

بهینه سازی لوله انتقال آب فشار قوی سد بتنی شهریار با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها

محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{1*} و نازیلا کاردان²

تاریخ دریافت: 89/10/18 تاریخ پذیرش: 90/09/12

¹ - دانشیار گروه عمران آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

² - دانشجوی دکتری سازه هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: E-mail: a_lotfollahi@yahoo.com

چکیده

امروزه نیروگاه‌های برق آبی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی برق بشمار می‌روند. در میان اجزای تشکیل دهنده تاسیسات برق آبی، پنستاک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. پنستاک لوله‌ای است فشار قوی که جریان آب را از مخزن سد یا از هر بار آبی بالا به سمت توربین‌های نیروگاه هدایت می‌کند. اهمیت پنستاک بدلیل هزینه‌ی بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می‌باشد به طوری که درصد قابل توجهی از هزینه‌های ساخت نیروگاه به این سازه هیدرولیکی اختصاص می‌یابد. لذا طراحی بهینه آن می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه احداث نیروگاه‌های برق آبی داشته باشد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کاوشی برای طراحی بهینه سازه‌های مختلف مهم‌ترین موضوع تحقیق بوده است. از بین الگوریتم‌های کاوشی، روش بهینه‌سازی اجتماع مورچه‌ها به عنوان یک ابزار قوی و مناسب در بسیاری از زمینه‌ها مورد توجه بوده است. در این تحقیق ابعاد لوله‌های پنستاک با استفاده از روش اجتماع مورچه‌ها بهینه‌یابی شده است. بدین منظور الگوریتم سیستم مورچگان (ACS) اجتماع مورچه‌ها انتخاب شده و پنستاک سد شهریار واقع در میانه به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که الگوریتم ACS از قابلیت بالایی در بهینه‌سازی برخوردار بوده و توانسته است وزن پنستاک را به میزان قابل قبولی کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جامعه مورچه‌ها، بهینه‌سازی، پنستاک، نیروگاه برق آبی.

Application of Ant Colony Algorithm to Optimize the High Pressure Water Conveyance Pipe of Shahryar Concrete Dam

MA Lotfollahi Yaghin and N Kardan

Received: 8 January 2011 Accepted: 3 December 2011

¹-Assoc. Prof. Dept. of Water Engin., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz. Iran.

²-PhD Student of Hydraulic Structure, Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz. Iran.

*Corresponding Author Email: a_lotfollahi@yahoo.com

Abstract

Today the hydro-electric power plants are important sources of energy production. Among the elements of the hydro-electric power plants, penstock is a high pressure pipe and high important that conveys water from dam reservoir or any high head water to power plant turbines. The important of penstock is due to its expensive design and maintenance; so a considerable percent of the construction cost of power plants is allocated to penstocks structure. So optimization of penstock has a great effect on a hydro-electric project cost reduction. Using Heuristic methods to optimum design of different structures has been an important object being studied in recent years. Among Heuristic algorithms, Ant Colony Optimization method is a powerful optimization tool which has been considered by researchers in many fields. In this study, the dimensions of penstock were optimized using Ant Colony method. For this purpose on the basis of the selected Ant Colony Algorithm, Shahryar dam (in Miyaneh) was investigated. The results indicated that ACS algorithm has high capability in optimization and can considerably reduce the weight of penstock.

Keywords: Ant Colony algorithm, Hydro-electric power plants, Optimization, Penstock.

مقدمه

هزینه ساخت را بطور چشمگیری کاهش دهد (سارکاریا 1979).

اصول و روش طراحی پنستاک‌های فولادی و بتنی نخستین بار توسط سورن و هادجیان (1980) ارائه گردید که در این روش پس از طراحی اولیه مقادیر بدست آمده از طریق سعی و خطا بهینه شدند. 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 برای واحد طول پنستاک، هزینه ساخت و اجرای آن بهینه گردید. همچنین اداره عمران اراضی آمریکا (بی نام 1986) طی تحقیقی به

هر نیروگاه برق آبی از قسمت‌های مختلفی مانند سد (بتنی یا خاکی)، سازه آبگیر، لوله‌های فشارقوی انتقال آب پنستاک، مخازن موج گیر، توربین و تجهیزات تولید برق تشکیل یافته است که در این میان پنستاک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. پنستاک لوله‌ای است فشار قوی که جریان آب را از مخزن سد و یا از هر بار آبی بالا به توربین‌های نیروگاه هدایت می‌کند. اهمیت پنستاک به علت هزینه‌ی بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می‌باشد طوری که حدود 30% هزینه ساخت نیروگاه‌های برق آبی به پنستاک اختصاص می‌یابد که طراحی بهینه آن می‌تواند

حوضه هاسپلس بیک³ در هلند پرداخته و مطالعه موردی دوم بررسی جریان در خاک حوضه بزرگی بوده که با گیاهان جنگلی پوشیده شده است. انتخاب مطالعه موردی دوم به دلیل بررسی تاثیر وجود CO_2 و نیتروژن در خاک بوده است. همچنین در این مطالعه موردی، الگوریتم LM نیز جهت تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته و ثابت گردیده که نتایج بدست آمده از دو الگوریتم مشابه می‌باشند. زچین و همکاران (2006) نیز شبکه‌های توزیع آب را با استفاده از دو الگوریتم مختلف اجتماع مورچه‌ها بهینه یابی نمودند. هدف این تحقیق بررسی کارایی و عملکرد دو الگوریتم AS⁴ و MMAS¹ اجتماع مورچه‌ها بوده است. در نتیجه دو مطالعه موردی شبکه توزیع آب شهر نیویورک و شهر هانوی انتخاب گردیده و جهت مقایسه نتایج، تابع هدف و قیود برای هر دو مدل یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای هر دو مدل، الگوریتم MMAS عملکرد بهتری نسبت به AS دارد. نورانی و همکاران (1387) به بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی پرداختند. در این تحقیق حجم بتن ریزی بدنه سد بتنی وزنی به عنوان تابع هدف و پایداری در برابر واژگونی و لغزش و نیز کنترل تنش‌های فشاری و کششی به عنوان قیود بهینه‌سازی تعریف شده‌اند. سد بتنی کوینا⁵ در هندوستان، سد ساریار⁶ در کشور ترکیه، سد فرانت⁷ در ایالت کالیفرنیا آمریکا و سد زاوین کلات در کشور ایران به عنوان مطالعه موردی بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق عملکرد مطلوب الگوریتم اجتماع مورچه‌ها را نشان می‌دهد. مرتضوی نائینی و همکاران (1384) بهینه‌سازی برخی پارامترهای سدهای بتنی وزنی روی پی‌های سنگی را در دستور کار خود قرار دادند. در این تحقیق، حجم بتن ریزی بدنه سد به

ارائه اصول طراحی پنستاک‌های فولادی پرداخته است. اندرودی (2006) با استفاده از برنامه POPEHYE¹ به بهینه‌سازی اجزای نیروگاه‌های برق‌آبی از جمله پنستاک پرداخته و نتایج حاصله را به صورت نمودارهایی ارائه کرد. در پژوهشی دیگر فرزن و واتش (1983) به بهینه 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. کاردان و کماسی (1389) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ابعاد لوله‌های فشار قوی نیروگاه برق‌آبی سد شهریار پرداختند.

با گسترش الگوریتم‌های فراکوشی، الگوریتم اجتماع مورچه‌ها به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های هوش مصنوعی در زمینه‌های مختلفی از جمله بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مایر و همکاران (2003) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف ACO به بهینه سازی سیستم‌های توزیع آب پرداختند. در این تحقیق جهت بررسی نتایج حاصله، یک شبکه توزیع آب با 14 لوله و نیز شبکه توزیع آب شهر نیویورک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مایر و همکاران نتایج دو الگوریتم اجتماع مورچه‌ها و ژنتیک را مقایسه نموده و ثابت نمودند الگوریتم ACO در مسائل پیچیده از عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک (GA^2) برخوردار می‌باشد. عباسپور و همکاران (2001) از روش اجتماع مورچه‌ها برای بدست آوردن پارامترهای بهینه خاک‌های اشباع استفاده نمودند. در این مطالعه جهت تحقیق درستی نتایج حاصله از الگوریتم ACO، دو مطالعه موردی انتخاب شده است. مطالعه موردی اول به بررسی جریان یک بعدی آب در یک خاک دولایه در

³ Huspelse Beek

⁴ Ant System

⁵ Max-Min Ant System

⁶ Koyna

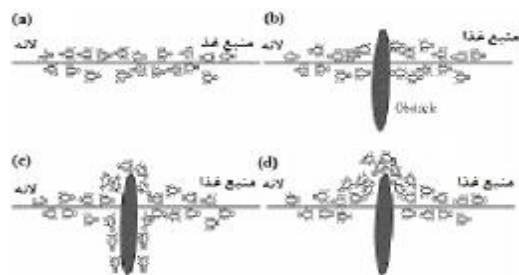
⁷ Sariyar

⁸ Friant

¹ Pre-dimensioning and Economical Optimization of Small Hydropower Plants

² Genetic Algorithm

مکانیزم رفتاری مورچه‌های واقعی به حالت مورچه‌های مصنوعی و به حالت الگوریتمی، اعمال برخی اصلاحات در رفتار مورچه‌های واقعی مورد نیاز است که این اصلاحات اولین بار توسط دوریگو (1992) معرفی گردید. این الگوریتم بر مبنای رفتار طبیعی مورچه‌ها در یافتن کوتاهترین مسیر بین لانه و منبع غذایی، طرح‌ریزی شده است. بدین صورت که مورچه‌های غذاییاب برای یافتن منبع غذایی محدود و وسیعی را جستجو می‌نمایند. این مورچه‌ها در طول مسیر حرکت خود ماده‌ای به نام فرومون³ بر جای می‌گذارند که به عنوان ابزاری جهت برقراری ارتباط بین مورچه‌ها بشمار می‌رود. سایر مورچه‌ها با حس اثر فرومونی⁴ مسیرهای مربوط به غذا که توسط سایر مورچه‌ها شناسایی شده است را کشف می‌کنند. با افزایش تعداد مورچه‌ها در مسیر شناسایی شده، فرومون کوتاه‌ترین مسیر بیش از پیش تقویت شده و احتمال انتخاب آن مسیر توسط سایر مورچه‌ها افزایش می‌یابد (شکل 1).



شکل 1- حرکت مورچه‌ها در مسیر بین لانه و منبع غذایی (a) حرکت برای یافتن منبع غذایی (b) برخورد مورچه‌ها به مانع در مسیر حرکت (c) طی هر دو مسیر توسط مورچه‌ها (d) انتخاب کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذایی

ویژگی گروهی جایگذاری و تعقیب اثر فرومونی و نیز تحریک شدن یک مورچه توسط اثر فرومونی سایر مورچه‌ها، الهام بخش ACO بوده است (گیلمور و درس، 2005).

عنوان تابع هدف و ارضای شرایط پایداری شامل پایداری در برابر لغزش، واژگونی و تنش‌های قائم در بدنه سد به عنوان قیود مساله در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب با بهینه شدن شیب بالادست و طول قاعده سد، همزمان هم شرایط پایداری سد محقق گردیده و هم حجم بتن‌ریزی به لحاظ اقتصادی بهینه می‌گردد. در این راستا نتایج حاصله از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها با نتایج حاصله از روش‌های کلاسیک مقایسه شده و ثابت گردیده است الگوریتم ACO نسبت به روش‌های کلاسیک از توانایی بیشتری برخوردار است. جلالی و همکاران (2006) با بهره‌گیری از الگوریتم اجتماع مورچه‌ها به بهینه‌یابی بهره‌برداری از مخازن سدها پرداختند. در این مقاله مربع اختلاف آب آزاد شده از مخزن سد و آب مورد نیاز پایین دست به عنوان تابع هدف تعریف شده است. همچنین بهره‌برداری آب از مخزن سد دز در جنوب کشور به مطالعه موردی انتخاب گردیده است. در این مطالعه، جلالی و همکاران (2006) سه الگوریتم مختلف AS، ACS_{ib}^1 و ACS_{gb}^2 را مقایسه نموده و نشان دادند الگوریتم ACS_{gb} نسبت به دو الگوریتم دیگر دارای عملکرد بهتری است.

براساس مطالعه پیشینه پژوهش پیداست در زمینه بهینه‌سازی پنستاک با استفاده از روش‌های فراکاوشی از جمله روش الگوریتم اجتماع مورچه‌ها تحقیقی انجام نشده است. از اینرو هدف از این تحقیق استفاده از روش الگوریتم اجتماع مورچه‌ها برای بهینه‌سازی پنستاک به عنوان یک سازه هیدرولیکی بسیار ارزشمند می‌باشد.

مواد و روش‌ها

کلیات

مورچه‌ها از قابلیت‌های خارق العاده‌ای برخوردارند که بعنوان مثال می‌توان به توانایی آن‌ها در ساخت پل، حمل گروهی اجسام و غذاییابی اشاره نمود. برای انتقال

³ Pheromone

⁴ Pheromone Trail

¹ Ant Colony System Iteration Best

² Ant Colony System Global Best

الگوریتم اجتماع مورچه‌ها

ACO مدلی برای ساخت الگوریتم‌های فراکاوشی بمنظور حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. اولین الگوریتمی که در این زمینه ابداع گردیده و بعنوان استخوان‌بندی سایر الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفت، الگوریتم AS می‌باشد که این الگوریتم نیز خود به سه الگوریتم تعداد مورچه‌ها¹، تجمع مورچه‌ها² و چرخه مورچه‌ها³ تقسیم می‌گردد. پس از معرفی الگوریتم AS، الگوریتم‌های دیگر ACO برای کاربردی کردن و رفع معایب این الگوریتم گسترش یافتند که بعنوان نمونه می‌توان به الگوریتم‌های ACS و MMAS اشاره نمود. با توجه به ضعف‌های الگوریتم AS مانند پدیده همگرایی نابهنگام (استازل و هوس 1997)، الگوریتم‌های ACS و MMAS بیشتر مورد توجه قرار گرفتند که در تحقیق حاضر الگوریتم ACS جهت بهینه‌سازی ابعاد لوله‌های پنستاک مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به مراحل اصلی این الگوریتم اشاره گردیده است.

پارامترهایی که در طراحی پنستاک مورد استفاده قرار می‌گیرند در دو گروه پارامترهای ثابت و متغیر قرار می‌گیرند. پارامترهای ثابت تا پایان بهینه‌سازی بدون تغییر باقی می‌مانند و پارامترهای متغیر که مقدار آن‌ها برای هر مورچه و در هر گام از ACO متفاوت بوده و طی بهینه‌سازی تغییر می‌یابند. با توجه به استانداردهای طراحی، برای هر پارامتر متغیر محدوده بالا و پایینی در نظر گرفته شده و هر متغیر در بازه خود گسسته می‌شود که برای این کار، بایستی گام گسسته‌سازی مشخص باشد. سپس تعدادی مورچه وارد فضای گسسته شده می‌شوند تا مورچه‌ها برای پارامترهای متغیر مقداری تصادفی بر اساس قانون گذر انتخاب کنند. قانون گذر در ACS بمنظور موازنه بیشتر جستجوی جواب - استخراج جواب بکار گرفته می‌شود و در گره i

برای انتخاب گره بعدی که j می‌باشد از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$j \in \begin{cases} \arg \max_{u \in N_i^k} \{t_{ij}^a(t) h_{ij}^b(t)\} & \text{if } r \leq r_0 \\ J & \text{if } r > r_0 \end{cases} \quad [1]$$

در رابطه (1)، $ra u(0,1)$ و $r_0 = [0,1]$ ضریبی است که به نوع مساله بستگی دارد که r_0 به منظور موازنه جستجو و استخراج جواب بکار می‌رود. اگر $r \leq r_0$ ، الگوریتم با در نظر گرفتن بهترین جواب، به استخراج جواب در همسایگی آن پرداخته و از سوی دیگر اگر $r > r_0$ باشد الگوریتم به جستجوی مناطق جدید از فضای جستجو می‌پردازد. پس با انتخاب مقادیر کوچکتر برای r_0 ، جستجوی جواب به استخراج جواب اولویت داده می‌شود. $u(0,1)$ توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف از معیار یک می‌باشد، N_i^k همسایگی مجاز مورچه k هنگامی که مورچه مزبور در گره i واقع شده باشد این همسایگی شامل تمام گره‌هایی است که به صورت مستقیم به گره i وصل شده‌اند (شکل 2) و J گرهی می‌باشد که با توجه به تابع گذر زیر انتخاب می‌شود (دوریگو و گامبردل 1997):

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[t_{ij}(t)]^a [h_{ij}]^b}{\sum_{j=1}^J [t_{ij}(t)]^a [h_{ij}]^b} & \text{if } j \in N_i^k \\ 0 & \text{if } j \notin N_i^k \end{cases} \quad [2]$$

در رابطه (2) $P_{ij}^k(t)$ تابع احتمال برای انتخاب گره j می‌باشد، $t_{ij}(t)$ اثر فرومونی است که هر مسیر با ابتدا و انتهای بترتیب i و j دریافت می‌کند و h_{ij} اطلاعات کاوشی مسیر می‌باشد. در گام اول برای t_{ij} و h_{ij} مقادیری بعنوان پیش فرض در نظر گرفته می‌شود که مقدار تابع کاوشی تا پایان ثابت می‌ماند اما مقدار فرمون در هر گام و برای هر مسیر تغییر می‌کند.

¹ Ant-quantity

² Ant-density

³ Ant-cycle

$$\Delta t_{ij}(t) = \frac{1}{L^+} \quad [4]$$

که L^+ کوتاهترین مسیر طی شده توسط بهترین مورچه می‌باشد. در کنار قانون بروز رسانی کلی، بروز رسانی محلی نیز بصورت زیر انجام می‌شود:

$$t_{ij}(t+n) = (1-r_2)t_{ij}(t) + r_2 t_0 \quad [5]$$

که $r_2 \in (0,1]$ ثابت تبخیر فرومون و t_0 ضریبی با مقدار کوچک و مثبت می‌باشد. مقدار t_0 با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

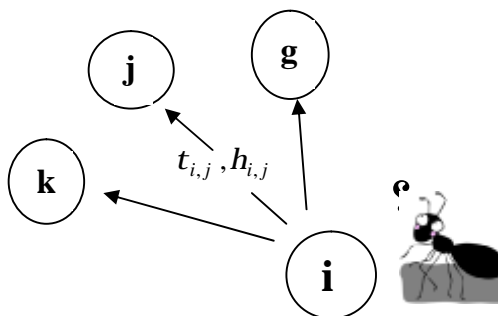
$$t_0 = g \times \max t_{ij} \quad [6]$$

در رابطه (6)، g ضریبی بین صفر و یک بوده و $\max t_{ij}$ حداکثر فرومون موجود در مسیر بین گره i و سایر گره‌هایی است که ممکن است توسط مورچه انتخاب گردد. قانون بروز رسانی محلی برای کاهش اثر فرومون برجای مانده در مسیر است تا احتمال عبور مورچه‌های بعدی از مسیر مذکور کاهش یافته و از همگرایی زودرس جلوگیری نماید (دوریگو و همکاران 1999).

تابع هدف

در مساله بهینه‌سازی پنبستاک، کمینه کردن وزن پنبستاک به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. با تعریف تابع وزن پنبستاک به عنوان تابع هدف علاوه بر اینکه وزن خود پنبستاک بهینه شده و مصالح مصرفی کاهش می‌یابد، حجم خاکبرداری برای احداث تونل پنبستاک نیز کاهش پیدا می‌کند. بدیهی است کاهش ابعاد تونل پنبستاک موجب کمینه شدن حجم بتن‌ریزی تونل نیز می‌گردد. کمینه شدن حجم خاکبرداری و بتن‌ریزی عمدتاً در پنبستاک‌های مدفون مطرح بوده و در پنبستاک‌های روکار هدف از بهینه‌سازی تنها کاهش وزن خود پنبستاک می‌باشد. پنبستاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق از نوع مدفون انتخاب شده‌اند تا بررسی همزمان کاهش وزن لوله و حجم عملیات خاکی و بتن‌ریزی امکان پذیر باشد

با انتخاب یک مقدار تصادفی برای پارامترهای متغیر که بر اساس قانون گذر انجام می‌گیرد، مقدار تابع هدف برای تمامی مورچه‌ها محاسبه می‌گردد و سپس مجاز یا غیرمجاز بودن پاسخ‌های ایجاد شده بررسی می‌گردد.



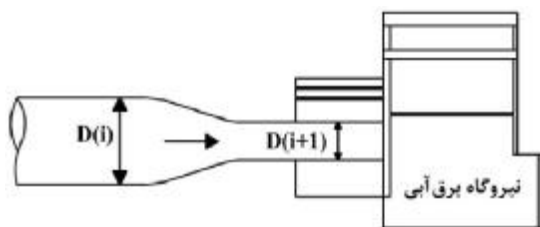
شکل 2- مورچه در نقطه i برای انتخاب نقطه بعدی j, g, k از $t_{i,j}, h_{i,j}$ استفاده می‌کند.

اگر پاسخ‌های بدست آمده مجاز باشند (تمامی قیدها ارضا شوند) تابع هدف همان مقدار محاسبه شده است و در غیراین صورت تابع هدف، جریمه دریافت می‌کند. در گام بعدی برای هر مسیر طی شده توسط مورچه فرومون جدیدی اختصاص می‌یابد که اصطلاحاً بروز رسانی فرومون نامیده می‌شود. بروز رسانی فرومون بسته به نوع الگوریتم مورچه متفاوت است که الگوریتم ACS شامل بروز رسانی کلی و محلی می‌باشد. در این الگوریتم تنها مورچه‌ای که دارای بهترین جواب است عمل بروز رسانی کلی فرومون را انجام می‌دهد. بهترین مورچه می‌تواند بهترین هر تکرار یا بهترین در کل (دوریگو و همکاران 1999) باشد:

$$t_{ij}(t+n) = (1-r_1)t_{ij}(t) + r_1 \Delta t_{ij}(t) \quad [3]$$

$r_1 \in (0,1]$ ثابت تبخیر فرومون و $(1-r_1)$ تبخیر فرومونی را نشان می‌دهد. تبخیر فرومونی از همگرایی زودرس الگوریتم جلوگیری می‌کند. $\Delta t_{ij}(t)$ نیز برای بهترین مورچه به صورت زیر بدست می‌آید (دوریگو و همکاران 1999):

متوسط پنستاک در این مقاطع طبق رابطه (9) بدست می آید (شکل 4):



شکل 4- کاهش قطر پنستاک در مجاورت توربین های نیروگاه

$$D_{ave} = \frac{D(i) + D(i+1)}{2} \quad [9]$$

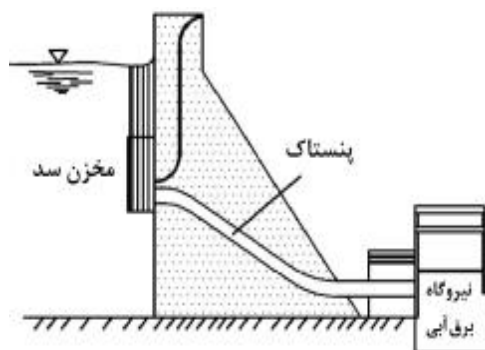
قیود

در بهینه سازی پنستاک بایستی لوله هم از لحاظ هیدرولیکی و هم از لحاظ سازه ای مورد بررسی قرار گیرد. لذا قیود مساله در دو گروه قیدهای هیدرولیکی و قیدهای سازه ای قرار می گیرند. ارضای معادله برنولی بین سازه آبرگیر و توربین های نیروگاه به عنوان قید هیدرولیکی و کنترل تنش های ناشی از فشار داخلی جریان و نیز فشار خارجی ناشی از عوامل مختلف، به عنوان قیدهای سازه ای منظور می گردند. در پنستاک های مدفون فشار خارجی ممکن است ناشی از تغییرات حجمی بتن تحت تاثیر دمای اطراف باشد. همچنین فشار آب حفره ای ناشی از ترک خوردگی سنگ ها نیز ممکن است یکی از عوامل ایجاد کننده فشار خارجی بر روی این نوع از پنستاک ها باشد. گرچه سنگ های اطراف پنستاک را می توان با دوغاب تحکیم کرد اما ممکن است برخی ترک های مویی که پر کردن و تحکیم آن ها مشکل است باقی بمانند. در نتیجه آبی که با فشار بالا در پنستاک جریان می یابد اگر به میان سنگ ها نشت کند موجب ایجاد ترک های کششی در سنگ های اطراف پنستاک می گردد.

(شکل 3). در مساله بهینه سازی تابع هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$c = \text{Min}(W\{x\}) \quad [7]$$

که c تابع هدف، $W\{x\}$ وزن پنستاک و $\{x\}$ بردار متغیرها می باشد.



شکل 3- نمایی از پنستاک مدفون در بدنه سد بتنی

متغیرهای طراحی که می توان در بهینه سازی منظور کرد عبارتند از قطر داخلی، قطر بیرونی، شعاع خم، زاویه خم، ضخامت جدار پنستاک، محل قرارگیری سازه آبرگیر نسبت به تراز سطح آزاد آب و ابعاد سازه آبرگیر. بررسی بیشتر مساله و انجام تحلیل حساسیت نشان می دهد که دو پارامتر قطر بیرونی و قطر داخلی بیشترین تاثیر را در کاهش وزن پنستاک خواهند داشت. لذا قطر بیرونی و قطر داخلی پنستاک به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می شوند. مطابق شکل 3 تابع وزن پنستاک را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Minimize } W(\{x\}) = \sum_{i=1}^n g_i \cdot L_i \cdot A_i = \sum_{i=1}^n g_i \cdot L_i \cdot \frac{D}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad [8]$$

در رابطه (8) $W(\{x\})$ وزن پنستاک، n تعداد پنستاک های معلوم، g_i وزن مخصوص مصالحی که پنستاک از آن ساخته شده است، L_i طول پنستاک مقطع i و A_i مساحت پنستاک مقطع i می باشد. مساحت A_i نیز با در نظر گرفتن $D_{out(i)}$ به عنوان قطر بیرونی و $D_{in(i)}$ به عنوان قطر درونی مقطع i قابل محاسبه است. با توجه به تغییرات تنگ شدگی مقطع در برخی از قسمت های مسیر، قطر

i ، ضریب افت جریان برای انقباض تدریجی پنستاک، K_{exit} 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 ، I_i ، A_i به ترتیب مساحت، ضریب اصطکاک، طول و قطر پنستاک در مقطع i می‌باشند.

با تعریف تابع هدف و قیود و ترکیب آن‌ها تابع برازندگی¹ نتیجه می‌شود. در الگوریتم‌های فراکاوشی روش‌های مختلفی جهت اعمال قیود به تابع هدف وجود دارد که روش رایج در الگوریتم اجتماع مورچه‌ها، استفاده از تابع جریمه می‌باشد که در مقاله حاضر روش فوق مورد استفاده قرار گرفته است (دوریگو و استاتزل 2003). تابع برازندگی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$W_{Fitness} = W \left[\left(PS_{r(i)} + PP_{r(i)} + 1 \right)^e \right] + e_1 |W_{Penalty}|^2 \quad [12]$$

در رابطه (12) $W_{Fitness}$ تابع برازندگی، W تابع هدف، $PS_{r(i)}$ ضریب جریمه تنش داخلی، $PP_{r(i)}$ ضریب جریمه فشار خارجی و $W_{Penalty}$ تابع جریمه معادله برنولی می‌باشد. e_1 ضریب جریمه بوده و یک عدد مثبت بزرگ می‌باشد که مقدار آن بین دو تا ده تغییر می‌کند.

e توان تابع جریمه و عددی بین صفر و یک است که با توجه به مساله و با اجرای برنامه به ازای e های مختلف، مقدار مناسب آن انتخاب می‌گردد. $PS_{r(i)}$ ، $PP_{r(i)}$ و $W_{Penalty}$ طبق رابطه (13) تعریف می‌شوند:

$$PS_{r(i)} = (s_{r(i)} - s_{all}) / s_{all} \quad [13]$$

$$PP_{r(i)} = (P_{r(i)} - P_{all}) / P_{all}$$

$$W_{Penalty} = |g(x)| - e_2 \geq 0$$

در رابطه (13)، $g(x)$ قید هیدرولیکی مساله (معادله برنولی) و e_2 خطای قابل قبول برای افت انرژی در طول مسیر می‌باشد.

ترک‌های کششی ایجاد شده پایداری سنگ‌های اطراف پنستاک را به خطر انداخته و موجب اعمال فشار خارجی بر پنستاک می‌گردند (نورانی و همکاران 1390). بنابراین از لحاظ قیود اعمالی، پنستاک از دو جنبه هیدرولیکی و سازه‌ای مورد تحلیل قرار می‌گیرد:

$$\frac{P_{in}}{g_{water}} + \frac{v_{in}^2}{2g} + h_{in} - \Delta H_{in-out} = \frac{P_{out}}{g_{water}} + h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2g}$$

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

$$P_{r(i)} < P_{all} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad [10]$$

که $s_{r(i)}$ تنش شعاعی ناشی از فشار داخلی و $P_{r(i)}$ فشار خارجی وارد بر پنستاک در مقطع i می‌باشد. s_{all} مقدار مجاز تنش داخلی بوده و P_{all} بصورت مقدار مجاز تنش برای فشار خارجی تعریف می‌شود. P_{in} و P_{out} بترتیب فشار جریان در مقطع ورودی و خروجی، v_{in} و v_{out} بترتیب سرعت جریان در مقطع ورودی و خروجی، h_{in} و h_{out} بترتیب ارتفاع مقطع ورودی و نیز محل قرارگیری توربین نسبت به تراز پایه و ΔH_{in-out} ، میزان تلفات انرژی جریان از ابتدا تا انتهای مسیر پنستاک می‌باشد. عبارت ΔH_{in-out} افت‌های اصطکاکی و موضعی را شامل شده و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta H_{in-out} = \sum_{i=1}^n K_{entrance} \frac{v_{out}^2}{2g} + \sum_{i=1}^n K_{bend}(i) \left(\frac{A_{out}}{A_i} \right)^2 \frac{v_{out}^2}{2g} \quad [11]$$

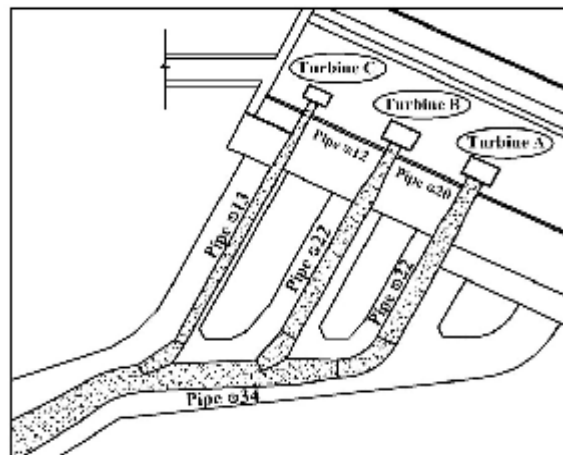
$$+ \frac{I_i L_i}{D_i} \left(\frac{A_{out}}{A_i} \right)^2 \frac{v_{out}^2}{2g} + K_{cont} \left(\frac{A_{out}}{A_i} \right)^2 \frac{v_{out}^2}{2g} + K_{exit} \frac{v_{out}^2}{2g}$$

در رابطه (11) عبارت اول افت موضعی در ورودی پنستاک، عبارت دوم افت موضعی در زانویی‌ها، عبارت سوم افت اصطکاکی در طول پنستاک، عبارت چهارم افت موضعی در محل انقباض تدریجی و عبارت پنجم افت موضعی انرژی در خروجی پنستاک می‌باشد. همچنین $K_{entrance}$ ضریب افت جریان در ورودی جریان به سازه آبیگر، $K_{bend}(i)$ ضریب افت جریان در زانویی

¹ Fitness Function

مطالعه موردی

به منظور ارزیابی کارایی مدل ارائه شده در مساله بهینه سازی، پنستاک سد شهریار به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. سد شهریار، سد بتنی دو قوسی می باشد که در 36 کیلومتری شمال شرقی شهرستان میانه واقع گردیده است. ارتفاع این سد 135 متر و طول و عرض آن به ترتیب 207 و 5 متر می باشد. استاندارد طراحی مورد استفاده در طراحی پنستاک این سد، استاندارد CECT می باشد. بار آبی طراحی آن 67/1 متر است و افزایش بار آبی با اعمال تاثیر ضربه قوچ 30% بوده که برابر 87/23 متر محاسبه شده است. همچنین جهت محاسبه وزن پنستاک شتاب ثقل زمین مساوی $9/708 m/s^2$ و جرم مخصوص فولاد مساوی $7/85 \times 10^6 kg/m^3$ منظور شده است (بی نام 1384). شکل (5) انشعاب پنستاکها در محل توربین های نیروگاه را نشان می دهد.



شکل 5- انشعاب پنستاک سد شهریار (نورانی و همکاران

(1390)

نتایج و بحث

در الگوریتم بهینه سازی اجتماع مورچه ها تعداد پارامترهای طراحی بسیار زیاد می باشد که به عنوان مثال می توان تعداد مورچه ها، ضرایب بروزرسانی محلی و کلی، ضرایب وزنی فرومون و همچنین مقادیر اولیه

فرومون را نام برد. روش اجتماع مورچه ها به این پارامترها بسیار حساس بوده و با تغییر آن ها روند بهینه سازی نیز تغییر می یابد. لذا جهت اجرای صحیح الگوریتم ACS، لازم است مقدار مناسب این پارامترها تعیین گردد. با چند مرحله اجرای الگوریتم و مقایسه نتایج، مقدار بهینه این پارامترها مطابق جدول 1 بدست آمده است. ضرایب F_1 و F_2 در رفتار جستجوگرانه مورچه ها تاثیر می گذارد. با در نظر گرفتن مقادیر کوچک برای این ضرایب، مقدار فرومون ذخیره شده در مسیرها به آرامی تخریب می شود و تاثیر بهترین مسیر نیز کم رنگ تر می گردد. از سوی دیگر با در نظر گرفتن مقادیر بزرگ برای ضرایب F_1 و F_2 فرومون ذخیره شده بر روی مسیرها به سرعت تخریب شده ولی تاثیر بهترین مسیر با اهمیت می گردد. پارامترهای a و b مقادیر ثابتی هستند که مقدار فرومون مسیرهای مختلف طی تکرارهای قبلی را کنترل می کنند. عبارتی انتخاب یک مقدار صحیح برای a و b بمنظور دستیابی به بهترین موازنه بین جستجوی جواب و استخراج جواب بسیار مهم می باشد. تعداد مورچه های مطلوب هر مساله، تابعی از نوع مساله مورد مطالعه می باشد و معمولاً از طریق اجرای الگوریتم بازای مقادیر مختلف مورچه تعیین می گردد (دوریگو و استاتزل 2003) در این تحقیق معیار سنجش تعداد مورچه ها، میانگین تابع هدف و انحراف استاندارد (در 20 تکرار) انتخاب شده است. جدول 2 بیانگر نتایج حاصله می باشد. نتایج جدول 2 نشان می دهد که با افزایش مورچه به تعداد معین، مقدار انحراف استاندارد و میانگین تابع هدف کاهش می یابد یعنی در مقادیر کمتر از 150 مقدار انحراف استاندارد افزایش یافته و پراکندگی نسبی نیز بیشتر می گردد در نتیجه مقدار میانگین تابع هدف افزایش می یابد اما بازای مقادیر بزرگ تر از 150، زمان اجرای برنامه زیاد می شود بدون اینکه انحراف استاندارد و تابع هدف کاهش قابل توجهی داشته باشند. لذا تعداد 150 مورچه انتخاب و وارد فضای پاسخ می شوند. با انتخاب

همگرایی الگوریتم برای 10 بار اجرای برنامه ارائه شده است. در جدول 3 نتایج بهینه متغیرهای طراحی و مقدار تابع هدف ارائه شده است. با انجام آنالیز حساسیت ثابت گردیده است که تغییر قطر داخلی طی روند بهینه سازی بسیار ناچیز بوده و کمینه شدن آن تاثیر قابل تاثیر قابل توجهی در بهینه سازی وزن پنستاک نخواهد داشت. لذا طبق داده های جدول 3 قطر داخلی پنستاک ثابت در نظر گرفته شده و تنها قطر بیرونی بهینه یابی گردیده است. میزان تغییرات قطر بیرونی نیز بگونه ای است که ضخامت جدار پنستاک پاسخگوی تنش های داخلی و تنش های خارجی وارده می باشد. در نتیجه با توجه به قطر بهینه بیرونی، سطح مقطع بهینه پنستاک محاسبه گردیده و با ثابت در نظر گرفتن طول پنستاک وزن بهینه آن بدست آمده است که قابل مقایسه با وزن اولیه پنستاک می باشد. مقدار وزن اولیه پنستاک $793/292 \times 10^3$ نیوتن است که پس از بهینه سازی مقدار آن به $650/511 \times 10^3$ نیوتن کاهش یافته است. یعنی میزان کاهش وزن $18/04\%$ می باشد. نکته قابل توجه طی بهینه سازی آن است که مقدار وزن بدست آمده از بهینه سازی نباید با وزن اولیه طراحی شده اختلاف فاحشی داشته باشد. بنابراین با بررسی نتایج می توان دریافت برای بهینه سازی پنستاک با تابع هدف و قیود غیر خطی و پیچیده، بکارگیری روش بهینه سازی الگوریتم اجتماع مورچه ها بسیار مفید می باشد.

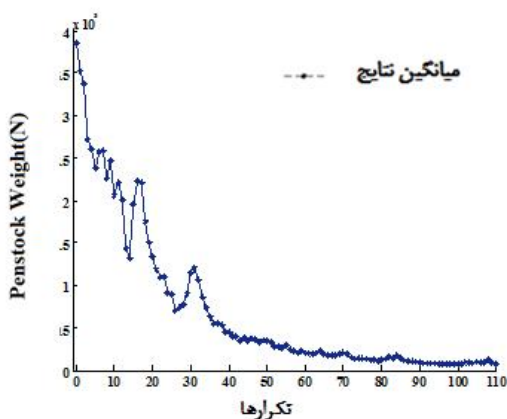
پارامترهای مناسب الگوریتم و اجرای آن، مقدار میانگین جواب ها و بهترین جواب برای تابع هدف محاسبه می شود. در شکل 6 نحوه همگرایی میانگین جواب و بهترین جواب بطور شماتیک نشان داده شده است. از لحاظ آماری و احتمالاتی اگر اختلاف بین دو مقدار میانگین جواب و بهترین جواب کم باشد احتمال رسیدن به جواب مناسب بیشتر است ولی جهت تضمین دستیابی به جواب مطلوب لازم است برنامه چندین مرتبه اجرا گردد. برای سد شهریار، با تعداد 100 نسل (محور افقی شکل 6)، 5 و 10 مرتبه اجرای برنامه مورد بررسی قرار گرفته است. در 5 مرتبه اجرا، مقدار میانگین جواب $701450/91$ نیوتن و بهترین جواب $669846/73$ نیوتن می باشد. در این حالت انحراف استاندارد $8/34$ نیوتن و پراکندگی نسبی $4/8\%$ است. در 10 مرتبه اجرا میانگین جواب و بهترین جواب به ترتیب $664208/4$ نیوتن و $650511/881$ نیوتن می باشد که مقدار انحراف استاندارد $2/79$ نیوتن و پراکندگی نسبی $0/23\%$ حاصل می شود. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تکرارها پراکندگی نسبی کاهش یافته و اختلاف میانگین جواب و بهترین جواب در 10 تکرار برای سد شهریار به $0/0702\%$ رسیده است. لذا 10 بار اجرای الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرد. در نتیجه با 10 مرتبه اجرای برنامه و 100 نسل برای مورد مطالعاتی حدود 1000 تحلیل انجام می شود که به نظر می رسد جهت تضمین درستی جواب های حاصله کافی باشد. در شکل 7 نمودار

جدول 1- پارامترهای بهینه الگوریتم ACS

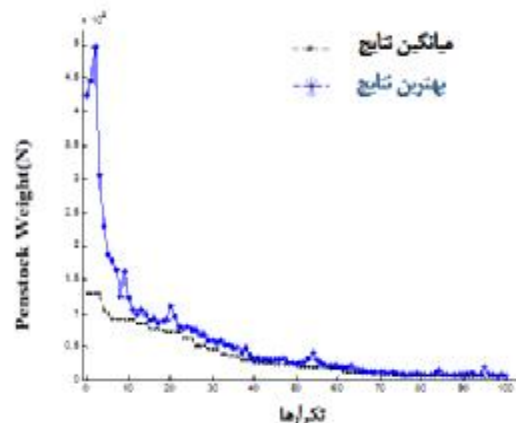
گام گسسته	توان تابع	تعداد مورچه	ضریب	ضریب	ضریب تبخیر فرمون	ضریب تبخیر فرمون
سازگی	پنالتی		b	a	r_2	r_1
0/02	0/9	150	0/5	1	0/6	0/8

جدول 2- تغییرات میانگین تابع هدف و انحراف استاندارد بازای تغییر تعداد مورچه

تعداد مورچه	50	100	150	200
میانگین تابع هدف (N)	701450/91	683319/704	650511/881	694051/812
انحراف استاندارد (N)	11/28	6/88	2/79	2/14



شکل 7 - نمودار همگرایی الگوریتم ACS برای 10 بار اجرای برنامه



شکل 6 - نحوه همگرایی پنستاک سد شهریار با مقایسه میانگین جواب ها و بهترین جواب

جدول 3 - مقدار بهینه قطر و وزن پنستاک

3400	2200	2000	1300	1200	قطر داخلی (mm)
3425/978	2225/979	2026/074	1319/996	1200/234	قطر بیرونی (mm)
139200/326	90261/269	82406/045	41125/71	400/433	سطح مقطع لوله (mm^2)
15540	53451	5954	31224	6168	طول (mm)
793292	192492	416834	43524	118746	وزن اولیه (N)
650511	166532	371418	37772	98857	وزن بهینه شده (N)

نتیجه گیری کلی

تنها موجب بهبود پاسخ ها نمی گردد بلکه زمان اجرای الگوریتم را افزایش می دهد. با توجه به قابلیت جستجوی الگوریتم و کارایی بالا، این روش توانسته است حجم مورد مطالعاتی را به میزان قابل قبولی کاهش دهد که این کاهش وزن مساوی 18/04% می باشد. نکته مهم در روند بهینه سازی این است که نتایج حاصله از بهینه سازی نباید با مقادیر موجود که از استانداردهای طراحی بدست آمده اختلاف فاحشی داشته باشند.

در این تحقیق از مدل بهینه سازی مقید برای یافتن ابعاد پنستاک با تابع هدف وزن و قید سازه ای و هیدرولیکی استفاده گردید. به دلیل پیچیدگی مساله و غیر خطی بودن تابع هدف و قیود، استفاده از الگوریتم های مرسوم ریاضی دشوار است از اینرو از روش هوشمند الگوریتم اجتماع مورچه ها استفاده گردیده است. در تحقیق حاضر همچنین تاثیر تعداد مورچه بر بهینه سازی مورد بررسی قرار گرفته و ثابت گردید که بازای مقدار معینی مورچه، جواب بهینه مطلوبی حاصل می گردد و افزایش تعداد مورچه از این مقدار معین نه

منابع مورد استفاده

بی نام، دفترچه محاسباتی سد شهریار، 1384. سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی.

- کاردان ن و کماسی م، 1389. بهینه سازی پنستاک با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 18-20 آبان ماه 1389. تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- مرتضوی نائینی س، دهقانی ا و منتظرغ، 1384. بهینه سازی هوشمند مقاطع سدهای بتنی وزنی روی پی‌های سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه‌ها. دانشکده مهندسی دانشگاه باهنر کرمان.
- نورانی و، وفایی ر و محبی ا، 1387. طراحی بهینه سد بتنی وزنی با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها- مدل سازی معکوس. اولین همایش ملی سد سازی، زنجان، 25 مهرماه 1387. زنجان: دانشگاه آزاد اسلامی زنجان.
- نورانی و، کی نژاد م ع و کاردان ن، 1390. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی پنستاک سدهای بتنی. مجله عمران و محیط زیست دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، جلد 40، شماره 3، صفحه‌های 85-95.
- Abbaspour KC, Schulin R and Van Genuchten MTh, 2001. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using Ant Colony optimization. *Adv Water Resource* 24: 827-841.
- Andaroodi MR, 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, Colorado.
- Dorigo M, 1992. Optimizing, learning and natural algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano Milan, Italy.
- Dorigo M, and Gamberdella LM, 1997. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 1(1): 35-66.
- Dorigo M, Caro GD, Gamberdella LM and Luca M, 1999. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life* 5(3): 137-172.
- Dorigo M, and Stutzle T, 2003. The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications, and advances. *International Series in Operations Research & Management Science* 57: 250-285.
- Fresen MH and Votesh Ch, 1983. Economic diameter of steel penstock. *Transactions, ACSE* 103(3): 54-62.
- Gilmour S and Dras M, 2005. Understanding the pheromone system within ant colony optimization. PP. 786-789. AI'05 Proceeding of the 18th Australian Joint Conference on Advances in Artificial Intelligence. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Jalali MR, Afshar A and Marino MA, 2006. Improved ant colony optimization algorithm for reservoir operation. *J Scientia Iranica* 13(3): 295-302.
- Stutzle T and Hoos H, 1997. Improvements on the Ant system: Introduction MAX-MIN ant system. PP. 245-249. In Proceeding of International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. Springer-Verlag, Wien.
- Maier HR, Simpson AR, Zecchin AC, Foong WK, Phang KY, Seah HY and Tan CL, 2003. Ant Colony optimization for the design of water distribution systems. *J Water Res Plng and Mgmt* 129(3): 200-209.
- Sarkaria D, 1979. Economic Penstock Diameter, A 20 year Resources Technical Publication. Engineering Monograph No.3, U.S. Dept of Interior, Bureau of Reclamation. Denver, Colorado.
- Souren B, and Hadian R, 1980. Optimization and design of underground embedded penstocks. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Canada.
- Stutzle T and Hoos H, 1997. Improvements on the Ant system: Introduction MAX-MIN ant system. PP. 245-249. In Proceeding of International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. Springer Verlag, Wien.

Zecchin AC, Maier HR, Simpson AR, Leonard M, Roberts AJ and Berrisford MJ, 2006. Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization. Math Compute Model 44: 451-468.