

طراحی بهینه مخازن جدار نازک با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری*

(یادداشت پژوهشی)

علی قدوسیان^(۱)هادی اسکندر^(۲)مجتبی شیخی^(۳)

چکیده در سال‌های اخیر استانداردهای مختلفی در طراحی مسائل مهندسی از جمله مخازن تحت فشار ارائه شده است. بسیاری از این استانداردها بر اساس تجربه و آزمایش به دست آمده‌اند. امروزه اکثر تحقیقات به تحلیل عددی اجزای مختلفی از مخازن تحت فشار پرداخته و در بعضی موارد حتی استانداردهای پیشین را زیر سوال برده‌اند. این مقاله با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک از جمله الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری به طراحی بهینه مخازن تحت فشار با در نظر گرفتن تمام قیود و ضوابط مهندسی حاکم بر آن می‌پردازد. بر اساس نتایج به دست آمده، روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک می‌توانند به‌عنوان یک روش طراحی ساده، سریع و کارا برای طراحی مخازن مورد استفاده قرار گیرند. طراحی مخازن به‌کمک این روش‌ها باعث کاهش قابل توجه وزن مخازن نسبت به طراحی انجام گرفته در هندبوک می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده به‌کمک روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک، الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد و همگرایی به مراتب بهتر از دو روش دیگر ذکر شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی مخازن تحت فشار، روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک، الگوریتم رقابت استعماری.

Optimal Design of Vessels by using Imperialist Competitive Algorithm

A. Ghoddosian

H. Eskandar

M. Sheikhi

Abstract As the science of Mechanics has been improved in recent years, different standards have been created in designing structures such as pressure vessels. Most of these standards have been developed by means of experience and examination. Today, most of researches, proceed the numerical analysis of the different elements of the pressure vessels and somehow they have put some questions on the previous standards. In this paper, offering an applicable model, it is shown that heuristic optimization methods such as genetic algorithm, particle swarm optimization and especially imperialist competitive algorithm can be used as a simple and fast method for designing the vessels without breaking any of the engineering conditions and criteria. Due to the present results of this research, these methods are caused a noticeable decrease of the vessel's weight, with a high convergence speed, in a short time, compare to the design carried out in handbooks. You may observe that the Imperialist Competitive Algorithm has a better performance and convergence than the two other methods.

Key Words pressure vessels, heuristic Optimization Methods, Imperialist Competitive Algorithm

* تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۱/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۲/۱۳ می‌باشد.

(۱) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان.

(۲) دانش آموزخته کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان.

(۳) نویسنده‌ی مسئول: عضو هیأت علمی، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

طراحی مناسب و ایمن مخازن تحت فشار به علت کاربرد وسیع آن‌ها در صنایع مختلف و شرایط کاری سخت از جمله تحمل فشار و دماهای بالا، در معرض خوردگی بودن، اثرات نیروی باد، زلزله‌خیز بودن ناحیه‌ی فرارگیری مخزن و ... مورد توجه محققان بوده است. علاوه بر این مخازن تحت فشار انرژی زیادی را در خود نگه می‌دارند، آزاد شدن این انرژی در یک لحظه بر اثر استفاده از روش‌های طراحی ضعیف که قادر به در نظر گرفتن تمام معیارهای طراحی مخازن نباشد و یا عدم نگهداری صحیح و کاربرد نادرست آن‌ها، تلفات جبران‌ناپذیری را به وجود می‌آورد [1]. به همین دلیل باید در طراحی این مخازن از روش‌های مطمئن و کارا بهره برد.

هدف این مقاله طراحی یک مخزن جدار نازک با در نظر گرفتن یک فشار داخلی تحت تأثیر نیروی باد می‌باشد. معمولاً مخازن تحت فشار مورد استفاده در صنعت متقارن محوری هستند و از ترکیب اجزائی با شکل‌ها و ضخامت‌های مختلف ساخته می‌شوند. اعمال نیروی باد به مخزن آن را از حالت تقارن محوری خارج می‌کند. نیروی باد باعث ایجاد یک ممان خمشی روی مخزن می‌شود. تحت تأثیر این ممان خمشی، یک تنش طولی و یک خیز (تغییر فرم) روی مخزن ایجاد می‌گردد. کنترل و کاهش خیز و تنش ناشی از بارهای اعمالی از نکات مهم در طراحی مخازن تحت فشار می‌باشد [2]. برای کاهش خیز و تنش‌های ایجاد شده در مخزن لازم است تا ضخامت و ارتفاع هر پوسته و ضخامت پایه‌ی مخزن تغییر کند.

تاکنون محققان برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای مهم در مخزن از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی از قبیل الگوریتم ژنتیک [3]، الگوریتم بازپخت فلزات [4] (Simulated Annealing) و دیگر روش‌های جستجوی تصادفی استفاده کرده‌اند. در این مقاله علاوه بر بهره‌گیری از روش‌های الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات

(Particle Swarm Optimization)، از روش رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) که روشی جدید و قدرتمند است و الهام گرفته از یک پدیده‌ی اجتماعی - انسانی است، استفاده می‌گردد. در ادامه پس از تشریح مبانی تئوری روش رقابت استعماری و گروه ذرات و کاربرد آن‌ها در طراحی مخازن تحت فشار، نتایج حاصل با نتایج موجود در هندبوک مقایسه می‌شود. بر اساس مقایسه‌ی صورت گرفته، این سه روش، به ویژه روش رقابت استعماری طی زمان مناسب قادر است علاوه بر ارضا قیود طراحی، مقدار وزن مخزن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

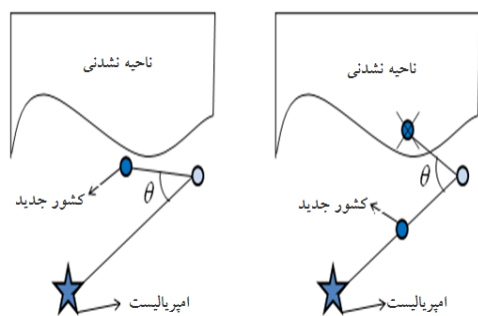
الگوریتم رقابت استعماری برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط اسماعیل آتشیپز و همکارانش [5] به کار گرفته شد. به طور ویژه این الگوریتم به فرآیند استعمار، به عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی - سیاسی بشر می‌نگرد و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده‌ی تاریخی، از آن به عنوان منشأ الهام یک الگوریتم قدرتمند در زمینه‌ی بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. نو بودن ایده‌ی پایه‌ای الگوریتم، توانایی بالای یافتن نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری مسائل در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سرعت همگرایی بالا از جمله ویژگی‌های این الگوریتم می‌باشد.

این الگوریتم نیز نظیر سایر روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در این الگوریتم هر عنصر جمعیت یک کشور (معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک) نامیده می‌شود. کشورها نیز در آن به دو دسته کشورهای مستعمره و کشورهای امپریالیست تقسیم می‌شوند. هر کشور امپریالیست، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه‌ی خود در می‌آورد و در مجموع یک امپراطوری را تشکیل می‌دهند. مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم به طور کامل در مراجع [6,7] تشریح شده است.

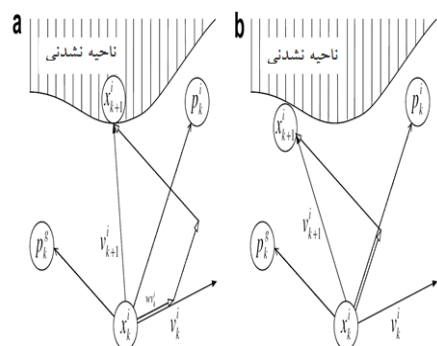
روش الگوریتم گروه ذرات

می شود، باید علاوه بر داشتن قدرت بیش تر، قیود اعمالی به مسأله را ارضا نماید.
- اگر در حرکت کشور مستعمره به سمت کشور امپریالیست، انحراف باعث نقض قیود شود، از منحرف شدن کشور مستعمره جلوگیری می شود و فقط حرکت مستقیم در جهت کشور امپریالیست انجام می شود (شکل (۱)).

در روش الگوریتم گروه ذرات، برای اعمال قیود می توان بدین ترتیب عمل نمود.
- در صورتی که حرکت جدید ذره باعث نقض شدن قیود گردد، از حرکت آن در راستای بردار سرعت قبلی جلوگیری می شود و ذره سرعتش را بر اساس تجربه‌ی شخصی و به‌ترین تجربه‌ی گروهی تغییر می دهد (شکل (۲)).



شکل ۱ شمای کلی چگونگی اعمال قیود در الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۲ شمای کلی چگونگی اعمال قیود در الگوریتم گروه ذرات

الگوریتم گروه ذرات توسط ابره‌ارت و کندی در سال ۱۹۹۵ ابداع شده است [8]. در این الگوریتم پس از تولید جمعیت اولیه و در نظر گرفتن یک سرعت اولیه برای هر یک از آن‌ها، کارایی هر ذره براساس موقعیتش مورد محاسبه قرار می گیرد. هر ذره سرعتش را براساس به‌ترین پاسخ به دست آمده در گروه ذرات (تجربه‌ی گروهی) و به‌ترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته (تجربه‌ی شخصی) تغییر می دهد. این سرعت با موقعیت ذره جمع می شود و موقعیت جدید آن را به دست می دهد [9]. سرعت ذرات در هر مرحله با توجه به رابطه‌ی (۱) محاسبه می شود.

$$v_{k+1}^i = w v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - x_k^i) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^i) \quad (1)$$

در این رابطه r_1 و r_2 دو عدد تصادفی در بازه‌ی [۰ و ۱] می باشند. p_k^i و p_k^g به ترتیب، به‌ترین موقعیتی که تاکنون ذره در آن قرار گرفته و به‌ترین موقعیت به دست آمده تا این مرحله هستند. ضرایب c_1 و c_2 ، فاکتور یادگیری اند و مجموع آن‌ها باید کم تر از ۴ باشد [۷]. w ضریب اینرسی وزنی (ضریب بی عقلی) نامیده می شود. ضریب اینرسی بزرگ تر، گسترش بیش تر در فضا بدون توجه به تجربه‌ی شخصی و تجربه‌ی گروهی را موجب می شود. با این اوصاف ضریب اینرسی کوچک تر، جمع شدن و حرکت در محدوده‌ی اطراف موقعیت فعلی را باعث می شود.

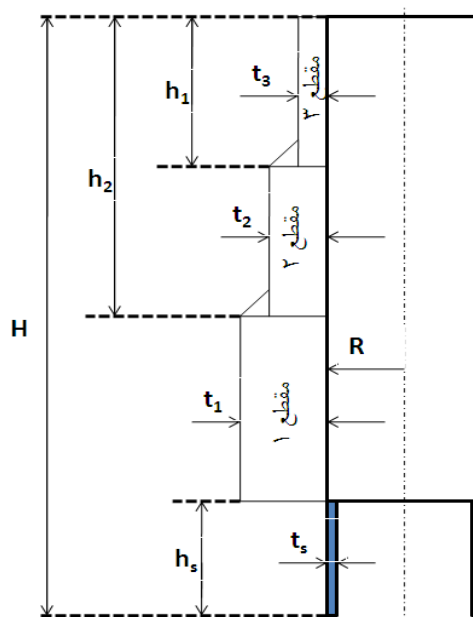
اعمال قیود

در زیر دو روش برای اعمال قیود در الگوریتم‌های رقابت استعماری و گروه ذرات پیشنهاد می گردد.
- در روش رقابت استعماری باید اصلاحات زیر در الگوریتم اعمال گردد.
- کشوری که به‌عنوان کشور امپریالیست در نظر گرفته

پارامترهای مهم در طراحی بهینه مخازن

یک مدل ریاضی در انجام فرآیند بهینه‌سازی دارای سه بخش کلی متغیر طراحی، تابع هدف و قیود مسأله است که در این جا به صورت مجزا به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

متغیر طراحی. مقادیر مجهولی که باید به گونه‌ای حاصل شوند که به ازای آن‌ها تابع هدف بهینه شود. این متغیرها در مسأله‌ی مورد نظر عبارتند از: ضخامت و ارتفاع هر پوسته از بالای مخزن. متغیرهای مذکور به همراه سایر مشخصات مخزن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ مشخصات مخزن

در رابطه‌ی فوق D_1 حداکثر ضخامت عایق در مخزن می‌باشد.

هم‌چنین کرانه‌های پایین و بالا برای ارتفاع هر پوسته از بالای مخزن نیز از رابطه‌ی (۵ و ۴) پیروی می‌کند.

$$h_{low} < h_i < h_{up} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} h_{low} = 0 \\ h_{up} = H - h_s \end{cases} \quad (5)$$

تابع هدف. هدف از بهینه‌سازی مخزن تحت فشار، کاهش وزن مخزن از طریق بهبود در ضخامت و ارتفاع هر یک از ورق‌های مورد استفاده در مخزن می‌باشد. در رابطه‌ی (۶) مقدار وزن مخزن ارائه شده است.

$$W = \left[\sum_{i=1}^3 W_{si} + \sum_{i=1}^3 W_{INI} \right] + W_{SK} + W_g + W_{Other} \quad (6)$$

در مخازن ۶ درصد وزن محاسبه شده به‌خاطر در نظر گرفتن وزن جوش‌های زده شده و تقریبی بودن وزن‌های مورد استفاده به معادله‌ی فوق اضافه می‌گردد [10] (اضافه شدن وزن جوش‌ها در فرآیند بهینه‌سازی تأثیری ندارد و صرفاً باعث محاسبه‌ی دقیق‌تر وزن مخزن می‌شود). بنابراین تابع هدف به کار رفته در مسأله به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$W \rightarrow 1.06W \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۶)، پارامترهای W_{SK} ، W_{INI} ، W_{si} به ترتیب وزن هر کدام از پوسته‌ها، عایق‌ها و پایه‌ی مخزن می‌باشد. چگونگی محاسبه‌ی این پارامترها در روابط (۸-۱۰) آورده شده است.

$$W_{si} = \pi \rho_s h_i \left[(R + t_i)^2 - R^2 \right], i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

کران پایین و بالا برای ضخامت هر پوسته از رابطه‌ی (۲ و ۳) تبعیت می‌کند.

$$t_{low} < t_i < t_{up} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\begin{cases} t_{low} = 0 \\ t_{up} = (D_1 / 2) - R \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه، S تنش مجاز طراحی و EE ضریب اتصال است و بقیه‌ی پارامترهای رابطه‌ی (۱۱) به صورت روابط (۱۲-۱۵) محاسبه می‌گردند. در این روابط M و R_m به ترتیب ماکزیمم ممان خمشی در هر مقطع از مخزن و شعاع متوسط هر یک از ورق‌های مورد استفاده در مخزن می‌باشند.

$$S_{wind}^i = \frac{M_i}{R_{mi}^2 \times \pi \times t_i} \quad (12)$$

$$S_L^i = \frac{P \times R_{mi}}{2t_i} \quad (13)$$

$$S_{weight}^i = \frac{W_i}{2\pi \times R_{mi} \times t_i} \quad (14)$$

$$S_{\theta}^i = \frac{P \times R_{mi}}{t_i} \quad (15)$$

ممان در مقطعی به فاصله‌ی x از بالای مخزن (شکل ۴) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$M = M_w + M_{La} + M_{PL} \quad (16)$$

پارامترهای ارائه شده در رابطه‌ی (۱۶) به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$M_w = p_w D_1 X \left(\frac{X}{2}\right) \quad (17)$$

$$M_{La} = p_w A_{La} X_{La} \left(\frac{X_{La}}{2}\right) \quad (18)$$

$$M_{PL} = p_w A_{PL} X_{PL} \quad (19)$$

باید توجه داشت که مقدار ممان خمشی بحرانی در نقاطی که سطح مقطع مخزن تغییر پیدا می‌کند اعمال می‌گردد.

- قیود مربوط به خیز: چنانچه مطابق استاندارد، مخزن به صورت تیر یک سرگیردار فرض شود، ماکزیمم تغییر فرم مخزن در اثر نیروی باد در بالای آن ایجاد می‌شود. تغییر فرم انتهای تیر یک سرگیردار از رابطه‌ی (۲۰)

$$W_{INi} = \pi \rho_{IN} h_i \left[\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - (R+t_1)^2 \right], i=1,2,3 \quad (9)$$

$$W_{SK} = \pi \rho_s h_s \left[(R+t_1)^2 - (R+t_1-t_s)^2 \right] \quad (10)$$

شایان ذکر است که سایر پارامترهای رابطه‌ی (۶) به عنوان ورودی مسأله در نظر گرفته شده و مقادیر آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی

واحد	مقدار متغیر	متغیرهای ورودی
in (m)	۱۲۰۰ (۳۰/۴۸)	H
in (m)	۱۱۵۲ (۲۶/۲۶)	H _{La}
in (m)	۱۱۷۸ (۲۹/۸۷)	H _{PL}
in (m)	۴۸ (۱/۲۲)	h _s
in (m)	۴۲ (۱/۰.۶۷)	D ₁
in (m)	۱۸ (۰/۴۶)	R
lb/in ³	۰/۲۸۳۳	ρ _s
lb/in ³	۰/۰۰۷۲	ρ _{IN}
lb (kN)	۹۰۴۳ (۴۰/۲۳)	W _{Other}
lb (kN)	۳۰۰۰ (۱۳/۳۴)	W _g
Psi (kPa)	۰/۲۰۸ (۱/۴۴)	P _w
Psi (kPa)	۱۵۰ (۱۰۳۴/۲۱)	P
-	۰/۸۵	EE
in ² /in (m ² /m)	۱۲ (۰/۳۰)	A _{La}
in ² (m ²)	۱۱۵۲ (۰/۷۴)	A _{PL}

قیود مسأله. از آنجا که تحقیق حاضر در زمینه‌ی مخازن تحت فشار می‌باشد، قیود مربوط را می‌توان بر اساس استانداردهای موجود به دو دسته قیود مربوط به تنش و قیود مربوط به خیز تقسیم کرد. - قیود مربوط به تنش از روابط (۱۱) تبعیت می‌کند [10].

$$\begin{cases} |S_{wind}^i + S_L^i - S_{weight}^i| \leq S.EE \\ |S_{\theta}^i| \leq S.EE \\ |S_{wind}^i + S_{weight}^i - S_L^i| \leq S.EE \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (11)$$

$$\Delta_M \leq \frac{6}{100 \times 12} H \quad (23)$$

به دست می‌آید [10].

ارائه مثال

مثال اول از مرجع [10] انتخاب شده است، در این مثال یک مخزن عمودی، از فولاد SA-285C در دمای کاری $200^\circ F$ که دارای تنش مجاز طراحی 157000 Psi و مدول الاستیسیته $30 \times 10^6 \text{ Psi}$ می‌باشد، تحت فشار داخلی و نیروی باد قرار گرفته است. این مقاله با استفاده از سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری به کمینه کردن وزن این مخزن می‌پردازد.

در تمام سه الگوریتم ذکر شده اندازه‌ی جمعیت اولیه برابر ۵۰ انتخاب شده است. در الگوریتم رقابت استعماری ضرایب β ، γ ، ξ و تعداد کشورها امپریالیست به ترتیب برابر ۲، $\pi/4$ ، ۰/۰۵ و ۴ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم گروه ذرات ضرایب c_1 و c_2 برابر ۲ و ضریب اینرسی اولیه، ۰/۹ می‌باشند.

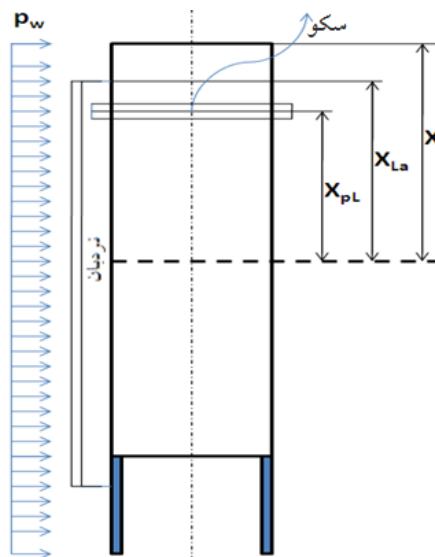
نتایج به دست آمده از ۲۵ اجرای متوالی سه روش الگوریتم رقابت استعماری، گروه ذرات و الگوریتم ژنتیک در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول (۳) مقادیر متغیرهای طراحی مسأله برای بهترین جواب‌های به دست آمده توسط روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده است.

از مقایسه‌ی نتایج موجود در جدول (۳) مشاهده می‌شود که هر سه روش باعث کاهش وزن مخزن نسبت به مرجع [10] (۳۳/۱۹ klb) شده‌اند.

جدول ۲ نتایج حاصل از ۲۵ اجرای متوالی روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده (klb)

انحراف معیار	بهترین جواب	میانگین جواب‌ها	بدترین جواب‌ها
ICA	۳۱/۴۹	۳۳/۳۸	۳۸/۷۶
GA	۳۱/۵۱	۳۳/۹۴	۳۹/۵۷
PSO	۳۱/۶۷	۳۶/۱۲	۴۱/۲۷

$$\Delta_M = \frac{FL^3}{8EI} \quad (20)$$



شکل ۴ مخزن عمودی تحت اثر نیروی باد

نیروی ناشی از اثر باد (F) برابر است با حاصل ضرب فشار باد روی مخزن در سطح تصویر شده در برابر آن. بنابراین مقدار نیروی اعمالی از طرف باد به مخزن به صورت رابطه‌ی (۲۱) می‌باشد.

$$F = p_w D_1 L \quad (21)$$

در صورتی که مخزن از چندین ورق با ارتفاع‌های مختلف ساخته شده باشد، تغییر فرم به صورت رابطه‌ی (۲۲) محاسبه می‌شود [1].

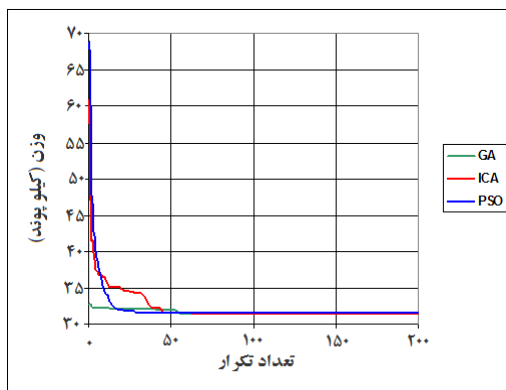
$$\Delta_M = \frac{p_w D_1}{8E} \left[\sum \frac{h_i^4}{I_i} - \sum \frac{h_{i-1}^4}{I_{i-1}} \right], \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

لازم به ذکر است که مطابق استاندارد، حد مجاز تغییر فرم مخزن عمودی تحت فشار، ۶ اینچ به‌ازای هر ۱۰۰ فوت ارتفاع مخزن می‌باشد [10]. بنابراین قید به کار رفته در مسأله‌ی طراحی مخزن به صورت رابطه‌ی (۲۳) بیان می‌گردد.

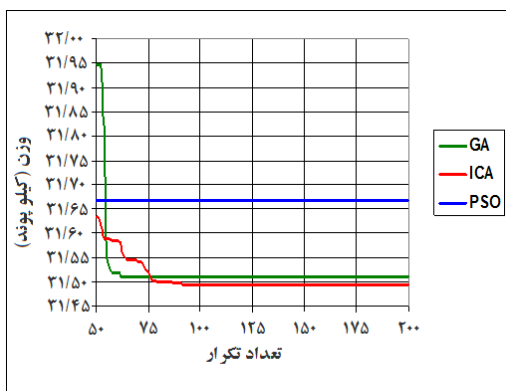
اینچ باشد (ضخامت پوسته‌ها فقط می‌تواند به صورت ضریبی از ضخامت صفحات غلطک شده باشد) و متغیرهای R و L به صورت پیوسته تغییر می‌کنند.

جدول ۳ نتایج حاصل از بهترین جواب‌های به دست آمده توسط روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده در این مطالعه و مرجع [10]

	[10]	GA	PSO	ICA
t ₁ (in)	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳
t ₂ (in)	۰/۵۰	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۴۰
t ₃ (in)	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۱
h ₂ (in)	۷۲	۶۶/۸۸	۶۶/۳۷	۷۰/۶۸
h ₁ (in)	۴۰	۴۰/۳۹	۴۲/۵۶	۴۱/۰۹
W(klb)	۳۳/۱۹	۳۱/۵۱	۳۱/۶۷	۳۱/۴۹



شکل ۵- الف مقایسه نرخ همگرایی سه روش GA, PSO و ICA



شکل ۵- ب مقایسه نرخ همگرایی سه روش GA, PSO و ICA بین تکرارهای ۵۰ تا ۲۰۰

همان‌طور که از نتایج جدول (۳) پیدا است الگوریتم رقابت استعماری باعث کاهش وزنی حدود ۵ درصد نسبت به هندبوک [10] شده است. در شکل‌های (۵-الف و ب) مقایسه‌ای بین نرخ همگرایی سه روش الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) و شکل‌های (۵-الف و ب) همگرایی روش الگوریتم رقابت استعماری به‌تر از الگوریتم‌های ژنتیک و گروه ذرات است، به طوری که با در نظر گرفتن پاسخ نهایی، از تکرار ۷۵ به بعد الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر است.

به‌عنوان مثال دیگر مشخصات یک مخزن تحت فشار استوانه‌ای که دو طرف آن به صورت نیمکره است و تاکنون در مقالات زیادی از آن به‌عنوان یک مسأله‌ی استاندارد مهندسی استفاده شده، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶). در این مسأله هدف طراحی، رسیدن به حداقل وزن کل مخزن شامل وزن ورق‌های مورد استفاده و خط جوش‌ها به صورت رابطه‌ی (۲۴) می‌باشد [11].

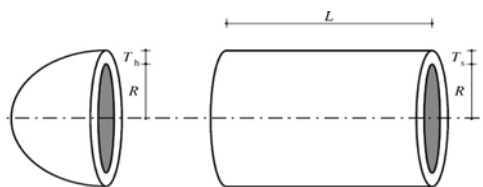
$$W = 0.6224T_s RL + 1.7781T_h R^2 + 3.1661T_s^2 L + 19.48T_s^2 R \quad (24)$$

قیود مسأله به صورت روابط (۲۵) در نظر گرفته شده است [11].

$$\begin{aligned} -T_s + 0.0193R &\leq 0 \\ -T_h + 0.00954R &\leq 0 \\ -\pi R^2 L - \frac{4}{3}\pi R^3 + 1296000 &\leq 0 \\ L - 240 &\leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

در روابط فوق T_s و T_h به ترتیب ضخامت مخزن در قسمت استوانه‌ای وسط و دو نیمکره در طرفین مخزن، شعاع داخلی و L طول قسمت استوانه‌ای مخزن بدون در نظر گرفتن دو سر مخزن می‌باشد. متغیرهای T_s و T_h باید به صورت ضرایبی از ۰/۰۶۲۵

در جدول (۴) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی مخزن شکل (۶) به‌ازای بهترین جواب به‌دست آمده با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی شاخه و کران [11]، ضرایب لاگرانژ اصلاح یافته [12]، روش جستجوی ژنتیک خود انطباقی [13]، مدل تکاملی الگوریتم ژنتیک [14]، انتخاب مسابقه‌ای امکان‌پذیر [15]، الگوریتم گروه ذرات [16]، روش تکاملی [17]، الگوریتم بهبود یافته‌ی گروه مورچه‌ها [18] و روش بهینه‌سازی رقابت استعماری این مطالعه ارائه شده است. در جدول (۵) نتایج به‌دست آمده برای ۲۵ تکرار متوالی روش رقابت استعماری و روش‌های گذشته ارائه شده است. با



شکل ۶ مخزن تحت فشار استوانه‌ای

جدول ۴ مقادیر متغیرهای طراحی برای مخزن شکل (۶)

	مقادیر بهینه پارامترهای طراحی				وزن مخزن
	Ts	T _h	R	L	
Branch and bound [11]	۱/۱۲۵۰۰۰	۰/۶۲۵۰۰۰	۴۷/۷۰۰۰۰۰	۱۰۷/۷۰۱۰۰۰	۸۱۲۹/۱۰۳۶
Augmented Lagrangian multiplier [12]	۱/۱۲۵۰۰۰	۰/۶۲۵۰۰۰	۵۸/۲۹۱۰۰۰	۴۳/۶۹۰۰۰۰	۷۱۹۸/۰۴۲۸
Genetic adaptive search [13]	۰/۹۳۷۵۰۰	۰/۵۰۰۰۰۰	۴۸/۳۲۹۰۰۰	۱۱۲/۶۷۹۰۰۰	۶۴۱۰/۳۸۱۱
GA-based co-evolution model [14]	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۰/۳۲۳۹۰۰	۲۰۰/۰۰۰۰۰۰	۶۲۸۸/۷۴۴۵
Feasibility-based tournament selection [15]	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۲/۰۹۷۳۹۸	۱۷۶/۶۵۴۰۵۰	۶۰۵۹/۹۴۶۳
Particle swarm optimization [16]	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۲/۰۹۱۲۶۶	۱۷۶/۷۴۶۵۰۰	۶۰۶۱/۰۷۷۷
Evolution strategy [17]	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۲/۰۹۸۰۸۷	۱۷۶/۶۴۰۵۱۸	۶۰۵۹/۷۴۵۶
Improved ant colony optimization [18]	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۲/۰۹۸۳۵۳	۱۷۶/۶۳۷۷۵۱	۶۰۵۹/۷۲۵۸
ICA	۰/۸۱۲۵۰۰	۰/۴۳۷۵۰۰	۴۲/۰۹۸۴۴۵	۱۷۶/۶۳۶۵۹۶	۶۰۵۹/۷۱۴۳

جدول ۵ نتایج آماری برای ۲۵ اجرای متوالی روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای مخزن شکل (۶)

	به‌ترین جواب‌ها	میانگین جواب‌ها	بدترین جواب‌ها	انحراف معیار جواب‌ها
Branch and bound [11]	۸۱۲۹/۱۰۳۶	-	-	-
Augmented lagrangian multiplier [12]	۷۱۹۸/۰۴۲۸	-	-	-
Genetic adaptive search [13]	۶۴۱۰/۳۸۱۱	-	-	-
GA-based co-evolution model [14]	۶۲۸۸/۷۴۴۵	۶۲۹۳/۸۴۳۲	۶۳۰۸/۱۴۹۷	۷/۴۱۳۳
Feasibility-based tournament selection [15]	۶۰۵۹/۹۴۶۳	۶۱۷۷/۲۵۳۳	۶۴۶۹/۳۲۲۰	۱۳۰/۹۲۹۷
Particle swarm optimization [16]	۶۰۶۱/۰۷۷۷	۶۱۴۷/۱۳۳۲	۶۳۶۳/۸۰۴۱	۸۶/۴۵۴۵
Evolution strategy [17]	۶۰۵۹/۷۴۵۶	۶۸۵۰/۰۰۴۹	۷۳۳۲/۸۷۹۸	۴۲۶/۰۰۰۰
Improved ant colony optimization [18]	۶۰۵۹/۷۲۵۸	۶۰۸۱/۷۸۱۲	۶۱۵۰/۱۲۸۹	۶۷/۲۴۱۸
ICA	۶۰۵۹/۷۱۴۳	۶۰۵۹/۸۱۴۹	۶۰۶۰/۸۳۰۲	۰/۲۶۳۳

نتیجه گیری

در این مقاله، سعی بر آن بود تا با ارائه‌ی نمونه‌های عملی، توانایی بالای روش بهینه‌سازی رقابت استعماری در طراحی مخازن جدار نازک نشان داده شود. با توجه به حیاتی بودن طراحی بهینه و ایمن مخازن تحت فشار، روش ارائه شده در این مقاله توانست بدون نقض قیود و ضوابط مهندسی، طی زمان بسیار مناسبی به جواب بهینه همگرا شود. بر اساس نتایج ارائه شده روش رقابت استعماری می‌تواند ابزاری مناسب و کارا برای طراحی مخازن جدار نازک نسبت به روش‌های بهینه‌سازی دیگر باشد و هم‌چنین به‌تر از هندبوک‌های موجود عمل کند.

فهرست علائم

P_w	فشار ناشی از نیروی باد (Psi)
H_{La}	ارتفاع نردبان مخزن از سطح زمین (in)
H_{PL}	ارتفاع سکوی مخزن از سطح زمین (in)
A_{La}	سطح تصویر شده نردبان مخزن برای هر فوت از ارتفاع (in^2)
A_{PL}	سطح تصویر شده سکوی مخزن (in^2)
W_g	وزن سیال درون مخزن (lb)
W_g	وزن دیگر قطعات متصل به مخزن (lb)
W_{Other}	وزن دیگر قطعات متصل به مخزن (lb)
ρ_s	چگالی ورق مورد استفاده در ساخت مخزن (lb/in^3)
ρ_{IN}	چگالی عایق مورد استفاده در ساخت مخزن (lb/in^3)

مراجع

1. Moss, R., "Pressure Vessel Design Manual", Elsevier, 3th Ed., (2004).
2. Bednar, H.H., "Pressure Vessel Design Handbook", Van Nostrand Co., New York, (1989).
3. Ping, Xu., Jinyang, Z., Honggang C. and Pengfei, L., "Optimal design of high pressure hydrogen storage vessel using an adaptive genetic algorithm", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 2840-46, (2010).
4. Vasan, A. and Raju, K.S., "Comparative analysis of Simulated Annealing, Simulated Quenching and Genetic Algorithms for optimal reservoir operation", *Applied Soft Computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 274-281, (2009).
5. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C., "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", in: *IEEE congress on evolutionary computation*, Singapore, pp. 4661-7, (2007).
6. Sheikhi, M., Ghoddosian, A. and Sheikhi, M., "Optimal design of structural support position using ICA and MFEM", *The Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 50-59, (2012).
7. قدوسیان، علی، شیخی، مجتبی، «روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مهندسی»، انتشارات دانشگاه سمنان، (۱۳۹۲).
8. Eberhart, R.C. and Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory", *Proceeding of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 39-43. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, (1995).

9. Perez, R.E. and Behdinan, K., "Particle swarm approach for structural design optimization", *Computers and Structures*, Vol. 85, pp. 1579-1588, (2007).
10. Eugene, F. and Megyesy, P.B., "Pressure Vessel Handbook" 12th ED, University of Tulsa, Oklahoma, (2002).
11. Sandgren, E., "Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design". In: Proceedings of the *ASME design technology conference*, Kissimine, FL, pp. 95-105, (1988).
12. Kannan, B.K. and Kramer, S.N., "An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design", *Trans. ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 318-320, (1994).
13. Deb, K. and Gene, A.S. "A robust optimal design technique for mechanical component design", In: Dasgupta D., Michalewicz Z. (eds.) *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications*, Springer, Berlin, pp. 497-514, (1997).
14. Coello, C.A.C., "Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems", *Computers in Industry*, Vol. 41, No. 2, pp. 113-127, (2000).
15. Coello, C.A.C. and Montes, E.M., "Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 16, pp. 193-203, (2002).
16. He, Q. and Wang, L., "An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 89-99, (2007).
17. Montes, E.M. and Coello, C.A.C., "An empirical study about the usefulness of evolution strategies to solve constrained optimization problems", *International Journal of General Systems*, Vol. 37, No. 4, pp. 443-473, (2008).
18. Kaveh, A. and Talatahari, S., "An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems", *Engineering Computations*, Vol. 27, No. 1, pp. 155-182, (2010).