

بهینه‌سازی شکل مخازن آب هوایی اینتز با رویکرد مقایسه‌ای الگوریتم‌های فرا ابتکاری

هوشیار ایمانی کله سر *

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

امیررضا اسمعیلی اقدام

دانشجوی دکتری مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

این تحقیق، با هدف بررسی نسبت بهینه ابعاد مخزن و ظرفیت ذخیره‌سازی اقتصادی مخزن اینتز همچنین مقایسه کارایی و عملکرد چهار الگوریتم فرا ابتکاری صورت می‌گیرد. جهت بهینه‌سازی مخزن هوایی اینتز با ظرفیت‌های حجمی مختلف چهار مثال مخزن اینتز بررسی شده‌اند. الگوریتم‌ها شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، کرم شب تاب (FA)، ازدحام ذرات (PSO) و رقابت استعماری (ICA) بوده و روش طراحی مطابق با آئین نامه IS ۳۳۷۰ هندوستان می‌باشد. تابع هدف شامل هزینه مصالح ساخت مخزن و تابع متغیرهای طراحی بوده و هزینه کلی مخزن شامل مجموع هزینه‌های بتن و فولاد و سطح قالب‌بندی مخزن می‌باشد. قیدهای مسئله نیز شامل تنش‌های اعضای مخزن و محدودیت‌های حجم و ابعاد هندسی اعضای مخزن می‌باشند. جهت بهینه نمودن می‌بایست تمامی قیدها در طول فرایند طراحی به مقادیر مجاز خود محدود شوند. در این تحقیق، طرح بهینه مخزن اینتز با ۲۵ درصد کاهش در هزینه ساخت توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمده است. مخزن اینتز برای حجم‌های ذخیره‌سازی بیش از ۵۰۰ مترمکعب توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخزن اینتز، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کرم شب تاب، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم رقابت استعماری، بهینه سازی.

* نویسنده مسئول: hek@uma.ac.ir

۱- مقدمه

[۷]. در سال ۲۰۰۵ نیز Sahab و همکاران، بهینه سازی دال تخت را با الگوریتم ژنتیک و با تابع هدف شامل هزینه‌های سقف و ستون‌های نگهدارنده آن را بررسی کردند [۸].

در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی ضخامت جداره مخزن و زاویه دیواره جانبی مخزن بتنی مخروطی با چند حجم ثابت مطابق با آیین نامه ACI با ظرفیت‌های ۵۰ تا ۱۰۰ مترمکعب و با الگوریتم‌های ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و جهش قورباغه توسط Barakat و همکاران صورت گرفته است. ایشان، با روش المان محدود به بررسی اندازه مش در گوشه‌های مخزن و سایر نقاط جهت کنترل عرض ترک‌های ایجاد شده به‌عنوان قید و میزان تنش‌های برشی مقطع پرداخته‌اند. تابع هدف پژوهش فوق نیز شامل هزینه ساخت مخزن بر اساس مقادیر بتن و فولاد مصرفی و سطح قالب بندی تعریف شده بود [۹]. Kumar در سال ۲۰۱۶ بصورت کلاسیک، مطابق با آیین‌نامه هندوستان، نسبت ارتفاع به قطر مخزن اینتر را برای ظرفیت‌های مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب بررسی نموده است. ایشان برای مخازن با ظرفیت بیش از ۲۵۰ مترمکعب، نسبت ارتفاع به قطر را ۰/۷ پیشنهاد نموده‌اند. نسبت‌های مختلف ارتفاع به قطر مخزن با تابع هدف شامل مجموع هزینه فولاد و حجم بتن بدون لحاظ سطح قالب بندی بوده است [۱۰].

Nitya نیز در سال ۲۰۱۹ یک نمونه مخزن بتنی با ظرفیت‌های ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ مترمکعب با ثابت بودن ارتفاع مخزن و ۱۶ متغیر هندسی مورد مطالعه قرار داده‌اند. روند بهینه‌سازی با تنظیم یکی از پارامتر الگوریتم ژنتیک مرتبط با درصدهای انتخاب نسل آتی در فرایند جهش، به بررسی مخازن با قطرهای مختلف و اثر پارامتر ژنتیک در هزینه ساخت پرداخته‌است [۱۱]. با توجه به اینکه در مخازن ذخیره هوایی با افزایش قطر، ضخامت دال کف می‌بایست بیشتر شود لذا یکی از راه حل‌های اقتصادی استفاده از کف گنبدی کروی و مخروطی می‌باشد که به مخازن نوع اینتر مشهور هستند. دو دسته دیگر از مخزن هوایی شامل مخزن هوایی مخروطی و استوانه‌ای شکل یا گرد با کف تخت نیز وجود دارند. بیشتر تحقیقات گذشته برای احجام محدود، نسبت‌های مختلف ارتفاع به قطر مخزن با الگوریتم ژنتیک بررسی شده است. در این تحقیق، شکل هندسی مخزن هوایی نوع اینتر بر اساس توصیه‌های پیشنهادی آیین نامه ISI:3370 به صورت طرح اولیه انتخاب و با الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، کرم شب‌تاب و رقابت

مخازن ذخیره مایعات یکی از حیاتی‌ترین سازه‌های بشر و طرح اقتصادی چنین سازه‌های حجیم از اهمیت خاصی برخوردار است. یک مخزن ذخیره آب یا هر نوع مایع، علاوه بر مقاومت و استحکام کافی در برابر بارهای وارده می‌بایست در برابر ترک خوردگی و تراوش نیز مقاوم باشد [۱]. در طرح چنین سازه‌ها عمق ناحیه فشاری مقطع در کنترل میزان تراوش مایعات بسیار اهمیت داشته و بر اساس مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته از حساسیت و سخت‌گیری بیشتری برای کنترل میزان نشت مایعات در چنین سازه‌ها اعمال می‌گردد [۲].

با توجه به اهمیت بهینه‌سازی سازه‌های بتن مسلح، یکی از اولین پژوهش‌ها توسط کوهن به سال ۱۹۶۸، در خصوص طرح بهینه قالب‌های بتنی بصورت مسئله برنامه‌ریزی ریاضی بوده است. در پژوهش فوق از روش حدی برای طراحی سازه و بهینه‌سازی با هدف کمینه نمودن هزینه ساخت صورت گرفته است. با توجه به متغیرهای هندسی زیاد دخیل در طراحی مخزن بتنی اینتر، انتخاب ابعاد اولیه معمولاً بر اساس توصیه‌های آیین‌نامه ای و تجربه می‌باشد. امروزه با پیشرفت‌های علوم کامپیوتری، امکان طرح بهینه و اقتصادی با کمک الگوریتم‌های فراابتکاری میسر می‌باشد [۳].

Sexena و همکاران در سال ۱۹۷۲ بهینه‌سازی مخزن بتنی نوع اینتر با پایه مرکزی را بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی و مطابق آیین نامه هندوستان انجام دادند. در تحقیقات آنها تابع هزینه شامل هزینه بتن ریزی، آرماتور بندی و قالب بندی سطح مخزن بوده است. تمام پارامترهای مربوط به ابعاد هندسی مخزن بصورت نسبتی از قطر پایه مرکزی مخزن تعریف و هزینه ساخت برای حجم‌های مختلف مخزن مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

در سال ۱۹۸۴ یک مسئله طرح بهینه سازه‌های بتنی مسلح با استفاده از آیین نامه آلمانی و الگوریتم درجه دوم متوالی مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مسئله شامل ابعاد هندسی عناصر سازه و تابع هدفی بر اساس حداقل هزینه ساخت تعریف شده بودند [۵].

Tan در سال ۱۹۹۳ بهینه‌سازی مخزن بتنی را بر مبنای آیین نامه بتن انگلستان با تابع هدف هزینه ساخت و با استفاده از روش ضرایب لاگرائز بررسی نمود [۶]. همچنین در سال ۲۰۰۸ Taysi و همکاران، بهینه‌سازی تیرهای قوسی را بر اساس حداقل انرژی کرنشی و وزن تیر را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی نمودند

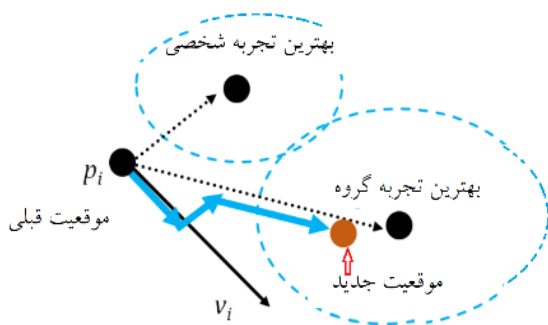
برابر ۱۵ درصد اختلاف بین حد بالا و پایین متغیرها محاسبه و به هر متغیر اضافه می‌گردد.

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترهای الگوریتم ژنتیک	
تعداد جمعیت اولیه	Population = 100
درصد باز ترکیب	$C_p = 0.8$
نرخ جهش	Mu=0.2
تعداد تکرار	Iteration = 1000

۳- الگوریتم ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش بهینه‌سازی می باشد که در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی و راسل ابداع شده است [۱۵]. در این الگوریتم گروهی از پرندگان در حال حرکت از یک موقعیت به موقعیت دیگر، دائم در حال تغییر بوده و روند تغییرات در بردار جابجایی هر ذره در هر تکرار با لحاظ بهترین تجربه گروه ذرات و تجربه شخصی هر ذره بهبود پیدا می‌کند. این الگوریتم با شبیه نمودن رفتار اجتماعی پرندگان، هر ذره یک موقعیت تصادفی و مختصات ذره در فضای جستجوی چند بعدی تعریف و متناسب با موقعیت آن مقداری بر اساس روابط تابع هدف محاسبه می‌گردد. مطابق شکل ۱ موقعیت جدید هر ذره بر اساس سه بردار شامل سرعت اولیه، بهترین تجربه شخصی هر ذره و بهترین تجربه گروهی به روزرسانی می‌شود. محاسبات الگوریتم ازدحام ذرات مطابق رابطه (۲) صورت می‌گیرد [۱۶].



شکل ۱- بردارهای جابجایی ذرات در الگوریتم ازدحام ذرات

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + C_1 \text{rand.} (pb_i^t - p_i^t) + C_2 \text{rand.} (gb^t - p_i^t) \quad (1)$$

$$p_i^{t+1} = p_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

در روابط فوق V_i^{t+1} سرعت جدید ذره، pb_i^t بهترین تجربه

استعماری بهینه‌سازی در دو حالت اعمال هزینه فولاد و عدم لحاظ فولاد صورت می‌گیرد.

۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی و جستجو بر پایه قوانین ژنتیک می‌باشد. این الگوریتم برای هر دسته متغیر یک دسته ژن را تعریف و هر کروموزوم شامل دسته‌ای از ژن‌ها و هر ژن بیانگر یک متغیر مسئله می‌باشد. این الگوریتم همزمان در یک میدان جستجو چندین نقطه را انتخاب کرده و ارزش هر نقطه جستجو بصورت مستقل محاسبه می‌شود. این الگوریتم از قوانین علم ژنتیک استفاده کرده و اصطلاحات ژنتیکی آن به این صورت می‌باشد که یک کروموزوم شامل برداری از اعداد که همان متغیرهای مسئله بوده و تشکیل شده از چند ژن و هر ژن بیانگر یک متغیر برای حل مسئله می‌باشد [۱۲]. یک کروموزوم بعد از قرار گرفتن در فرایند حل مسئله با توجه به تابع هدف از یک درجه مطلوبیتی برخوردار می‌شود و مقدار حاصل از مجموعه متغیرهای کروموزوم در یک تابع هدف به میزان سازگاری معروف می‌شود. همچنین برای تولید نسل‌های بهتر می‌بایست عملیات جابجایی ژن‌های متناظر از دو کروموزوم به عنوان والد‌های تولید نسل صورت گیرد که به این مرحله تبادل ژن گفته می‌شود. برای همگرایی بهتر مسئله در رسیدن به پاسخ کمینه باید تغییرات تصادفی در یک یا چند ژن و چند کروموزوم منتخب صورت گیرد. در این الگوریتم ابتدا متغیرهای مسئله شناسایی و تابع هدف و پارامترهای لازم شناسایی شده و سپس جمعیتی از کروموزوم‌ها که شامل یک رشته از متغیر پیوسته می‌باشد بصورت تصادفی ساخته می‌شود و در مرحله بعدی با استفاده از عملگرهای گزینشی کروموزوم‌های والد تعیین و فرزندان جدید تولید می‌شوند. بعد از اعمال عملگرهای جهش و تبادل ژنی، فرزندان جدید با توجه به تابع هدف، ارزیابی و در ادامه با انتخاب کروموزوم‌های والد جدید که بهترین‌ها می‌باشند عملیات تکرار شده تا جواب بهینه حاصل شود. در الگوریتم ژنتیک از یک نرخ جهشی استفاده می‌شود که برای تمام نسل‌ها عدد ثابتی فرض می‌شود [۱۳ و ۱۴]. در جدول ۱ درصد باز ترکیب برابر ۰/۸ که ۸۰ درصد جمعیت را برای انجام عملیات باز ترکیب انتخاب می‌کند. همچنین نرخ جهش برابر ۰/۲ که با عملیات جهش، ۲۰ درصد متغیرها انتخاب و در برنامه نوشته شده مقادیری

تاب با رابطه (۴) می باشد.

$$x_{i+1} = x_i + \beta_0 \cdot (e^{-\gamma r_{ij}^2}) \cdot (x_i - x_i) + \alpha_0 \cdot rand \quad (4)$$

در رابطه فوق، x_i موقعیت اولیه کرم شب تاب i و x_j موقعیت کرم شب تاب j و r_{ij} فاصله اقلیدوسی دو کرم شب تاب x_{i+1} نیز موقعیت ثانویه بعد از حرکت می باشد.

۵- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری بر اساس مدل سازی فرایند اجتماعی سیاسی پدیده استعمار ابداع شده است. جمعیت اولیه کشورها بصورت توزیع تصادفی ایجاد می شوند. در این الگوریتم تمام کشورها به دو دسته استعمارگر که بهترین عناصر جمعیت و مستعمره تقسیم می شوند. مقدار تابع هزینه هر مسئله ای به ازای هر طراحی محاسبه و بصورت صعودی یعنی با کمترین هزینه به عنوان اولین پاسخ مرتب می گردد. مرحله بعد ایجاد امپراطوری ها که هر امپراطوری از یک کشور استعمارگر و چند مستعمره تشکیل شده است. در فرایند بهینه سازی اگر مستعمره ای دارای هزینه کمتر نسبت به استعمارگر باشد جایگزین آن می شود. یعنی امپراطوری ضعیف، باید ضعیفترین مستعمره خود را به یک امپراطوری دیگر اختصاص دهد. هزینه کل امپراطوری ها بر اساس هزینه کشور استعمارگر و ضربی از هزینه های مستعمرات آن امپراطوری تعریف می گردد.

جدول ۴- پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری

پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری	
Ncountries = 100	تعداد کشورها
Nimp = 10	تعداد استعمارگر
P_revolve = 0.1	نرخ انقلاب
$\beta = 2$	سیاست جذب
Iteration = 1000	تعداد تکرار

مفهوم قدرت امپراطوری، مجموع قدرت کشور امپریالیست و درصدی از میانگین قدرت مستعمرات می باشد. بقای امپراطوری، وابسته به قدرت جذب سایر مستعمرات می باشد. در جریان رقابت های امپریالیست، به تدریج بر قدرت امپراطوری های بزرگتر افزوده و امپراطوری های ضعیف تر، حذف می شوند اگر یک امپراطوری هیچ مستعمره ای نداشته باشد باید مستعمره یکی از

شخصی هر ذره و gb^t بهترین تجربه گروهی از بین ذرات و p_i^t موقعیت قبلی ذره می باشد. مطابق با جدول ۲ مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 مربوط به پارامترهای یادگیری با تجربه شخصی و تجربه گروهی با مقادیر ۲ می باشند. w ضریب اینرسی سرعت ذرات از مقادیر ۰/۹ تا ۰/۴ بصورت خطی تا تکرار آخر کاهش می یابد.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات	
Population = 100	تعداد جمعیت اولیه
$C_1 = C_2 = 2$	پارامترهای یادگیری
$w_2 = 0.9 \quad w_1 = 0.4$	ضریب اینرسی
Iteration = 1000	تعداد تکرار

۴- الگوریتم کرم شب تاب

الگوریتم کرم شب تاب Firefly Algorithm به اختصار FA در سال ۲۰۰۷ توسط Xin-She Yang معرفی شد و ایده اصلی آن ارتباط نوری بین کرم های شب تاب الهام گرفته از طبیعت می باشد. میزان جذابیت هر کرم شب تاب متناسب با شدت روشنایی هست که توسط سایر کرم ها مشاهده می شود. در الگوریتم کرم شب تاب سه شرط می بایست رعایت گردد. شرط اول هم جنس بودن کرم های شب تاب، شرط دوم، تناسب قدرت جذب هر کرم شب تاب با شدت نور و شرط سوم در خصوص کیفیت جواب و میزان نزدیکی آن به تابع هدف که متناسب با درخشندگی تعریف می گردد [۱۷ و ۱۸].

جدول ۳- پارامترهای الگوریتم کرم شب تاب

پارامترهای الگوریتم کرم شب تاب	
Population = 100	تعداد جمعیت اولیه
$\beta_0 = 2$	جذابیت در $r=0$
$\gamma = 1$	تنوع جذابیت
$\alpha_0 = 0.2$	پارامتر تصادفی
Iteration = 1000	تعداد تکرار

در جدول ۳ مقادیر β_0 ضریب جذابیت که با فاصله دو کرم شب تاب محاسبه و α_0 پارامتر تصادفی جهت تغییر زاویه حرکت هر کرم شب تاب در هر مرحله از حرکت می باشد. γ ضریب مربوط به تنوع جذابیت بوده و برابر ۱ می باشد. نحوه حرکت کرم شب

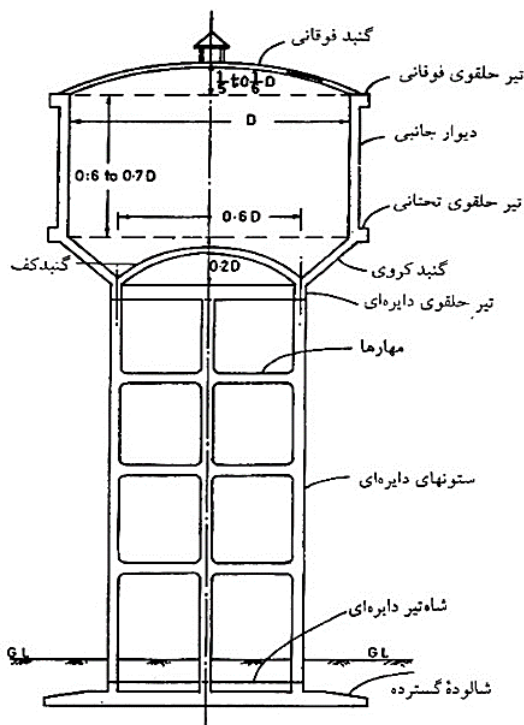
بهینه‌سازی شکل مخازن آب هوایی اینتر با ...

در رابطه فوق $F(x)$ تابع هدف یا هزینه، x بردار متغیرهای طراحی X_i ، S_k^{min} و S_k^{max} به ترتیب متغیرهای طراحی، حد بالای قید و حد پایین قیدهای طراحی می‌باشد. جزییات بیشتر در خصوص قیدهای طراحی در بخش ۷ اشاره شده است.

۶-۱- عناصر سازه ای مخزن هوایی آب اینتر

با توجه به شکل ۳ اجزای تشکیل دهنده مخزن نوع اینتر عبارت است از:

- ۱- گنبد کروی
- ۲- تیر حلقوی فوقانی
- ۳- دیوار مدور جانبی
- ۴- تیر حلقوی تحتانی
- ۵- گنبد مخروطی
- ۶- گنبد کروی تحتانی
- ۷- شاهتیر مدور زیر گنبد کروی
- ۸- برج با ستون و مهارها
- ۹- شالوده

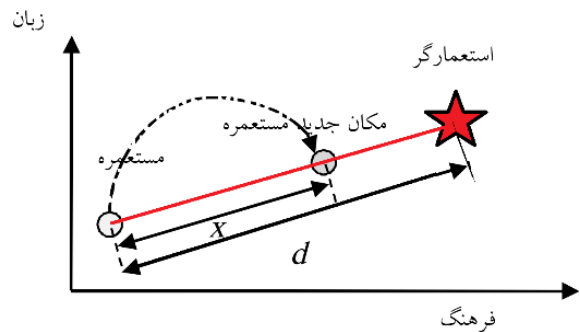


شکل ۳- اجزای مخزن نوع اینتر و ابعاد پیشنهادی بهینه [22].

۶-۲- تابع هدف

هر مسئله بهینه‌سازی با مجموعه‌ای از کمیت‌ها بیان می‌شود.

امپراطوری‌ها گردد. [19]. برای مثال در یک مسأله دو بعدی، سیاست جذب الگوریتم، مطابق شکل ۲ از طریق مؤلفه‌های فرهنگ و زبان باعث حرکت مستعمرات به سمت استعمارگر می‌شود.



شکل ۲- سیاست جذب استعمارگرها

فاصله بین استعمارگر و کشور مستعمره اگر d باشد کشور مستعمره به اندازه x به سمت استعمارگر با مقادیری زاویه انحرافی تصادفی حرکت می‌کند. مقادیر ضریب مربوط به سیاست جذب مطابق جدول ۴، برابر ۲ در نظر گرفته شده است. انتخاب ضریب ۲ باعث می‌شود تا جهات حرکت کشورهای مستعمره به سمت استعمارگر افزایش یابد. همچنین نرخ بروز انقلاب برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است که بدین معناست در بین ۱۰ درصد مستعمره‌ها انقلاب ایجاد و احتمال وقوع آن ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود.

۶- معرفی مسئله بهینه سازی

در فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی مخازن اینتر، ابعاد هندسی مقاطع و عناصر تشکیل دهنده مخزن به عنوان متغیرهای طراحی در بازه‌ی حداقل و حداکثری انتخاب می‌شوند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی بصورت تصادفی مقادیری را انتخاب و مسئله بهینه‌سازی با محدودیت‌های طراحی (حد مجاز تنش‌های مقطع و غیره) و کنترل قید حجم مخزن و سایر قیدها، حل می‌نمایند. در یک مسئله بهینه‌سازی، تابع هدف مطابق رابطه (۳) تعریف می‌گردد که متغیرهای طراحی باید ضمن ارضای تمامی محدودیت‌ها، تابع هدف را به کمترین مقدار ممکن سوق دهند. تابع هدف در این تحقیق شامل هزینه ساخت مخزن می‌باشد.

$$\text{Minimize: } F(x) \quad (3)$$

$$\text{Subject to : } S_k^{min} \leq S_k \leq S_k^{max} \quad (4)$$

$$X_i^{min} \leq X_i \leq X_i^{max} \quad (5)$$

جدول ۵- قیدهای مربوط به متغیرهای هندسی

شماره	متغیر طراحی	قیدهای مشخصه
g_1	$5 \leq X_1 \leq 20$	قطر مخزن (m)
g_2	$1 \leq X_2 \leq 4$	خیز گنبد فوقانی
g_3	$0.1 \leq X_3 \leq 0.75$	ضخامت گنبد فوقانی
g_4	$0.3 \leq X_4 \leq 1$	عرض تیر فوقانی
g_5	$0.3 \leq X_5 \leq 1$	ارتفاع تیر فوقانی
g_6	$3 \leq X_6 \leq 20$	ارتفاع خالص دیوار
g_7	$0.3 \leq X_7 \leq 1$	ضخامت پایین دیوار
g_8	$0.3 \leq X_8 \leq 2$	عرض تیر تحتانی
g_9	$0.4 \leq X_9 \leq 1$	ارتفاع تیر تحتانی
g_{10}	$1 \leq X_{10} \leq 4$	ارتفاع مخروط
g_{11}	$3 \leq X_{11} \leq 12$	قطر گنبد کف
g_{12}	$0.4 \leq X_{12} \leq 1$	ضخامت مخروط
g_{13}	$1 \leq X_{13} \leq 2.5$	ارتفاع گنبد کف
g_{14}	$0.2 \leq X_{14} \leq 1$	ضخامت گنبد کف
g_{15}	$0.4 \leq X_{15} \leq 1$	عرض تیر (گنبد کف)
g_{16}	$0.4 \leq X_{16} \leq 2$	ارتفاع تیر (گنبد کف)

۷- قیدهای مسئله

قیدهای مسئله برای بهینه‌سازی مخازن بتنی اینتر شامل قیدهای مشخص مانند محدودیت‌های ابعاد سازه‌ای و قیدهای ضمنی طراحی مانند محدودیت تنش‌ها و غیره می‌باشند.

۷-۱- قیدهای مشخصه

قیدهای مشخصه، حد بالا و پایین متغیرهای طراحی (ابعاد هندسی و...) بوده و شامل حد پایین و بالای ارتفاع تیرها، ضخامت دال‌های گنبدی، ضخامت دیوار، ابعاد داخلی مخزن و به طور کلی هر کدام از متغیرهای طراحی مشخص را تحت عنوان قیدهای مشخصه می‌توان نام برد. با توجه به جدول ۵ جهت کنترل قیدهای حد بالا و پایین ۱۶ متغیر هندسی مخزن می‌بایست ۳۲ قید طراحی بصورت زیر تعریف گردد.

$$X_i \leq X_U \rightarrow g(X_i) = \frac{X_i}{X_U} - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$X_i \geq X_L \rightarrow g(X_i) = \frac{X_i}{X_L} - 1 \geq 0 \quad (12)$$

تعدادی از کمیت‌ها بصورت متغیر و برخی بصورت عوامل ثابت و با مقادیر معلوم می‌باشند. هدف اصلی بهینه‌سازی، انتخاب بهترین طرح، از بین طرح‌های قابل قبول که معیار مقایسه‌ای جهت انتخاب بهترین طرح با رعایت محدودیت‌های مسئله، تابع هدف می‌باشد. در این تحقیق تابع هدف شامل مجموع هزینه‌های ساخت مخزن آب هوایی اینتر می‌باشد.

$$F(x) = V_c C_c + W_s C_s + A_f C_f \quad (6)$$

در رابطه (۶) تابع $F(x)$ هزینه کلی ساخت مخزن و V_c و W_s و A_f به ترتیب حجم بتن مصرفی، وزن میلگردهای مصرفی و سطح کل قالب بندی مخزن می‌باشد. هزینه واحد عملیات بتن ریزی، میلگردهای فولادی و قالب بندی به ترتیب با C_c ، C_s و C_f مشخص شده است.

۶-۳- تابع جریمه

محاسبات بر اساس الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای مسائل بهینه‌سازی بدون قید بوده و جهت کاربردی نمودن الگوریتم‌ها و ادغام قیدهای مسائل مقید می‌بایست تابع هدف و مجموع قیود حاکم را با یک تابع معادل تبدیل نمود. رایج ترین مدل برای تشکیل چنین تابع معادل، از روش جریمه و در این تحقیق تعریف تابع جریمه به صورت زیر می‌باشد [۲۰ و ۲۱].

$$P(X) = F(X) [1 + P \cdot C] \quad (7)$$

در رابطه فوق $P(X)$ تابع هدف جریمه شده و پارامتر P عدد ثابت و مثبتی که به ضریب جریمه معروف بوده و بر اساس نوع مسئله توسط کاربر تعیین می‌شود. همچنین پارامتر C مجموع مقادیر نسبی قیدهای نقض شده می‌باشد. در این پژوهش $P=20$ در نظر گرفته شده است. در مسائل کمینه‌سازی، اگر تخطی از محدودیت‌ها صورت نگیرد در اینصورت مقدار پارامتر C برابر صفر خواهد شد.

$$\text{if } \rightarrow g(X_i) > 0 \rightarrow \text{then } C_i = g(X_i) \quad (8)$$

$$\text{elseif } \rightarrow g(X_i) \leq 0 \rightarrow \text{then } C_i = 0 \quad (9)$$

$$C = \sum_{i=1}^m C_i = \sum_{i=1}^m g(X_i) \quad (10)$$

در جدول ۵ مجموع متغیرهای ارتفاع خالص دیوار و ارتفاع تیر تحتانی و فوقانی برابر با ارتفاع کلی مخزن می‌باشد.

اعضای کششی:

$$\sigma_i \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$\sigma_{ti} = 1.2 \text{Mpa}$$

۷-۲-۱- قید تنش‌های گنبد کروی فوقانی

مطابق شکل ۴ متغیرهای طراحی برای گنبد کروی فوقانی شامل ضخامت گنبد، دهانه یا قطر اصلی و خیز گنبد بوده و بر اساس نیروهای نصف النهاری و محیطی محاسبه می‌شوند.

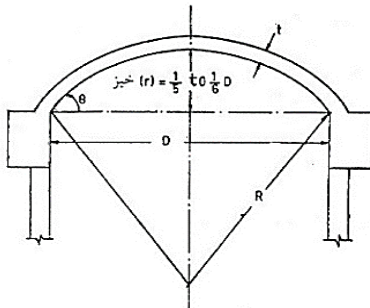
نیروی رانش نصف النهاری:

$$T_1 = \frac{w.R}{(1+\cos\theta)} \quad (23)$$

نیروی رانش محیطی:

$$T_2 = w.R.\cos\theta - \frac{w.R}{(1+\cos\theta)} \quad (24)$$

در روابط فوق، w مجموع وزن بار مرده و زنده اعمالی بر گنبد فوقانی، R شعاع داخلی گنبد می‌باشد. تنش‌های ایجاد شده در بخش گنبد فوقانی از رابطه (۲۵) بدست می‌آیند.



شکل ۴- هندسه کلی گنبد فوقانی

$$f_{tt} = \frac{T_1}{t} \quad f_{td} = \frac{T_2}{t} \quad (25)$$

در روابط فوق، T_1 مقادیر نیروی رانش نصف النهاری و T_2 مقادیر نیروی رانش محیطی و t ضخامت گنبد فوقانی، f_{td} و f_{tt} نیز به ترتیب تنش‌های نصف النهاری و محیطی ایجاد شده در گنبد فوقانی می‌باشد. در این بخش نیز دو قید کنترل تنش، مطابق روابط زیر لحاظ می‌گردد. اگر نیروی رانش محیطی کششی باشد حالت کنترل تنش کششی و در غیر اینصورت به عنوان قید تنش فشاری کنترل می‌شود.

تنش رانش نصف النهاری یا محیطی:

$$f_{tt} \leq \sigma_{ci} \rightarrow g(x) = \frac{f_{tt}}{\sigma_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (26)$$

$$\sigma_{ci} = 5 \text{Mpa}$$

همچنین نسبت ارتفاع به عرض تیر گنبد کف مخزن نباید از ۲ برابر بیشتر گردد و حداقل ارتفاع تیر تحتانی گنبد باید بزرگتر از عرض تیر لحاظ شود. یکی از قیدهای دیگر مربوط به نسبت قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین که باید بیشتر از یک لحاظ گردد. برای تیرهای حلقوی فوقانی و تحتانی مخزن دو قید دیگر جهت کنترل بیشتر بودن عرض تیرها نسبت به ارتفاع آنها لحاظ می‌گردد. محدودیت‌های ابعادی فوق به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X_{16} \leq 2X_{15} \rightarrow g(b1) = \frac{X_{16}}{2X_{15}} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

$$X_9 \leq X_8 \rightarrow g(b2) = \frac{X_9}{X_8} - 1 \leq 0 \quad (14)$$

$$X_{11} \leq X_1 \rightarrow g(b3) = \frac{X_{11}}{X_1} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

$$X_5 \leq X_4 \rightarrow g(b4) = \frac{X_5}{X_4} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

$$X_5 \leq X_4 \rightarrow g(b5) = \frac{X_5}{X_4} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$X_9 \leq X_8 \rightarrow g(b6) = \frac{X_9}{X_8} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

برای بهینه‌سازی حجم مخزن با ظرفیت ثابت، باید یک قید مساوی جهت کنترل حجم تعریف شود. هر مرحله از بهینه‌سازی به صورتی است که ظرفیت مخزن بهینه با متغیر بودن قطر و ارتفاع مخزن و سایر ابعاد از حد مشخص کمتر یا بیشتر نگردد.

$$V_{opt} = V_t \rightarrow g(V1) = \frac{V_t}{V_{opt}} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$V_{opt} = V_t \rightarrow g(V2) = \frac{V_{opt}}{V_t} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

برای هر قید مساوی، دو قید نامساوی در معادلات تعریف قیدها لحاظ می‌گردد. در روابط فوق V_t ظرفیت حجمی مشخص مخزن و V_{opt} حجم بهینه حاصل در هر مرحله بهینه‌سازی می‌باشد.

۷-۲-۲- قیدهای ضمنی

جهت کنترل الزامات عملکردی مخزن اینتر تحت نیروهای وارده می‌بایست قیدهای ضمنی مانند قید تنش‌های ایجاد شده و غیره محدود به مقادیر مجاز شوند تا عناصر تشکیل دهنده مخزن تنش‌های بیش از حد الاستیک را تجربه نکنند. برای اعضای فشاری و کششی کنترل تنش‌های الاستیک مطابق روابط (۶) و (۷) صورت می‌گیرد.

اعضای فشاری:

$$\sigma_i \leq \sigma_{ci} \rightarrow g(x) = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

$$\sigma_{ci} = 5 \text{Mpa}$$

تنش کششی محیطی:

$$f_{td} \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{f_{td}}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (27)$$

$$\sigma_{ti} = 1.2Mpa$$

۱- بار عمودی ناشی از وزن گنبد بالا

۲- وزن خود تیر

۳- وزن تیر حلقوی فوقانی

۴- وزن دیواره منبع

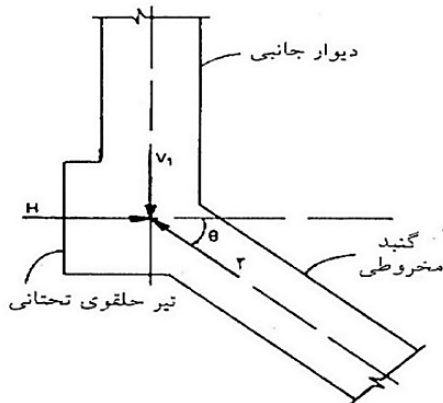
با توجه به نیروهای فوق و زاویه گنبد مخروطی با افق مقادیر نیروی رانش H از رابطه زیر بدست می آید.

$$H = V_1 \cot(\theta) \quad (31)$$

$$F_{bb} = \frac{H.D_1}{2} + \frac{\rho.h.d.D_1}{2} \quad (32)$$

$$f_{Bb} = \frac{F_{bb}}{(A_C + m.A_{St})} \quad (33)$$

در روابط فوق، F_{bb} مقدار نیروی کششی داخل تیر حلقوی تحتانی و H مقدار نیروی رانش وارد بر تیر، ρ چگالی آب و d عمق تیر حلقوی تحتانی، h ارتفاع آب در تراز تیر حلقوی تحتانی می باشد.



شکل ۵- نیروهای اعمالی بر تیر حلقوی تحتانی

فولاد گذاری تیر حلقوی بر اساس محدود نمودن تنش های کششی فولاد و سطح مقطع تیر می باشد. محدودیت کنترل تنش در تیر حلقوی تحتانی بصورت زیر اعمال می گردد.

$$f_{Bb} \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{f_{Bb}}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (34)$$

۲-۵- قید تنش های گنبد مخروطی

نیروی V_2 در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر نیروی فوق شامل وزن آب روی بخش مخروطی، وزن مرده دال بتنی مخروطی، وزن گنبد فوقانی و دیوار جانبی و تیرهای فوقانی و تحتانی می شود که بخش نیروی نصف النهاری گنبد مخروطی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$T = V_2 \operatorname{cosec}(\theta) \quad (33)$$

$$f_{CG} = \frac{T}{(A_C)} \quad (34)$$

۲-۲-۲- قید تنش های تیر حلقوی فوقانی

سطح مقطع تیر حلقوی فوقانی با محدود کردن تنش های کششی به مقادیر توصیه شده در آیین نامه هندوستان محاسبه و مشخص می شود. مقادیر تنش های کششی حلقوی از رابطه زیر بدست می آید.

$$f_{Bt} = \frac{T_1 \cos(\theta).D_1}{2(A_C + m.A_{St})} \quad (28)$$

در رابطه فوق A_{St} سطح مقطع میلگردهای کششی مقطع، m نسبت مدول ارتجاعی فولاد به بتن مطابق طرح اولیه آیین نامه هندوستان برابر ۱۳ در نظر گرفته شده است. A_C نیز سطح مقطع تیر بتنی و D_1 قطر داخلی مخزن می باشد.

$$f_{Bt} \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{f_{Bt}}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (29)$$

$$\sigma_{ti} = 1.2Mpa$$

۲-۳- قید تنش های دیوار جانبی مخزن

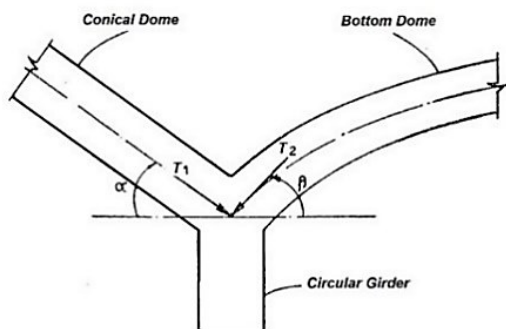
دیواره جانبی مخزن با توجه به نیروی کششی حلقوی ناشی از فشار آب مخزن طراحی و تنش های الاستیک آن از روابط زیر کنترل می گردد.

$$f_{Wb} = \frac{\rho.H.D_1}{2(t_{bc} + m.A_{St})} \quad (30)$$

در روابط فوق، t_{bc} ضخامت بخش تحتانی دیوار و A_{St} میزان فولاد کششی مقطع دیوار در ارتفاع واحد می باشد. ضخامت دیوار در بخش فوقانی معادل نصف ضخامت بخش تحتانی در نظر گرفته شده است. آرماتورهای عمودی دیواره مخزن برای مقادیر ۰/۰۰۳ سطح مقطع بخش تحتانی دیوار محاسبه و برای کل ارتفاع دیوار لحاظ می گردد. آرماتورهای عرضی دیوار از مقادیر تنش های کششی در پای دیوار محاسبه و برای کل ارتفاع دیوار همان مقادیر به عنوان آرماتورهای عرضی لحاظ می گردد.

۲-۴- قید تنش های تیر حلقوی تحتانی

بارهای عمودی وارد بر تیر حلقوی تحتانی تحت عنوان V_1 شامل موارد زیر می شوند.



شکل ۷- نیروهای اعمالی بر تیر گنبد تحتانی

اختلاف مؤلفه افقی نیروهای فوق از رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود اگر مقادیر حاصل مثبت باشد تیر فوق تحت فشار محوری و اگر مقادیر منفی داشته باشد تحت نیروی کششی محوری قرار می‌گیرد. در این بخش با توجه به اینکه کدام تنش فشاری یا کششی برای تیر حاکم شود محدودیت تنش تعریف می‌گردد.

$$F = T_1 \cos(\alpha) - T_2 \cos(\beta) \quad (38)$$

تنش رانش نصف النهاری یا محیطی:

$$f_{tt} \leq \sigma_{ci} \rightarrow g(x) = \frac{f_{tt}}{\sigma_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (39)$$

$$\sigma_{ci} = 5Mpa$$

تنش کششی محیطی:

$$f_{td} \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{f_{td}}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (40)$$

$$\sigma_{ti} = 1.2Mpa$$

ابعاد تیر گنبد تحتانی برای تنش‌های ناشی از روابط فوق کنترل می‌شود. اثرات ناشی از اتصال مخزن به پایه‌های آن، سطح مقطع فولاد متناظر لحاظ نگردیده است. به دلیل عدم محاسبات وزن میلگردهای عرضی تیرها و تیر تحتانی گنبد پایین و اعمال هزینه پرت مصالح فولادی، در مجموع مقادیر فولاد محاسبه شده به اندازه ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

۸- مثال عددی

۸-۱- مثال ۱

یک مخزن هوایی اینتر با ظرفیت ۱۰۰۰ متر مکعب و تنش‌های مجاز کششی بتن برابر ۱/۲ مگا پاسگال و تنش‌های مجاز فشاری ۵ مگا پاسگال طراحی می‌گردد [22]. متغیرهای طرح مطابق جدول ۸ و سقف گنبدی تحت بار زنده ۱/۶ کیلونیوتن بر متر مربع قرار دارد. وزن مخصوص بتن جهت محاسبات عناصر برابر ۲۴ کیلونیوتن بر متر مکعب لحاظ می‌گردد. تنش مجاز کششی فولاد برابر ۱۵۰ مگا

تنش نصف النهاری بصورت فشاری بوده و می‌بایست برای تنش‌های فشاری مجاز کنترل گردد. همچنین نیروی حلقوی گنبد مخروطی با توجه به شدت فشار آب روی گنبد مخروطی به عمق h اگر برابر p بوده و وزن هر متر مربع گنبد برابر q باشد مقادیر نیروی حلقوی گنبد مخروطی از رابطه زیر بدست می‌آید.

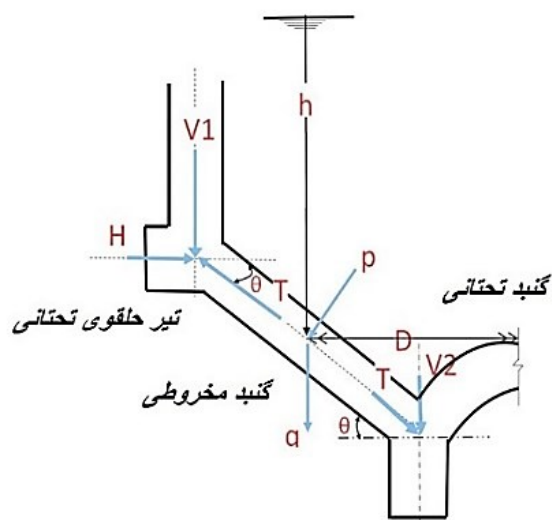
$$F_{CB} = (p \cdot \operatorname{cosec}(\theta) + q \cdot \cot(\theta)) \cdot D_1 / 2 \quad (35)$$

بر اساس نیروی حاصل از رابطه فوق، و تنش کششی مجاز، سطح مقطع فولاد لازم حاصل می‌شود.

$$f_{CB} = \frac{F_{CB}}{(A_C + m \cdot A_{St})} \quad (36)$$

$$f_{CB} \leq \sigma_{ti} \rightarrow g(x) = \frac{f_{CB}}{\sigma_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (37)$$

$$\sigma_{ti} = 1.2Mpa$$



شکل ۶- نیروهای اعمالی بر گنبد تحتانی

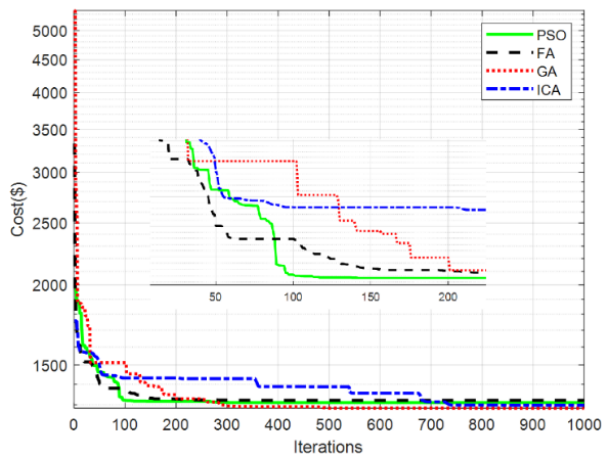
۷-۲-۷- قید تنش‌های گنبد تحتانی

محاسبات گنبد تحتانی مشابه با گنبد فوقانی و نیروهای اعمالی شامل وزن خود گنبد و وزن آب بالای گنبد می‌باشد. برای گنبد تحتانی نیز دو محدودیت کنترل تنش مشابه گنبد فوقانی اعمال می‌گردد. برای گنبد فوقانی و تحتانی و گنبد مخروطی حداقل مقادیر آرماتور ۰/۰۰۳ آرماتور کششی باید اعمال گردد.

۷-۲-۷- قید تنش‌های تیر گنبد تحتانی

تیر حلقوی متصل به گنبد پایین علاوه بر انتقال کل بارهای مرده و وزن آب به ستون‌های تحتانی می‌بایست اختلاف نیروی افقی بین گنبد تحتانی و بخش مخروطی را نیز تحمل نماید.

هزینه‌های بتن و قالب‌بندی برابر واحد و هزینه فولاد صفر لحاظ شده است. هزینه طرح اولیه با قیمت واحد برابر ۱۴۳۶ هزینه که حدود ۱۱ درصد بیشتر از طرح بهینه با الگوریتم‌ها می‌باشد. در شکل ۸ نرخ همگرایی هزینه، با الگوریتم‌های فراابتکاری در برابر تعداد تکرار نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۷۴۰ و ژنتیک در تکرار ۴۰۰ همچنین الگوریتم ازدحام ذرات در تکرار ۱۰۰ و کرم شب تاب در تکرار ۱۷۰ به پاسخ نزدیک به بهینه همگرایی پیدا می‌کنند.



شکل ۸- نرخ همگرایی هزینه، مثال ۱

الگوریتم ژنتیک از سرعت همگرایی کمتری در رسیدن به پاسخ بهینه بوده ولی نتایج دقیق تری را بدست می‌آورد. با بررسی نتایج جدول ۶ مشاهده می‌شود که عدم لحاظ هزینه فولاد در محاسبه تابع هزینه باعث افزایش مقادیر ارتفاع مخزن شده است. لازم به ذکر است دیواره جانبی مخزن از عنصر سازه‌ای با مقادیر فولاد بیشتر نسبت به سایر عناصر مخزن می‌باشد.

۸-۲- مثال ۲

در این بخش، مخزن بتنی اینتر همانند مثال ۱ ولی با هزینه‌های دلاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. هزینه ساخت مخزن برای هر مترمکعب بتن $C_C = 60 \text{ \$/m}^3$ ، هزینه میلگردهای مصرفی $C_S = 1.3 \text{ \$/kg}$ و هزینه قالب بندی $C_F = 20 \text{ \$/m}^3$ لحاظ شده است.

در شکل ۹ نرخ همگرایی هزینه ساخت مخزن اینتر، با چهار الگوریتم فرا ابتکاری در مقابل تعداد تکرار نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود الگوریتم ژنتیک با مقادیر

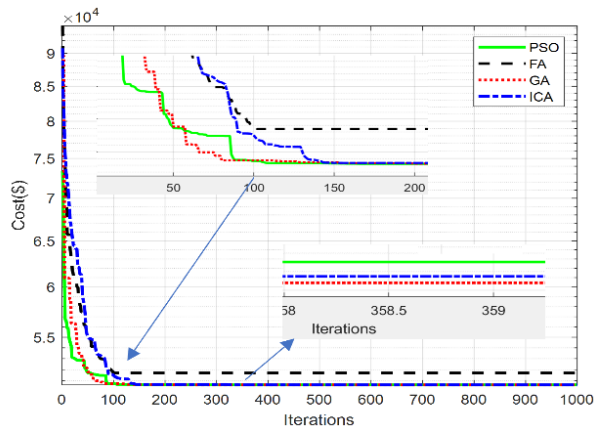
پاسگال و نسبت مدول ارتجاعی فولاد به بتن برابر ۱۳ می‌باشد. هزینه واحد کارهای میلگردهای فولادی برابر صفر و هزینه واحد عملیات بتن ریزی و قالب بندی برابر $C_C = C_F = 1$ لحاظ می‌گردد.

جدول ۶- نتایج بهینه متغیرهای هندسی، مثال ۱

متغیرها	مرجع [22]	در این پژوهش (m)			
		PSO	GA	FA	ICA
X1	۱۲	۱۲/۶	۱۰/۴	۱۱/۱	۱۱/۰
X2	۲/۰	۱/۱۵	۱/۰	۱/۰	۱/۰
X3	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
X4	۰/۳	۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۳۷
X5	۰/۳	۰/۳	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۳۷
X6	۷/۱	۵/۳۷	۸/۴	۷/۷	۷/۵
X7	۰/۴	۰/۳	۰/۳۸	۰/۳۴	۰/۳۳
X8	۱/۲	۰/۴	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۴۴
X9	۰/۶	۰/۴	۰/۹۷	۰/۷۵	۰/۴۴
X10	۲/۰	۳/۸	۳/۷	۳/۰۱	۳/۵
X11	۸/۰	۶/۶	۴/۶	۷/۷	۶/۶
X12	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴۲
X13	۱/۶	۱/۳۱	۱/۲۸	۱/۶	۱/۰۰
X14	۰/۲۲	۰/۵	۰/۴۹	۰/۲	۰/۲
X15	۰/۴	۰/۴	۰/۶۵	۰/۴	۰/۴
X16	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۰/۴	۰/۴
Best	۱۴۳۶	۱۳۱۰	۱۲۸۴	۱۳۲۰	۱۲۹۷
Mean	None	۱۴۲۲	۱۳۹۰	۱۴۳۰	۱۳۷۰
Worst	None	۱۶۴۲	۱۶۱۴	۱۵۹۶	۱۴۷۶
Std	None	۷۰/۵	۶۹	۶۸/۴	۳۹/۴
C.V	None	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳
Rank	None	۳	۱	۴	۲

در جدول ۶ نتایج حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک، کرم شب‌تاب، ازدحام ذرات و رقابت استعماری برای ۶۰ بار تکرار الگوریتم‌ها حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد بهترین پاسخ را الگوریتم ژنتیک با ۱۲۸۴ واحد هزینه و رقابت استعماری ۱۲۹۷ و ازدحام ذرات ۱۳۱۰ و کرم شب‌تاب ۱۳۲۰ واحد هزینه محاسبه نموده است. مقادیر انحراف از معیار الگوریتم رقابت استعماری برابر ۳۹/۴ واحد هزینه بوده که نسبت به سه الگوریتم دیگر بهترین پایداری در پاسخ را دارد. در نتایج جدول ۶ که قیمت واحد برای

بهینه‌سازی شکل مخازن آب هوایی اینتر با ...



شکل ۹- نرخ همگرایی هزینه، مثال ۲

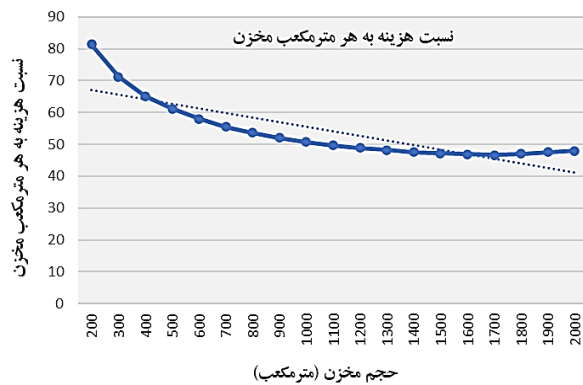
در جدول ۷ بدترین پاسخ و سرعت همگرایی متعلق به کرم شب-تاب می‌باشد. هزینه مخزن با طرح اولیه پیشنهادی بر اساس مقادیر دلاری برابر ۶۷۷۳۳ دلار شده است. بهترین پاسخ حاصل الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰۶۳۹ دلار مطابق جدول ۷ که حدود ۲۵ درصد نسبت به طرح اولیه کاهش هزینه را برآورد نموده است.

۳-۳-۱- مثال ۳

در این مثال، هزینه ساخت مخزن به ازای هر مترمکعب با محاسبه نسبت هزینه کل به حجم ذخیره مخزن مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I(x) = (V_c C_c + W_s C_s + A_f C_f) / V_t \quad (41)$$

در رابطه فوق $I(x)$ نسبت هزینه ساخت به حجم ذخیره‌سازی مخزن می‌باشد. هزینه ساخت برای هر مترمکعب از ظرفیت ذخیره سازی مخزن در محدوده‌ی ۲۰۰ الی ۲۰۰۰ مترمکعب با تابع هدف مطابق رابطه (۴۱) مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

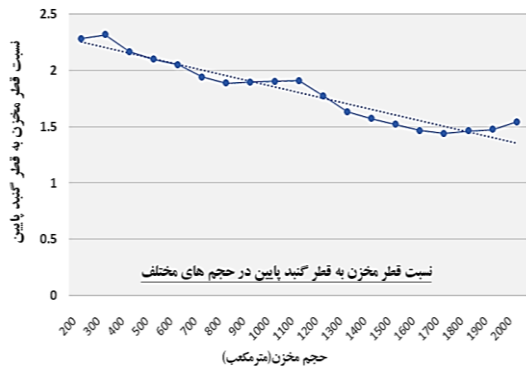


شکل ۱۰- تغییرات هزینه ساخت یک متر مکعب از مخزن اینتر برای حجم‌های مختلف در حالت بهینه

۵۰۶۳۹ دلار و الگوریتم رقابت استعماری با مقادیر ۵۰۶۴۳ دلار و الگوریتم ازدحام ذرات با ۵۰۶۴۶ دلار و کرم شب تاب با ۵۱۶۹۵ دلار به ترتیب بهترین پاسخ‌ها را به دست آورده‌اند. اختلاف بین بهترین و بدترین پاسخ بین الگوریتم‌ها در حدود ۲ درصد می‌باشد. مطابق با شکل ۹ سرعت همگرایی در تکرار ۱۰۰ و همگرا شدن به پاسخ نزدیک به بهینه به ترتیب برای الگوریتم ازدحام ذرات، ژنتیک، الگوریتم رقابت استعماری و کرم شب تاب بوده است.

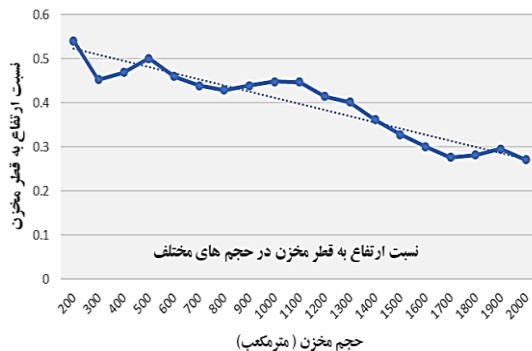
جدول ۷- متغیرها، نتایج بهینه برای مثال ۲

متغیرها	مرجع [22]	در این پژوهش (m)			
		PSO	GA	FA	ICA
X1	۱۲	۱۲/۱	۱۲/۰۶	۱۱/۸۶	۱۲/۸
X2	۲/۰	۱/۸	۱/۸	۱/۶۸	۱/۹۵
X3	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
X4	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳۲
X5	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳۰
X6	۷/۱	۵/۷	۵/۸	۶/۱۳	۴/۸
X7	۰/۴	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
X8	۱/۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵
X9	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
X10	۲/۰	۴/۰	۴/۰	۴/۰	۴
X11	۸	۶/۴	۶/۳۷	۶/۳۵	۶/۷۵
X12	۰/۶	۰/۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۴۰
X13	۱/۶	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
X14	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
X15	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
X16	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
Best (\$)	۶۷۷۳۳	۵۰۶۴۶	۵۰۶۳۹	۵۱۶۹۵	۵۰۶۴۳
Mean	None	۵۱۰۷۶	۵۰۶۹	۵۳۸۴	۵۰۸۰
Worst	None	۵۳۷۵۴	۵۰۷۶	۶۱۳۷	۵۱۲۸
Std	None	۷۱۴	۳۰	۲۱۳۸	۱۴۰
C.V	None	۰/۰۱	/۰۰۰۵	۰/۰۴	۰/۰۰۲
Rank	None	۳	۱	۴	۲



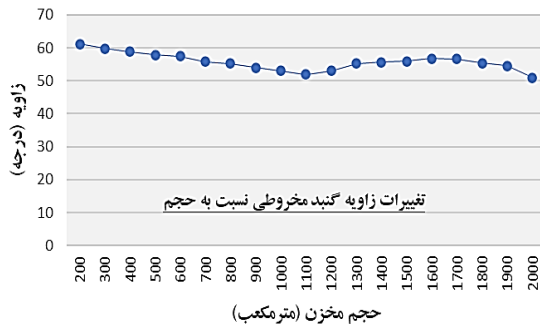
شکل ۱۱- تغییرات نسبت قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین

برای حجم های مختلف مخزن در حالت بهینه



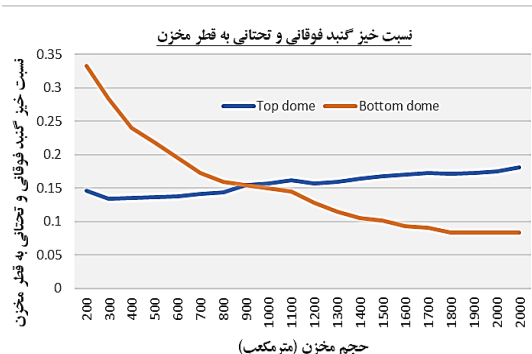
شکل ۱۲- تغییرات ارتفاع به قطر مخزن اینتر در مقابل حجم های

مختلف در حالت بهینه



شکل ۱۳- تغییرات زاویه گنبد مخروطی در مقابل حجم های

مختلف در حالت بهینه



شکل ۱۴- تغییرات نسبت خیز گنبد فوقانی به قطر مخزن در

حجم های مختلف

نتایج مطابق شکل ۱۰ نشان می دهد که هزینه واحد حجم ذخیره- سازی برای مخزن با ظرفیت ۲۰۰ مترمکعبی ۸۱/۵ دلار به ازای هر مترمکعب و مخزن ۶۰۰ مترمکعبی ۵۸ دلار، مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی ۵۱ دلار و مخزن ۲۰۰۰ مترمکعب ۴۸ دلار می باشد. مطابق شکل ۱۰ از مقادیر ۲۰۰ به ۶۰۰ مترمکعب، کاهش هزینه به میزان ۲۹ درصد و از مقادیر ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب به میزان ۱۰ درصد کاهش هزینه و از حجم ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب کاهش ۵ درصدی مشاهده می شود.

۸-۴- مثال ۴

در این مثال، نسبت های بهینه بین ابعاد و هندسه مخزن شامل نسبت قطر اصلی به قطر گنبد پایین، نسبت ارتفاع به قطر مخزن و همچنین زاویه گنبد مخروطی نسبت به افق در حجم های مختلف بررسی می شوند. بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک برای ظرفیت های حجمی مختلف مخزن با هزینه های دلاری مشابه مثال ۲ از مقادیر ۲۰۰ الی ۲۰۰۰ مترمکعب انجام می شود. الگوریتم ژنتیک به دلیل کشف بهترین پاسخ در مثال قبل جهت حل مثال ۳ انتخاب می شوند. شکل ۱۱ تغییرات احجام مختلف مخزن در نسبت قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین را نشان می دهد. برای مخازن با ظرفیت های بیش از ۶۰۰ متر مکعب، نسبت قطر اصلی به قطر گنبد پایین مخزن در شرایط بهینه از حدود ۲ به مقدار ۱/۵ با افزایش در حجم مخزن روند کاهشی داشته است. برای حجم کمتر از ۶۰۰ مترمکعب، نسبت قطر اصلی به قطر گنبد پایین در محدوده ی بیشتر از عدد ۲ قرار گرفته است.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود. نسبت ارتفاع به قطر مخزن برای مخازن با ظرفیت ۲۰۰ تا ۶۰۰ مترمکعب از مقادیر ۰/۵۵ الی ۰/۳ بصورت نزولی و از ظرفیت ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب نسبت فوق از مقادیر ۰/۳ تا ۰/۲ با شیب کمتری بصورت نزولی کاهش می یابد. مطابق با شکل ۱۳ زاویه بهینه گنبد مخروطی برای ظرفیت های مختلف از حجم مخزن در محدوده ۵۰ الی ۶۰ درجه نوسان دارد. در شکل ۱۴ نسبت تغییرات خیز گنبد های فوقانی و تحتانی به قطر هر گنبد نشان می دهد که با افزایش حجم مخزن و متناسب با آن افزایش در قطر مخزن و بارهای اعمالی، خیز گنبد فوقانی افزایش یافته است. خیز گنبد تحتانی نیز برای احجام بزرگ مخزن روند کاهشی را نشان می دهد.

محاسبه نمودند. اختلاف هزینه با الگوریتم کرم شب‌تاب با مقادیر ۲ درصد ناچیز بوده که نشان می‌دهد هر چهار الگوریتم قابلیت و کارایی قابل قبولی برای حل مثال مخزن اینتر با وجود تعداد قیدهای طراحی زیاد را دارند. با دقت در مقادیر ابعاد هندسی مخزن در مثال اول و دوم مشاهده می‌شود لحاظ نمودن تابع هدف با تعریف هزینه فولاد باعث کاهش ارتفاع مخزن نسبت به حالت بدون فولاد شده است. با افزایش ارتفاع مخزن، اثر فولاد و محاسبه آن از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود.

در مثال سوم، تابع هدف تعریف شده، شامل هزینه ساخت مخزن به ازای هر مترمکعب حجم مخزن می‌باشد. جهت محاسبه نسبت هزینه کل به حجم ذخیره مخزن، ظرفیت‌های ذخیره‌سازی مختلفی از مخزن بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مثال دوم بهترین الگوریتم از نظر عملکردی برای حل مساله بهینه‌سازی استفاده گردید. نتایج بررسی نشان می‌دهد با کاهش حجم مخزن از ظرفیت‌های ۶۰۰ الی ۲۰۰ مترمکعب، هزینه واحد حجم ذخیره‌سازی به میزان ۴۰ درصد از مقادیر ۵۸ به ۸۱/۴ دلار روند افزایشی دارد. میزان کاهش هزینه برای ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب با شیب کمتر حدود ۱۷ درصد از مقادیر ۵۸ دلار به ۴۸ دلار کاهش می‌یابد. هزینه واحد حجم ذخیره‌سازی در مخزن اینتر برای ظرفیت‌های در حدود کمتر از ۵۰۰ مترمکعب، به مراتب بیشتر از مخازن با حجم بزرگ‌تر می‌باشد. از دلایل افزایش هزینه واحد ساخت هر مترمکعب حجم مخزن ذخیره‌سازی اینتر با حجم کم، محدودیت‌های قیدهای اجرایی در ابعاد هندسی عناصر سازه ای می‌باشد که از یک حدود پایین نمی‌توان ابعاد کمتری لحاظ نمود.

از نتایج مثال چهارم، نسبت بهینه ابعاد هندسی مخزن جهت طراحی در قالب جدول ۸ برای احجام مختلف حاصل گردید. نسبت‌های فوق شامل نسبت قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین و نسبت ارتفاع به قطر مخزن و همچنین زاویه بهینه گنبد مخروطی و نسبت خیز گنبدها به قطر می‌باشد. با افزایش حجم مخزن اینتر، نسبت‌های ارتفاع به قطر مخزن و قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین روند کاهشی دارند.

۱۰- مراجع

[1] A.R Lloyd, W.S Doyle (1978), "Computer-aided design of circular liquid retaining structures in

مطابق نتایج این پژوهش، ابعاد بهینه جهت طراحی مخزن اینتر مطابق با جدول ۸ پیشنهاد می‌شود. در جدول شماره ۸، D/D_0 نسبت قطر اصلی مخزن به قطر گنبد پایین، H/D نسبت ارتفاع به قطر، ht/D_0 نسبت خیز گنبد فوقانی به قطر مخزن، ho/D_0 نسبت خیز گنبد تحتانی به قطر گنبد و α زاویه بهینه گنبد مخروطی نسبت به افق بر حسب درجه می‌باشد. در مخازن حجیم اینتر، برای نسبت خیز به قطر گنبد تحتانی مقادیر کمتری انتخاب می‌شود تا فضای مفید مخزن جهت ذخیره‌سازی افزایش و طرح بهینه‌تر شود.

جدول ۸- ابعاد بهینه پیشنهادی جهت طراحی

α	ht/D_0	ho/D	H/D	D/D_0	$V(m^3)$
۶۰	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۵	۲/۲	$V \leq 500$
۵۰	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۴۵	۲/۰	$V \leq 1200$ & $V > 500$
۵۵	۰/۱۸	۰/۱	۰/۴	۱/۶	$V > 1200$

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی مخزن بتنی اینتر توسط الگوریتم‌های ژنتیک، کرم شب‌تاب، رقابت استعماری و ازدحام ذرات در ۴ مثال از حالت‌های مختلف بهینه‌سازی مخزن مورد مطالعه قرار گرفت. در مثال اول، مخزن بتنی با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب، با لحاظ هزینه‌های قالب‌بندی و بتن به صورت واحد هزینه و بدون هزینه فولاد مورد بررسی قرار گرفت. بهترین پاسخ از الگوریتم ژنتیک و با کاهش ۱۰ درصدی هزینه ساخت نسبت به طرح اولیه محاسبه گردید. عدم لحاظ اثر فولاد در بهینه‌سازی باعث افزایش ارتفاع مخزن در طرح بهینه می‌شود. با توجه به نتایج مثال اول، لحاظ نمودن قیمت‌های واحد و یکسان برای حجم بتن، سطح قالب‌بندی و بدون اثر فولاد مقادیر ارتفاع مخزن در حالت بهینه افزایش داشته است.

مثال دوم همانند مثال اول، با تعریف تابع هدف هزینه دلاری برای حجم بتن، فولاد و قالب‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. بهترین پاسخ با الگوریتم ژنتیک حاصل شده که در این حالت، هزینه مخزن با طرح اولیه برابر ۶۷۷۳۳ دلار و هزینه حاصل از الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰۶۳۹ دلار که کاهش ۲۵ درصدی را نشان می‌دهد.

با مقایسه نتایج سایر الگوریتم‌ها مشاهده می‌شود که بجز الگوریتم کرم شب‌تاب با اختلاف هزینه نسبت به طرح مرجع حدود ۲۳ درصد سایر الگوریتم‌ها اختلاف هزینه را در حدود ۲۵ درصد

- Genetic Algorithms”, Cambridge, MA: MIT Press.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. (1995). Particle swarm optimization. In: Proceedings of IEEE international conference on, neural networks, volume (4), page (1942-1948).
- [16] R E Perez, K Behdinan.(2007). Particle swarm approach for structural optimization[J]. Computers and Structures volume (85), page (1579-1588).
- [17] Yang XS. (2010). Firefly algorithm, Lévy flights and global optimization, In: M. Bramer et al. editors. Research and Development in Intelligent Systems XXVI. Springer-Verlag London, page (209-218).
- [18] Watanabe O, Zeugmann T, editors. (2009). Stochastic algorithms: foundations and applications, SAGA Lecture notes in computer science, volume (5792), page (78-169).
- [19] Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C.: Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Singapore. (2007).
- [20] Homaifar, A., Lai, S.H.Y. and Qi, X. Constrained optimization via genetic algorithms, Simulation, 62, 242-254, 1994.
- [21] Coello, C.A.C. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191, 1245-1287, 2002.
- [22] Raju, N. K., "Design of Reinforced Concrete Structures", New Delhi, 3rd Edition, 2004.
- accordance with BS5337”, Advances in Engineering Software, Vol. 3, No. 1, Jan 1981, pp. 35-41.
- [2] Ziari. A, & Reza Kianoush M. (2009). Investigation of flexural cracking and leakage in RC liquid containing structures. Engineering Structures, 31(5), 1056-1067.
- [3] Cohn, M.Z. Limit design of reinforced concrete frames", Journal of Struc. Div., ASCE, 94(10), pp. 2467-2483 (1968).
- [4] Manu Saxena, S.P Sharma (1985), Use of nonlinear optimization techniques in determining the optimal design of intze tanks on shaft, Vol 9.pp. 143-154
- [5] Booz, W,Legewie, G., & Thierauf, G. (1984, September). Optimization of reinforced concrete structures according to German design regulations. In Proceedings of the International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Yugoslavia (pp. 761-773).
- [6] Tan,G.H,Thevendran, V,Guptan D,& Thambiratnam, D. P. (1993). Design of reinforced concrete cylindrical water tanks for minimum material cost. Computers & structures, 48(5), 803-810.
- [7] Tayşi, & Özakça, M. (2007). Optimization of arches using genetic algorithm. Computational Optimization and Applications, 41(3), 377-394.
- [8] Sahab, M. G., Ashour, A. F., & Toropov, V. V. (2005). Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings. Engineering Structures, 27(3), 313-322.
- [9] Samer A. Barakat, Salah Altoubat., "Application of evolutionary global optimization techniques in the design of RC water tanks", Engineering Structures 31 (2009) 332_344
- [10] A Vijay Kumar, "Design of Economical Size of OHTs by Optimizing H/D Ratio",International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER) Volume 4, Issue 7, July (2016)
- [11] Nitya Sanghvi. (2019), "Optimum design of Reinforced Concrete Intze Type Water Tank using Genetic Algorithms",International conference on “Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications, SSRN-ELSEVIER
- [12] Sivanandam, S. N. and Deepa, S, N. (2008), Introduction to Genetic Algorithms, Springer-Berlin Heidelberg NewYork, ISBN 978-3-540-73189-4.
- [13] Semenkin, & Semenkina, M. (2012). Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. In International Conference in Swarm Intelligence (pp. 414-421). Heidelberg: Springer.
- [14] M. Melanie (1999), “An Introduction to

Shape Optimization of INTZE elevated water tanks with a comparative approach Meta-Heuristic Algorithms

Houshyar Eimani Kalehsar *

Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Amir reza Esmacili aghdam

Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

This study aims to examine the optimal ratio of tank dimensions and the economic storage capacity of the INTZE tank as well as compare the efficiency and performance of four metaheuristic algorithms. To optimize the INTZE-type water tank with different volumetric capacities, four examples of INTZE tanks have been examined. Algorithms include genetic algorithm (GA), Firefly algorithm (FA), Imperial competitive algorithm (ICA), and particle swarm optimization (PSO). Objective function is the material cost of the tank which is the function of the design variables. The total material cost of the tank can be expressed as the sum of the cost of concrete, reinforcement, and cost of formwork. The design method is according to the Indian Standard IS3370 Code. Design constraints of the problem also include the stresses of the structure members and the limitations of the volume and geometric dimensions of the water tank. All constraints were satisfied and the stresses and stability constraints were in acceptable ranges. In this study, the optimal design of the INTZE tank was achieved by a 25% reduction in the cost of construction by the genetic algorithm. The INTZE-type water tank is recommended for storage volumes of more than 500 cubic meters.

Keywords: INTZE tank, Genetic algorithm, Firefly Algorithm, Particle Swarm Algorithm, Imperialist Competitive Algorithm, optimization.

* Corresponding Author: hek@uma.ac.ir

