک، در ادامه به بررسی تحقیقات انجام گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود. اصول و روش طراحی پستاک‌های فولادی و بتنی نخستین بار توسط Souren and Hadjian (1980) ارائه گردید. در این روش پس از طراحی اولیه، مقادیر به دست آمده از طریق آزمون و خطا بهینه شدند. در پژوهشی دیگر Fresen and Votesch (1983) به بهینه‌یابی پستاک پرداختند. هدف این تحقیق بیشینه نمودن انرژی تولیدی نیروگاه بوده که دبی ورودی به آن به عنوان مهم‌ترین متغیر در افزایش انرژی تولیدی تعریف شده است. سازمان تحقیقات آمریکا (۱۹۸۶) طی تحقیقی به ارائه اصول طراحی پستاک‌های فولادی پرداخته است. در سال ۲۰۰۶، Andaroodi با استفاده از برنامه POPEHYE<sup>۱</sup> به بهینه‌سازی اجزای نیروگاه‌های برقآبی از جمله پستاک پرداخته و نتایج حاصله را به صورت نمودارهایی ارائه نموده است. Dong et al. (2006) پایداری پستاک‌های فولادی تحت فشار خارجی را مورد بررسی قرار دادند.

Purwati and Wahyun (2010) به بهینه‌یابی ابعاد پستاک فولادی نیروگاه برقآبی Ample Gading در اندونزی پرداختند. در این تحقیق هدف تعیین قطر و ضخامت بهینه برای پستاک بوده است. Flotow (2012) به بهینه‌یابی مسیر پستاک‌های مدفون برای احداث نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی پرداخت. در سال ۱۳۹۰ نورانی و همکاران حجم پستاک‌های فولادی و بتنی را به کمک الگوریتم GA بهینه‌یابی نمودند. در این پژوهش لوله‌های فشار قوی سد Shasta در آمریکا و سد شهریار در ایران به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده‌اند. لطف‌اللهی و کاردان (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچگان لوله‌های فشار قوی سد شهریار را بهینه‌یابی نمودند. در این پژوهش کمینه نمودن وزن پستاک به عنوان تابع هدف اختیار گردیده است.

<sup>1</sup> Pre-dimensioning and Economical Optimization of Small Hydropower Plants

نشده است. با توجه به اینکه تغییر در ابعاد پنستاک و مقدار افت انرژی در طول مسیر آن مستقیماً بر روی توان جریان خروجی و سرعت ضربه جریان تاثیرگذار می‌باشد، در پژوهش پیش‌رو سعی گردیده است از روش الگوریتم اجتماع ذرات به منظور افزایش توان جریان خروجی از لوله‌های پنستاک استفاده شود. در ادامه، ابتدا مفاهیم کلی الگوریتم اجتماع ذرات، تابع هدف و قیود مساله بیان گردیده و نیز توضیحاتی در مورد دلایل انتخاب آن‌ها ارائه شده است. سپس با معرفی مطالعه موردی و انجام آنالیز حساسیت، آرایش بهینه الگوریتم PSO برای مورد مطالعاتی نشان داده شده است. قسمت انتهایی مقاله نیز به بیان نتایج حاصله، مقایسه و تحلیل آن‌ها اختصاص یافته است.

## مواد و روش‌ها

### الگوریتم اجتماع ذرات

در دهه‌های اخیر همزمان با مطرح شدن اهمیت بهینه‌سازی سازه‌های مهم هیدرولیکی، روش‌های جدید بهینه‌سازی نیز مورد توجه قرار گرفتند. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشند که توانایی حل مسائل با تعداد متغیر زیاد و ابعاد بزرگ را دارا می‌باشند. از سوی دیگر مسائل مورد توجه در مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی اغلب دارای متغیرهای زیاد و توابع غیر خطی هستند که بر پیچیدگی مساله می‌افزاید. لذا استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم اجتماع ذرات در حل این گونه مسائل مورد توجه قرار گرفته‌اند.

الگوریتم اجتماع ذرات PSO، بهینه‌سازی رفتار دسته جمعی است که ایده اصلی آن توسط کندی و ابرهارت از نحوه حرکت پرندگان و ماهیان و زندگی اجتماعی آنان نشأت گرفته شده است (Kennedy and Eberhart, 1995). این الگوریتم مانند سایر تکنیک‌های محاسباتی تکاملی از یک جمعیت که همان راه حل‌های بالقوه مساله می‌باشد، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. جمعیت

با گسترش الگوریتم‌های فراکاوشی<sup>۱</sup>، الگوریتم اجتماع ذرات به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های هوش مصنوعی در زمینه‌های مختلفی از جمله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا مطالعات انجام یافته در خصوص استفاده از الگوریتم PSO<sup>۲</sup> در بهینه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی بررسی شده است.

Gill et al. (2006) از الگوریتم بهینه‌یابی PSO توسعه یافته برای تخمین پارامترهای یک مدل بارش-رواناب استفاده نمودند. (Baltar and Fontane 2008) الگوریتم MOPSO را برای حل مساله بهره‌بردار از مخازن با چهار تابع هدف به کار بردند. (Izquierdo et al. 2008) سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب را به کمک الگوریتم PSO، بهینه‌یابی نمودند. (Montalvo et al. 2008) الگوریتم PSO به منظور بهینه‌یابی سیستم‌های تامین آب بهره گرفتند. ایشان نتیجه گرفتند این الگوریتم یک روش بهینه‌یابی بسیار مناسب در مسائلی است که سیستم دارای متغیرهای طراحی گسسته می‌باشد. سروری و همکاران (۱۳۸۵) الگوریتم بهینه‌یابی PSO را جهت طراحی بهینه حجم مخازن سدها به کار گرفتند و با مقایسه نتایج این روش با روش بهینه‌سازی خطی، کارآمدی این الگوریتم در رسیدن به جواب‌های بهینه را نشان دادند. سلاجقه و همکاران (۱۳۸۷) شکل گنبدی فضای کار را به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اصلاح یافته BPSO بهینه‌سازی نمودند. آزادنی و زهرایی (۱۳۸۹) الگوریتم بهینه‌یابی PSO را جهت بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌بردار از مخازن به کار گرفتند. حاجی کاظمی (۱۳۸۹) به بهینه‌سازی عرضه و تقاضای آب شهری شهر تبریز با استفاده از الگوریتم توسعه یافته PSO پرداخت.

در پژوهش‌های انجام یافته توسط سایر محققین، تمرکز مطالعات تنها بر بهینه‌یابی ابعاد و مسیر پنستاک بوده و به نقش بهینه‌یابی ابعاد خطوط انتقال بر توان جریان برخوردی به توربین‌های نیروگاه اشاره

<sup>۱</sup>Meta-Heuristic

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (۴)$$

در رابطه فوق،  $w^k$  ضریب اینرسی ذره می‌باشد. در اجرای  $PSO$  مقدار  $w$  به صورت خطی از مقدار بیشینه ۱ در آغاز جستجو تا نزدیک صفر در انتهای جستجو کاهش می‌یابد. مقدار  $w$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times k}{iter_{\max}} \quad (۵)$$

که  $w_{\max}$  و  $w_{\min}$  به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه برای ضریب اینرسی ذره می‌باشند.  $k$  نشان دهنده مرحله تکرار و  $iter_{\max}$  تعداد کل تکرارها می‌باشد.  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی (این پارامترها ضرایب شتاب نیز نامیده می‌گردند) می‌باشند. انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌گردد. تحقیقات نشان می‌دهد انتخاب مقدار بزرگ‌تر برای پارامتر  $C_1$  نسبت به پارامتر  $C_2$  مناسب‌تر است لیکن شرط  $C_1 + C_2 \leq 4$  همواره باید برقرار باشد. به طور معمول مقادیر  $C_1$  و  $C_2$  عددی بین ۱/۵ تا ۲ به خود می‌گیرند (Kennedy and Eberhart, 1995).  $rand_1$  و  $rand_2$  مقادیر تصادفی در بازه  $[0,1]$  می‌باشند که برای حفظ تنوع و گوناگونی به کار برده می‌شوند.  $V_i^{k+1}$  سرعت ذره  $i$  در تکرار جدید،  $V_i^k$  سرعت ذره  $i$  در تکرار فعلی،  $X_i^{k+1}$  موقعیت ذره  $i$  در تکرار جدید و  $X_i^k$  موقعیت ذره  $i$  در تکرار فعلی می‌باشد. همچنین سرعت ذره  $i$  در هر بعد از فضای جستجوی  $D$  بعدی در بازه  $[-V_{\max}, +V_{\max}]$  محدود می‌گردد تا احتمال ترک فضای جستجو توسط ذره کم شود (Kennedy and Eberhart, 2001 و Chen et al., 2008).

تصادفی اولیه در این الگوریتم مجموعه‌ای از ذرات است که هر ذره یک نقطه از فضای پاسخ مساله را نشان می‌دهد. لذا الگوریتم با مجموعه‌ای از پاسخ‌های تصادفی آغاز به کار می‌کند و سپس برای یافتن پاسخ بهینه در فضای مساله با به‌هنگام کردن موقعیت و سرعت ذره‌ها به جستجو می‌پردازد. مشخصات هر ذره در گروه بر اساس مجموعه‌ای از پارامترها تعیین می‌گردد. حرکت هر ذره در دو راستا صورت می‌گیرد. مسیر اول بهترین موقعیتی است که هر ذره تا کنون اختیار کرده و مسیر دوم بهترین مسیر حرکت تمامی ذرات می‌باشد. در این الگوریتم، تغییر موقعیت هر ذره در فضای جستجو بر اساس تجربه و دانش خود و سایر ذرات انجام می‌پذیرد (Gill et al., 2006).

در ابتدا فرض می‌گردد یک مساله خاص دارای فضای  $D$  بعدی می‌باشد. در این فضا، هر ذره  $i$  با دو مقدار  $X$  و  $V$  که به ترتیب نشان دهنده موقعیت و سرعت ذره است، مشخص می‌گردد. مجموع ذرات در فضای جستجو، جمعیت ( $N$ ) نامیده می‌گردد. هر ذره مکان خود را در فضای جستجو و در بین جمعیت، با توجه به بهترین مکانی که تاکنون تجربه کرده است ( $P_{best}$ ) و بهترین مکانی که در همسایگی‌اش وجود دارد ( $G_{best}$ ) تنظیم می‌کند. برای هر ذره  $i$  و  $G_{best}$  برای هر گروه ذرات در فضای جستجوی  $D$  بعدی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\overline{P_{best_i}} = (\overline{P_{i1}}, \overline{P_{i2}}, \overline{P_{i3}}, \dots, \overline{P_{iD}}) \quad (۱)$$

$$G_{best} = (G_1, G_2, G_3, \dots, G_D) \quad (۲)$$

بدین ترتیب، سرعت و موقعیت جدید ذره  $i$  ام در مرحله  $k$  توسط روابط زیر به‌هنگام می‌شوند:

$$V_i^{k+1} = w^k V_i^k + C_1 rand_1 (P_{best_i} - X_i^k) + C_2 rand_2 (G_{best} - X_i^k) \quad (۳)$$

## نیروگاه‌های برقآبی

$$K = \text{Max}(\omega\{X\}) \quad (۶)$$

که  $K$ : تابع هدف،  $\omega(x)$ : توان جریان و  $\{x\}$ : بردار متغیرها می‌باشد. تنها متغیر طراحی در تابع فوق، قطر لوله در نقاط مختلف پنستاک می‌باشد. با توجه به این که مقدار افت موضعی در مقایسه با افت اصطکاکی ناچیز می‌باشد، انتخاب پارامترهایی نظیر شعاع خم یا زاویه خم به عنوان متغیرهای طراحی و کاهش ضرایب افت موضعی، تاثیر قابل توجهی در نتایج نداشته و استفاده از آن‌ها صرفاً حجم و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. با تعریف توان جریان به صورت  $\rho QgH$  تابع هدف به فرم زیر بازنویسی می‌شود:

$$\text{Maximize } \omega(\{X\}) = \rho Qg (H - h_T) \quad (۷)$$

$$h_T = \sum_{i=1}^n (h_T)_i$$

در رابطه فوق،  $\omega\{X\}$ : توان جریان،  $Q$ : دبی جریان،  $\rho$ : دانسیته آب،  $g$ : شتاب ثقل،  $H$ : بار آبی کل و  $h_T$ : کل افت انرژی در پنستاک و  $n$ : تعداد لوله‌های با قطر متفاوت در پنستاک می‌باشد. برای محاسبه افت انرژی و توان جریان روابط ارائه شده در جدول (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در جدول (۱)،  $V$ : سرعت جریان،  $A$ : سطح مقطع لوله،  $D_H$ : قطر هیدرولیکی،  $\varepsilon$ : ارتفاع زبری جدار لوله،  $D$ : قطر لوله،  $L$ : طول لوله،  $C$ : ضریب هیزن ویلیامز،  $f$ : ضریب افت اصطکاکی و  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی سیال آب می‌باشد. در استفاده از این روابط فرضیات زیر مورد توجه قرار گرفته‌اند:

نیروگاه‌های برقآبی انرژی مورد نیاز خود را از انرژی پتانسیل آب پشت سد تامین می‌کنند. در این حالت انرژی تولیدی، به حجم آب پشت سد و اختلاف ارتفاع بین تراز آب مخزن سد و محل خروج آب از لوله‌های انتقال آب وابسته است. به عبارتی انرژی پتانسیل آب با ارتفاع فشاری متناسب می‌باشد. برای رسیدن جریان از پشت سد به توربین‌های آبی، آب باید فاصله زیادی در لوله‌های پنستاک طی کند. در این مسیر حرکتی، جریان دچار افت‌های انرژی می‌گردد که این افت انرژی، کاهش انرژی فشاری و به دنبال آن کاهش توان جریان را موجب می‌گردد. لذا با کاهش افت انرژی در طول مسیر پنستاک، می‌توان توان جریان برخورداردی به توربین‌های آبی را افزایش داد. در این راستا دو افت انرژی، افت اصطکاکی و افت موضعی، مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به مسیر طولانی پنستاک، می‌توان از افت‌های موضعی در برابر افت اصطکاکی صرف نظر نمود لیکن به دلیل افزایش دقت محاسبات، افت‌های موضعی نیز در محاسبات وارد می‌گردد (Flotow, 2012).

## تابع هدف

در مساله بهینه‌سازی حاضر، بیشینه نمودن توان جریان برخورداردی به توربین‌های نیروگاه به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. به ازای دبی ثابت که از مقطع لوله عبور می‌کند، کاهش افت انرژی جریان موجب می‌گردد تا توان جریان خروجی از لوله‌های پنستاک افزایش یابد. با توجه به رابطه عکس افت انرژی با قطر لوله، افزایش قطر لوله کاهش افت انرژی را نتیجه می‌دهد. با تغییر در قطر لوله، تنش‌های داخلی و خارجی وارده بر پنستاک نیز تغییر می‌یابند. لذا کاهش افت انرژی و افزایش توان جریان باید به گونه‌ای باشد که تنش‌های وارده بر لوله همواره کمتر از مقدار مجاز باقی بمانند. تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌گردد:

جدول (۱): روابط مورد استفاده در محاسبات توان جریان

نام رابطه	رابطه	شرح
عدد رینولدز	$Re = \frac{\rho V_{ave} D_H}{\mu} = \frac{V_{ave} D_H}{\nu} = \frac{Q D_H}{\nu A}$	برای بررسی نوع جریان به لحاظ آرام، انتقالی و یا آشفته بودن آن است. اگر $Re < 2000$ ، جریان از نوع آرام است. اگر $Re > 4000$ ، جریان از نوع آشفته است. در غیر این صورت جریان انتقالی خواهد بود.
زبری نسبی	$\varepsilon / D$	در محاسبه ضریب اصطکاک $f$ از جدول مودی با عدد رینولدز به کار برده می‌شود.
ضریب زبری مودی	$f = f(Re, \varepsilon / D)$	ضریب زبری است که در رابطه دارسی-وایسباخ به کار برده می‌شود.
افت موضعی	$h_L = k_L \frac{V_{ave}^2}{2g}$	برای محاسبه افت‌های موضعی بر حسب سرعت متوسط جریان در لوله خواهد بود.
افت اصطکاکی	$h_f = f \frac{L V_{ave}^2}{D 2g} = \lambda f \frac{L Q^2}{\pi^2 g D^5}$ $h_f = 10.67 \frac{LQ^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}}$	دارسی - وایسباخ هیزن - ویلیامز رابطه‌ای برای محاسبه افت انرژی اصطکاکی است.
افت فشار	$\Delta P = \rho g h_T, h_T = h_f + h_L$	محاسبه افت فشار در مسیر لوله بر حسب افت‌های موضعی و اصطکاکی
توان جریان	$\omega = \rho Q g (H - h_T)$	محاسبه توان جریان

عوامل محیطی، به عنوان قیود سازه‌ای منظور می‌گردند.

در پنستاک‌های مدفون فشار خارجی ممکن است ناشی از تغییرات حجمی بتن تحت تاثیر دمای اطراف باشد. همچنین فشار آب حفره‌ای ناشی از ترک‌خوردگی سنگ‌ها نیز ممکن است یکی از عوامل ایجاد کننده فشار خارجی در این نوع از پنستاک‌ها باشد (نورانی و همکاران، ۱۳۹۰).

$$\frac{P_{in}}{\gamma} + \frac{V_{in}^2}{2g} + h_{in} = \frac{P_{out}}{\gamma} + h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2g} + h_T$$

$$\sigma_{r(i)} < \sigma_{all} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

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

که  $\sigma_{r(i)}$  تنش شعاعی ناشی از فشار داخلی و  $P_{r(i)}$  فشار خارجی وارد بر پنستاک در لوله  $i$  می‌باشد.  $\sigma_{all}$  مقدار مجاز تنش داخلی بوده و برای مطالعه موردی سد شهریار مساوی ۲۶۶/۲۵ مگاپاسکال است.  $P_{all}$  به صورت مقدار مجاز تنش برای فشار خارجی تعریف

سیال آب غیر قابل تراکم است، جریان دائمی است (پنستاک همواره دارای آب خواهد بود)، دمای آب ثابت و مساوی  $T = 20^\circ C$  است، مصالح مورد استفاده و سیال آب دارای مشخصات ثابت است، ضریب نازل در انتهای پنستاک ۱ بوده و کلیه محاسبات افت انرژی در لوله‌ها تا قبل از آغاز ساختمان نیروگاه انجام می‌گیرد. افت انرژی مربوط به تجهیزات نیروگاه برآبی، بعد از توربین‌های آبی و در محل نیروگاه اعمال می‌گردد.

### تابع قید

در بهینه‌یابی پنستاک بایستی لوله هم به لحاظ هیدرولیکی و هم به لحاظ سازه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. لذا قیود مساله در دو گروه قیود هیدرولیکی و قیود سازه‌ای قرار می‌گیرند. برقراری معادله انرژی بین سازه آبرگیر در بدنه سد (ابتدای پنستاک) و توربین‌های نیروگاه، به عنوان قید هیدرولیکی و کنترل تنش‌های ناشی از فشار داخلی جریان و فشار خارجی ناشی از

$$\begin{aligned} P\sigma_{r(i)} &= (\sigma_{r(i)} - \sigma_{all}) / \sigma_{all} \\ PP_{r(i)} &= (P_{r(i)} - P_{all}) / P_{all} \\ \omega_{Penalty} &= |g(x)| - \varepsilon_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $g(x)$  قید هیدرولیکی مساله (معادله انرژی) و  $\varepsilon_2$  خطای قابل قبول برای افت انرژی در طول مسیر می‌باشد.

با جایگذاری قید هیدرولیکی مساله (رابطه ۱۰) در رابطه (۹)، تابع برازندگی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \omega_{Fitness} &= k \left[ \left( \frac{(\sigma_{r(i)} - \sigma_{all})}{\sigma_{all}} + \frac{(P_{r(i)} - P_{all})}{P_{all}} + 1 \right)^\varepsilon \right. \\ &\quad \left. + \varepsilon_1 |g(x)| - \varepsilon_2 \right]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

### مطالعه موردی

به منظور ارزیابی کارایی مدل ارائه شده در مساله بهینه‌یابی، توان جریان خروجی از پنستاک سد شهریار به عنوان مطالعه موردی، بررسی شده است. سد شهریار، سد بتنی دو قوسی می‌باشد که در ۳۶ کیلومتری شمال شرقی شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی واقع گردیده است. ارتفاع این سد ۱۳۵ متر و طول و عرض آن به ترتیب ۲۰۷ و ۵ متر می‌باشد. بار آبی طراحی آن ۶۷/۱ متر است و افزایش بار آبی با اعمال تاثیر ضربه قوچ ۳۰٪ بوده که برابر ۸۷/۲۳ متر محاسبه شده است. توان جریان برخوردی به توربین‌های این نیروگاه ۲۵ مگاوات می‌باشد. شکل (۱) انشعاب پنستاک‌ها در محل توربین‌های نیروگاه را نشان می‌دهد. در جدول (۲) مشخصات کلی لوله‌ها و اتصالات و در جداول (۳) مشخصات هیدرولیکی لوله‌های پنستاک ارائه شده است. تمامی لوله‌ها از جنس فولاد با جرم مخصوص  $7185 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$  می‌باشند (دفترچه محاسباتی سد شهریار، ۱۳۸۴).

شده و مقدار آن برابر ۰/۶۵۸ مگاپاسکال می‌باشد (دفترچه محاسباتی سد شهریار، ۱۳۸۴).  $P_{in}$  و  $P_{out}$  فشار جریان به ترتیب در مقطع ورودی و خروجی لوله،  $V_{in}$  و  $V_{out}$  سرعت جریان به ترتیب در مقطع ورودی و خروجی لوله،  $h_{in}$  و  $h_{out}$  به ترتیب بار آبی مقطع ورودی و نیز محل قرارگیری توربین نسبت به تراز مبنا و  $h_T$ ، میزان تلفات انرژی جریان از ابتدا تا انتهای مسیر پنستاک می‌باشد. عبارت  $h_T$  مجموع افت اصطکاکی و افت‌های موضعی را شامل می‌گردد.

### تابع برازندگی

با تعریف تابع هدف و قیود و ترکیب آن‌ها تابع برازندگی<sup>۱</sup> نتیجه می‌شود. در الگوریتم‌های فراکاوشی روش‌های مختلفی جهت اعمال قیود به تابع هدف وجود دارد که روش رایج در الگوریتم اجتماع ذرات استفاده از تابع جریمه می‌باشد. در مقاله حاضر نیز روش فوق مورد استفاده قرار گرفته است (لطف‌اللهی و کاردان، ۱۳۹۲). تابع برازندگی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

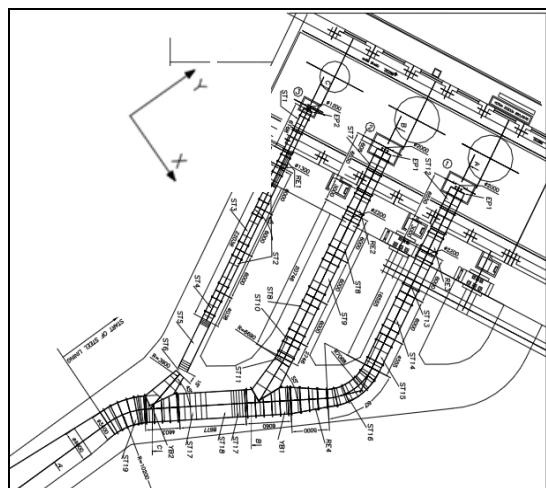
$$\omega_{Fitness} = k \left[ \left( P\sigma_{r(i)} + PP_{r(i)} + 1 \right)^\varepsilon \right] + \varepsilon_1 |\omega_{Penalty}|^2 \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $\omega_{Fitness}$  تابع برازندگی،  $k$  تابع هدف،  $P\sigma_{r(i)}$  ضریب جریمه تنش داخلی،  $PP_{r(i)}$  ضریب جریمه فشار خارجی و  $\omega_{Penalty}$  تابع جریمه معادله انرژی می‌باشد.  $\varepsilon_1$  ضریب جریمه بوده و یک عدد مثبت بزرگ می‌باشد که مقدار آن بین ۲ تا ۱۰ تغییر می‌کند (Yeniay, 2005).  $\varepsilon$  توان تابع جریمه و عددی بین ۰ و ۱ است که با توجه به مساله و با اجرای برنامه به ازای  $\varepsilon$ ‌های مختلف، مقدار مناسب آن انتخاب می‌گردد.  $P\sigma_{r(i)}$ ،  $PP_{r(i)}$  و  $\omega_{Penalty}$  طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند:

<sup>۱</sup> Fitness Function

ادامه جدول (۲): مشخصات پنستاک‌های فولادی سد شهریار (دفترچه محاسباتی سد شهریار، ۱۳۸۴)

شماره لوله	قطر لوله mm	ضخامت لوله mm	طول لوله mm	دبی لوله $m^3/s$
ST-۱۸	۳۴۰۰	۱۵	۴۰۸۳	۱۶
ST-۱۹	۳۴۰۰	۱۵	۵۶۹۷	۱۶
YB-۱	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۱۶
YB-۲	۱۳۰۰	۱۲	۶۰۰۰	۱۶
Re-۱	۱۲۰۰	۱۲	۲۰۰۰	۱۶
Re-۲	۲۰۰۰	۱۵	۳۰۰۰	۱۶
Re-۳	۲۰۰۰	۱۵	۳۰۰۰	۱۶
Re-۴	۲۲۰۰	۱۵	۵۰۰۰	۱۶



شکل (۱): انشعاب پنستاک سد شهریار در محل نیروگاه برقآبی (دفترچه محاسباتی سد شهریار، ۱۳۸۴)

جدول (۲): مشخصات پنستاک‌های فولادی سد شهریار (دفترچه محاسباتی سد شهریار، ۱۳۸۴)

شماره لوله	قطر لوله mm	ضخامت لوله mm	طول لوله mm	دبی لوله $m^3/s$
ST-۱	۱۲۰۰	۱۲	۶۱۶۸	۴
ST-۲	۱۳۰۰	۱۲	۱۲۰۰۰	۴
ST-۳	۱۳۰۰	۱۲	۶۰۰۰	۴
ST-۴	۱۳۰۰	۱۲	۴۰۳۸	۴
			۱۱۵۲	
			۵۸۶۱	
ST-۵	۱۳۰۰	۱۲	+	۴
			۱۱۵۲	
ST-۶	۱۳۰۰	۱۲	۱۰۲۱	۴
ST-۷	۲۰۰۰	۱۵	۵۹۵۴	۶
ST-۸	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۶
ST-۹	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۶
ST-۱۰	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۶
ST-۱۱	۲۲۰۰	۱۵	۱۷۲۸	۶
ST-۱۲	۲۰۰۰	۱۵	۵۹۴۵	۶
ST-۱۳	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۶
ST-۱۴	۲۲۰۰	۱۵	۶۰۰۰	۶
ST-۱۵	۲۲۰۰	۱۵	۴۵۵۵	۶
ST-۱۶	۲۲۰۰	۱۵	۷۴۰۲	۶
ST-۱۷	۳۴۰۰	۱۵	۲۸۸۰	۱۶

### نتایج و بحث

هدف استفاده از مدل PSO، کاهش افت انرژی جریان و بیشینه نمودن توان جریان برخوردی به توربین‌های نیروگاه با تغییر در مقدار متغیرهای طراحی می‌باشد طوری که همزمان قیود اعمالی به مساله نیز برآورده گردند.

جدول (۳): ضرایب افت اصطکاکی لوله‌های پنستاک

شماره	قطر متوسط لوله mm	طول لوله mm	ضریب افت اصطکاکی	
			مودی	هیزن - بلیامز
۱	۱۲۰۰	۶۱۶۸	۰/۰۱۶	۱۴۰
۲	۱۳۰۰	۳۱۲۲۴	۰/۰۱۶	۱۴۰
۳	۲۰۰۰	۵۹۵۴	۰/۰۱۶	۱۴۰
۴	۲۲۰۰	۴۹۶۳۰	۰/۰۱۷	۱۴۰
۵	۳۴۰۰	۱۵۵۴۰	۰/۰۱۷	۱۴۰
انشعاب ۱	۲۳۵۰	۶۰۰۰	۰/۰۱۶	۱۴۰
انشعاب ۲	۲۸۰۰	۶۰۰۰	۰/۰۱۷	۱۴۰



ادامه جدول (۳): ضرایب افت اصطکاکی لوله‌های پستاک

شماره	قطر متوسط لوله mm	طول لوله mm	ضریب افت اصطکاکی	
			مودی	هیزن - یلیامز
تبدیل کننده ۱	۱۲۵۰	۲۰۰۰	۰/۰۱۶	۱۴۰
تبدیل کننده ۲ و ۳	۲۱۰۰	۶۰۰۰	۰/۰۱۶	۱۴۰
تبدیل کننده ۴	۲۸۰۰	۵۰۰۰	۰/۰۱۷	۱۴۰

نوع مقطع	مشخصات مقطع		قطر لوله Mm	ضریب افت موضعی
	شعاع خم mm	زاویه درجه		
خم‌ها	۲۰۰۰	۳۳	۱۳۰۰	۰/۰۰۳
	۲۰۰۰	۳۲	۱۳۰۰	۰/۰۰۳
	۲۴۸۶	۱۵	۱۳۰۰	۰/۰۰۲۸
	۶۶۹۰	۵	۲۲۰۰	۰/۰۰۲
	۷۰۶۸	۶۰	۲۲۰۰	۰/۰۰۹
	۵۰۰۰	۳۳	۳۴۰۰	۰/۰۰۳۵
تبدیل کننده	۱۰۲۰۰	۲۸	۳۴۰۰	۰/۰۰۷۴
	---	۱/۴۳	۱۲۵۰	۰/۰۲۸
	---	۱/۹۱	۲۱۰۰	۰/۰۳۶
	---	۱/۹۱	۲۱۰۰	۰/۰۳۶
افت محل اتصال لوله	---	۶/۸۴	۲۸۰۰	۰/۲۵
	افت در هر ۶ متر لوله		۱۳۰۰	۰/۰۰۱
			۲۲۰۰	۰/۰۰۱
		۳۴۰۰	۰/۰۸	

یا غیر خطی بودن، و تعداد متغیرهای طراحی بستگی دارد؛ که با استفاده از آنالیز حساسیت به دست می‌آید. بدین منظور تعداد ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ ذره انتخاب شده و الگوریتم در دو تکرار به تعداد ۵ و ۱۰ مرتبه اجرا گردیده است.

برای تعیین بهترین تعداد ذره و تعداد اجرای الگوریتم به منظور دستیابی به بهترین جواب، مقادیر بیشینه، کمینه، متوسط، انحراف استاندارد و پراکندگی نسبی برای توان جریان محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای محاسبه مقادیر فوق بر حسب روابط ریاضی موجود، کدنویسی در نرم افزار مطلب انجام شده و این کد به نرم افزار PSO لینک شده است. جدول (۴) نشان دهنده مقادیر حاصله می‌باشد.

افزایش تعداد ذرات در فضای جستجو، این امکان را به الگوریتم می‌دهد تا با سرعت و دقت بیشتری فضای پاسخ را بررسی و جستجو نماید. در این حالت به ازای هر ذره، تابع برازندگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و می‌توان نتیجه گرفت تعداد ذرات در رسیدن به بهترین پاسخ ممکن، بسیار موثر می‌باشد لیکن افزایش تعداد ذرات از یک مقدار معین نه تنها رسیدن به بهترین پاسخ را تسریع نمی‌کند بلکه موجب افزایش خطا در محاسبات می‌گردد. دلیل این موضوع را می‌توان به کاهش فاصله بین ذرات و افزایش احتمال برخورد آن‌ها به یکدیگر دانست. با توجه به نتایج بررسی‌ها، تعداد ۱۲۵ ذره به عنوان تعداد ذره بهینه انتخاب و وارد فضای پاسخ می‌شوند.

به لحاظ آماری و احتمالاتی اگر اختلاف بین میانگین پاسخ‌ها و بهترین پاسخ کم باشد احتمال رسیدن به پاسخ مطلوب‌تر بیشتر است. جهت تضمین دستیابی به بهترین پاسخ ممکن، لازم است برنامه چندین مرتبه اجرا گردد که تعداد ۵ و ۱۰ مرتبه مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که در جدول (۴) ملاحظه می‌شود با افزایش تکرارها، پراکندگی نسبی کاهش یافته است. به ازای ۱۲۵ ذره، در ۵ مرتبه پراکندگی نسبی ۰/۸۹ درصد می‌باشد که با افزایش تکرار اجرای برنامه به ۱۰ مرتبه، پراکندگی نسبی به ۰/۲۴ درصد کاهش یافته

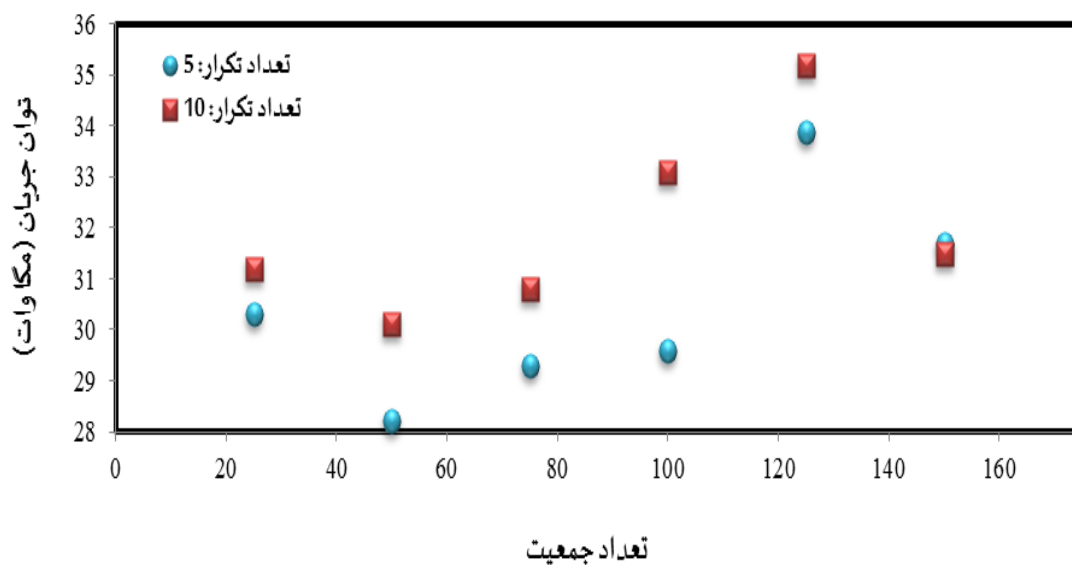
الگوریتم PSO دارای پارامترهای صریحی می‌باشد که تغییر در مقدار آن‌ها موجب جستجوی بیشتر در فضای ذرات و انتخاب پاسخ‌های مطلوب‌تر می‌شود. (Shi and Eberhart 1998) مطالعات کاملی در جهت بهینه‌یابی مقدار این پارامترها انجام دادند. مطابق نتایج این دو پژوهشگر، انتخاب مقادیر  $W_{max} = 0.9$ ،  $W_{min} = 0.4$  و  $C_1 = C_2 = 2$  برای پارامترهای ذرات بهترین پاسخ در فضای جستجو را نتیجه می‌دهد. برای تعیین تعداد جمعیت در فضای جستجو، رابطه خاصی وجود نداشته و تعداد آن به نوع مساله، به لحاظ خطی

استفاده قرار می‌گیرد. تغییرات بیشینه توان جریان با تعداد جمعیت در شکل (۲) نشان داده شده است.

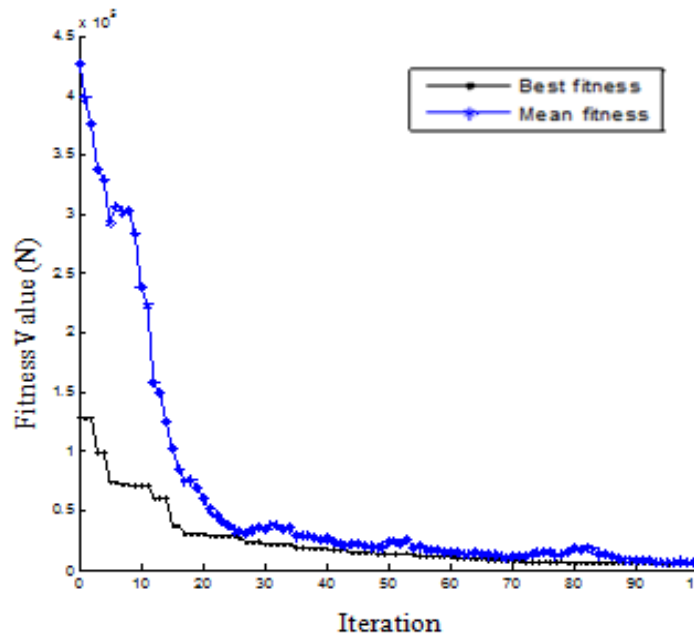
است. با ۱۰ مرتبه اجرای برنامه و کاهش پراکندگی نسبی، انحراف استاندارد نیز کاهش یافته و به ۶/۰۴ مگاوات رسیده است. لذا ۱۰ مرتبه اجرای برنامه مورد

جدول (۴): نتایج آنالیز حساسیت برای تعداد ذرات در فضای جستجو

تعداد اجرای الگوریتم	تعداد جمعیت	بیشینه توان جریان (MW)	متوسط توان جریان (MW)	کمینه توان جریان (MW)	انحراف استاندارد (MW)	پراکندگی نسبی (%)
۵ مرتبه	۲۵	۳۰/۳۴	۲۹/۸۳	۲۸/۱۲	۶/۱۳	۱/۷۲
	۱۰۰	۳۱/۵۸	۳۰/۶۶	۲۹/۰۹	۵/۹۱	۲/۱۱
	۵۰	۲۹/۰۹	۲۸/۷۴	۲۸/۴۵	۷/۲۴	۲/۷۱
	۱۲۵	۳۳/۶۴	۳۲/۱۱	۲۱/۶۳	۶/۸۲	۰/۸۹
	۱۵۰	۳۰/۸۷	۲۸/۷۴	۲۸/۴۴	۶/۰۹	۱/۴۸
۱۰ مرتبه	۲۵	۳۱/۰۳	۲۹/۶	۲۹/۳۴	۵/۸۶	۱/۵۷
	۵۰	۲۹/۹۵	۲۹/۷۴	۲۹/۵۲	۶/۷۲	۱/۲
	۱۰۰	۳۲/۸۱	۳۱/۲۵	۳۱/۱۸	۵/۴۵	۱/۶۸
	۱۲۵	۳۴/۹۶	۳۴/۲۹	۳۳/۶۴	۶/۰۴	۰/۲۴
	۱۵۰	۳۰/۷۷	۲۹/۱۵	۲۸/۶۷	۵/۶۶	۱/۳۲



شکل (۲): تغییرات بیشینه توان جریان با تعداد جمعیت در فضای جستجو به ازای ۵ و ۱۰ مرتبه تکرار



شکل (۳): نمودار همگرایی الگوریتم PSO برای سد شهریار به ازای ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم

برای تابع برازندگی انجام می‌شود که به نظر می‌رسد جهت تضمین درستی جواب‌های حاصله کافی باشد. در جدول (۵) نتایج حاصل از بهینه‌یابی برای تابع هدف ارائه شده است. با ثابت در نظر گرفتن دبی عبوری از پنستاک، قطر بهینه پنستاک به دست آمده و افت فشار و توان جریان بهینه محاسبه می‌گردد. مقادیر حاصله با مقادیر موجود مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

قبل از اعمال بهینه‌یابی، میزان افت انرژی در طول مسیر انتقال برابر ۲۹/۱۱ متر می‌باشد که پس از بهینه‌سازی و تغییر در ابعاد لوله‌ها این افت به ۱۱/۹۲ متر کاهش یافته است. میزان افت فشار در سیستم انتقال فشار قوی، ۳۱۵/۹ کیلوپاسکال بوده که با کاهش در حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال مقدار آن به ۱۱۶/۷ کیلوپاسکال رسیده است. در لوله‌های بسیار طویل که انتهای آن‌ها متصل به پمپ یا توربین می‌باشد، تغییرات فشار از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این حالت، هرگونه تغییر ناگهانی در مشخصات جریان (مانند سرعت) که ممکن است به دلیل از کار افتادن ناگهانی پمپ یا توربین باشد، منجر

قابل توجه است که با افزایش تعداد تکرارها به بیش از ۱۰ مرتبه، تنها زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد بدون اینکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقادیر انحراف استاندارد و پراکندگی نسبی مشاهده گردد. با انتخاب پارامترهای مناسب الگوریتم و اجرای ۱۰ مرتبه آن، میانگین پاسخ‌ها و بهترین پاسخ برای تابع هدف محاسبه می‌گردد.

در شکل (۳) نحوه همگرایی پاسخ‌ها به طور شماتیک نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد همگرایی در ۱۰۰ نسل به دست آمده است. در اوایل اجرای الگوریتم، به دلیل انتخاب تصادفی مقادیر اولیه برای متغیرهای طراحی، مقادیر بزرگی برای تابع برازندگی ایجاد می‌شود که در این حالت اختلاف میانگین پاسخ‌ها و بهترین پاسخ نیز بسیار زیاد است. با اجرای الگوریتم و محدود شدن فضای جستجو، اختلاف میان پاسخ‌ها کاهش یافته و تابع برازندگی به مقدار معینی همگرا می‌گردد. این همگرایی بعد از ۶۵ نسل حاصل شده است.

در نتیجه با ۱۰ مرتبه اجرای برنامه و ۱۰۰ نسل برای مورد مطالعاتی سد شهریار، حدود ۱۰۰۰ تحلیل

کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌باید. ایشان همچنین ثابت نمودند که با افزایش قطر، می‌توان فاصله بین سخت‌کننده‌های بیرونی پنستاک را افزایش داد که این امر خود موجب اقتصادی شدن طرح می‌گردد.

نکته قابل توجه طی بهینه‌یابی آن است که مقدار توان بهینه جریان، نباید با توان اولیه طراحی که مطابق استانداردهای طراحی تعیین شده است اختلاف زیادی داشته باشد. بنابراین می‌توان دریافت برای بهینه‌یابی پنستاک با تابع هدف خطی و قیود غیرخطی و پیچیده، به کارگیری روش بهینه‌سازی الگوریتم اجتماع ذرات منجر به حصول نتایج بسیار مطلوب و قابل قبولی شده است.

به ایجاد موج فشاری بسیار قوی می‌گردد که به نام جریان میرا شناخته می‌شود. در اغلب موارد جریان‌های میرا موجب ایجاد خسارات قابل توجهی در این لوله‌ها می‌گردند (حسن زاده و فاضلی پایدار، ۱۳۸۱). کاهش افت فشار در لوله‌های پنستاک می‌تواند موجب کاهش احتمال وقوع جریان‌های میرا در مسیر پنستاک گردیده و احتمال خرابی در آن‌ها را کاهش دهد.

همچنین با بهینه‌یابی قطر لوله‌ها، توان جریان بر خوردی به توربین‌ها از ۲۵ مگاوات به ۲۸ مگاوات افزایش یافته است این افزایش حدود ۱۱٪ می‌باشد. Dong et al. (2006) نیز نشان دادند که با افزایش قطر لوله‌های پنستاک، فشار خارجی وارده بر پنستاک

جدول (۵): مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف

کل	مسیر ۳ پنستاک		مسیر ۲ پنستاک		مسیر ۱ پنستاک		پارامتر متغیر					
	موجود	PSO	موجود	PSO	موجود	PSO						
---	---	۳/۵	۳/۴	۲/۳	۲/۲	۲/۲	۲	۱/۴	۱/۳	۱/۲۵	۱/۲	قطر لوله (m)
۱۱/۹۲	۲۹/۱۱	۳/۰۳	۱۰/۴۲۸	۱/۷۵	۵/۶۴۶	۰/۲۱	۴/۵۵۹	۲/۴۲	۱۱/۳۶۴	۰/۵۱	۲/۷۵۸	افت انرژی (m)
۱۱۶/۷	۳۱۵/۹	موجود	موجود	PSO	موجود	موجود	PSO	موجود	موجود	موجود	موجود	افت فشار (kPa)
		۲۹/۷	۱۰۲/۲	۲۸/۹	۱۰۰	۵۸/۱	۱۱۳/۷					
۲۸/۱۲	۲۵/۴	موجود	موجود	PSO	موجود	موجود	PSO	موجود	موجود	موجود	موجود	توان جریان (MW)
		۱۷/۳۲	۱۵/۸	۶/۷	۶/۱	۴/۱	۴/۱	۳/۵				

افزایش توان جریان: ۱۱ درصد

قیود بهینه‌سازی اعمال شدند. به دلیل پیچیدگی مساله و غیرخطی بودن قیود، استفاده از الگوریتم‌های مرسوم ریاضی دشوار است از این‌رو از روش هوشمند الگوریتم اجتماع ذرات استفاده گردید. در این راستا ابتدا پارامترهای موثر الگوریتم انتخاب و سپس تاثیر تعداد جمعیت ذرات در فضای جستجو مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج مشخص شد

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از مدل بهینه‌سازی مقید برای یافتن بیشینه توان جریان بر خوردی به توربین‌های نیروگاه برق‌آبی استفاده شد. در این راستا توان جریان به عنوان تابع هدف تعریف شده و کنترل تنش‌های داخلی و خارجی وارد بر لوله‌ها (قید سازه‌ای) و برقراری معادله انرژی (قید هیدرولیکی) به عنوان

میزان قابل قبولی افزایش دهد. این افزایش برابر ۱۱٪ می‌باشد. کاهش افت فشار نیز از مقدار ۳۱۶kpa به ۱۱۷kpa مشاهده گردید.

نکته مهم در روند بهینه‌سازی آن است که نتایج حاصله از بهینه‌سازی نباید با مقادیر موجود که از استانداردهای طراحی بدست آمده اختلاف زیادی داشته باشند.

به ازای تعداد معینی از ذرات، جواب بهینه مطلوبی حاصل می‌گردد و افزایش تعداد ذرات از این مقدار معین نه تنها موجب بهبود پاسخ‌ها نمی‌گردد بلکه زمان اجرای الگوریتم را افزایش می‌دهد. همچنین تعداد اجرای الگوریتم به عنوان یکی از پارامترهای موثر در یافتن بهترین پاسخ شناخته شد. اجرای ۵ و ۱۰ مرتبه تکرار نشان داد که با افزایش تکرارها اختلاف متوسط پاسخ‌ها و بهترین پاسخ به حداقل مقدار خود می‌رسد. با توجه به قابلیت جستجوی الگوریتم، این روش توانسته است توان جریان را به

## منابع

- آزادنیا، ا. و ب. زهرایی. ۱۳۸۹. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO در بهینه‌سازی چند هدف بهره‌برداری از مخازن. نهمین کنگره ملی عمران، سمنان، ایران، اردیبهشت ۸۹.
- بی‌نام. ۱۳۸۴. دفترچه محاسباتی سد شهریار. سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی.
- حاجی کاظمی، ح. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی عرضه و تقاضای آب شهری تبریز با تأکید بر قابلیت اعتماد با استفاده از الگوریتم توسعه یافته PSO. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندس آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
- حسن زاده، ی. و ر. فاضلی پایدار. ۱۳۸۱. کاربرد روش مشخصه در تحلیل پدیده ضربه قوچ ایستگاه پمپاژ سد نهند تبریز، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، دوره ۲۸، شماره ۳، صفحه ۶۰-۴۹.
- سروری، م.، ح. معراجی، ر. ولی پور و ص. معراجی. ۱۳۸۵. کاربرد الگوریتم PSO در طراحی بهینه حجم مخازن سدها، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، ایران.
- سلاجقه، ج.، م. خطیبی نیا و م. مشایخی. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی شکل گنبدهای فضاکار یک لایه با استفاده از الگوریتم باینری جامعه ذرات اصلاح شده (BPSO). چهارمین کنگره ملی عمران، تهران، ایران، اردیبهشت ۸۷.
- لطف‌اللهی، م.ع. و ن. کاردان. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی لوله انتقال آب فشار قوی سد بتنی شهریار با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها. نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۳، شماره ۱، ص ۶۹-۵۷.
- نورانی، و.، م.ع. کی نژاد و ن. کاردان. ۱۳۹۰. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پنستاک سدهای بتنی. نشریه عمران و محیط زیست، جلد ۴۰، شماره ۳، ص ۹۵-۸۵.
- Andaroodi, M. R. 2006. Standardization of civil engineering works of small high head hydropower plants and development of an optimization tool. Ph.D. Thesis, Issue 1661-1179.
- Anonymous. 1986. Welded steel penstocks. A Water Resource Technical Publication Engineering Monograph No.3, United State Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver.
- Baltar, A. M. and D. G. Fontane. 2008. Use of multi objective particle swarm optimization in water resources management. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 134(3): 120-128.
- Chen, D., W. Gaofeng and Ch. Zhenyi. 2008. The inertia weight self-adapting in PSO, IEEE-Proceedings of the 7th world congress on intelligent control and automation, 25-27 June, Chongqing, China, 5313-6.

Dong, W. S., C. H. Dang, Z. C. Deng and D. C. Liu. 2006. Stability analysis of penstock under external pressure based on GA-NN. Chinese Journal of Applied Mechanics, 23(2): 304-307.

Flotow, A. V. 2012. Micro hydro penstock design. Oregon State University, Independent Study and Research Fellow Transcript Notation.

Fresen, M. H. and Ch. Votesh. 1983. Economic diameter of steel penstock. Transactions ACSE, 103(3): 54-62.

Gill, M. K., Y. H. Kaheil, A.M. Khalil and L. McKeeBastidas. 2006. Multi objective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology. Journal of Water Resources Research, 42(W07417): 14 Pages.

Izquierdo, J., I. Montalvo, R. Pérez and V. S. Fuertes. 2008. Design optimization of wastewater collection networks by PSO. Journal of Computers & Mathematics with Applications, 56(3): 777-784.

Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. Particle swarm optimization. In Proc. of International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1942-1948.

Kennedy, J. and R. Eberhart. 2001. Swarm intelligence. Morgan Kaufman Publishers.

Montalvo, I., J. Izquierdo, R. Pérez and M. M. Tung. 2008. Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems. Journal of Computers & Mathematics with Applications, 56(3): 769-776.

Purwati, E. and H. I. Wahyun. 2010. Optimization on penstock dimension of Ample Gading hydro electrical power, Indonesia. International Journal of Academic Research, 2(6): 308-312.

Shi, Y. and R.Eberhart. 1998a. Parameter selection in particle swarm optimization. In Proc. of the 1998 Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego, 591-600.

Souren, B. and R. Hadjian, 1980. Optimization and design of underground embedded penstocks. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Canada.

Yeniay, O. 2005. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithm. Journal of Mathematical and Computational Applications, 10 (1): 45-56.

## Increasing the Flow Power in High Pressure Transient Pipes of Hydroelectric Power Plants Using Particle Swarm Optimization Algorithm

Nazila Kardan<sup>1</sup>

### Abstract

Employment of hydroelectric power plants is considered as one of the strategies to overcome the water shortages in the world. On the other hand, increasing the generated electricity by using of water energy is of importance. Regarding to the high cost of construction of dam and supplying the required hydraulic head of hydro power stations, the optimum design of these stations has been considered. Penstock, among the components of these stations, has a special place. The importance of penstock is due to its high manufacturing, installation and maintenance costs which assign nearly thirty percent of the plant's expenditures to itself. Therefore, optimal design of this hydraulic structure will play a significant role in lowering the construction costs of hydro power stations. The use of meta-heuristic optimization algorithms for optimization of different structures has been one of the most important issues in designing of these structures. Among the meta-heuristic algorithms Particle Swarm Optimization has been considered as a powerful method in many fields. The purpose of this research is to present an optima sketch to maximize the power of jet streams reaching the turbines and also reduction the pressure losses through penstocks for controlling the transient flows. The results show that the energy losses have totally been decreased from 29.11meters to 11.92meters. This reduction lead to increasing the efficiency and performance of high pressure pipes. The pressure losses due to sudden changes in flow condition (before optimization) are 315.9kpa which by optimization of the penstocks decreased to 116.7kpa. This reveals that by reduction in pressure losses, the damages caused by transient flows are greatly decreased. Also, the power of flow increased from 25MW to 28MW, which equals 11%.

**Keywords:** Flow Power, Particle Swarm Optimization, Penstock, Power Station, Optimization.

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Tel: 09144186579, Email: [n.kardan@azaruniv.edu](mailto:n.kardan@azaruniv.edu)