

## طراحی شکل بهینه کول قنات با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم جامعه پرندگان

احسان فلاحی<sup>1</sup>، ابوالفضل اکبرپور<sup>2\*</sup>، محسن خطیبی نیا<sup>3</sup>، حسین ابراهیمی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1394/2/6 تاریخ پذیرش: 1394/7/15

## چکیده

کاریزها یا قنات‌ها سازه‌های آبی اختراع ایرانیان هستند که توسط آن‌ها آب‌های زیرزمینی استحصال شده با نیروی ثقل و از زیرزمین و دور از تخییر منتقل می‌گردد. ساختمان کاریزهای ایجاد شده در ایران از حالت دایره به بائر تغییر وضعیت داده و برای جلوگیری از تخریب ساختمان کاریز از سازه‌های مقاوم یا کول استفاده گردید. هدف اصلی از این مطالعه، طراحی شکل بهینه کول قنات با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم جامعه پرندگان می‌باشد. برای این منظور، ابتدا مدل‌سازی سه بعدی کول و اجزای اطراف آن در نرم‌افزار ANSYS انجام شد و سپس شکل بهینه کول با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم جامعه پرندگان و الحاق آن به نرم‌افزار ANSYS به دست آورده شد. وزن کول به عنوان تابع هدف مساله بهینه‌سازی و متغیرهای طراحی شامل پارامترهای هندسی کول در نظر گرفته شد. همچنین تنش در بدنه کول (تنش‌های فشاری و کششی بتن) به عنوان محدودیت لحاظ گردید. نتایج بهینه‌سازی بیانگر کارایی بالای الگوریتم جامعه پرندگان در طراحی شکل کول بود به طوری که وزن بهینه کول در مقایسه با کول موجود کاهش قابل توجهی داشته است.

واژه‌های کلیدی: اجزای محدود، الگوریتم جامعه پرندگان قنات، شکل بهینه، کول

## مقدمه

لایه و هم‌جواری آن باهم، چسبندگی، رطوبت، آب می‌باشد که اساساً جابه‌جایی در درون یا بر روی پوسته خاک و یا کم و زیاد شدن آب و رطوبت اثرات مثبت یا منفی بر ساختار فیزیکی و شیمیایی حوزه عملیات خاکی به جا می‌گذارد.

شکل قنات به علت پراکندگی آن‌ها در کشور و عبورشان از مناطقی با آب، هوا و زمین و خاک متغیر، دارای شرایط متفاوتی است و به همین علت درجه آسیب‌پذیری آن‌ها متفاوت می‌باشد. اجرای قنات با جابه‌جایی خاک در درون زمین آب را به‌طور مستمر جریان می‌دهد، که در صورت ریزش خاک در قنات، انسداد مسیر آب حتمی است. از اینرو، مکتبی با استفاده از مواد، مصالح و سازه‌های خاص از ریزش خاک جلوگیری می‌کند تا این شریان حیات‌بخش استمرار و تداوم یابد. قالب‌های چوبی مربع از جمله مصالحی می‌باشند که برای جلوگیری از ریزش خاک استفاده می‌شود. اما به علت پوسیدگی سریع قالب‌های چوبی و کاهش مقاومت آن‌ها با گذشت زمان، بهتر است از سازه‌های مقاوم‌تر استفاده شود. بدین منظور، کول‌ها به عنوان یک سازه مقاوم و پایدار استفاده می‌شود. انتخاب نوع کول به مواد، مصالح و تکنیک بوم‌آور، نحوه اتصال، تعداد قطعات مورد نیاز، منطقه و محل به کارگیری و شیوه اجرا دارد. جنس کول از مصالح سفالی، آهنی، چوبی، سنگی و بتنی می‌باشد که امروزه کول‌های بتنی به عنوان بهترین سازه مقاوم و پایدار در ساختمان قنات استفاده می‌شود.

کول‌های بتن مسلح به اشکال تخم‌مرغی، بیضوی و دایره‌ای ساخته می‌شوند.

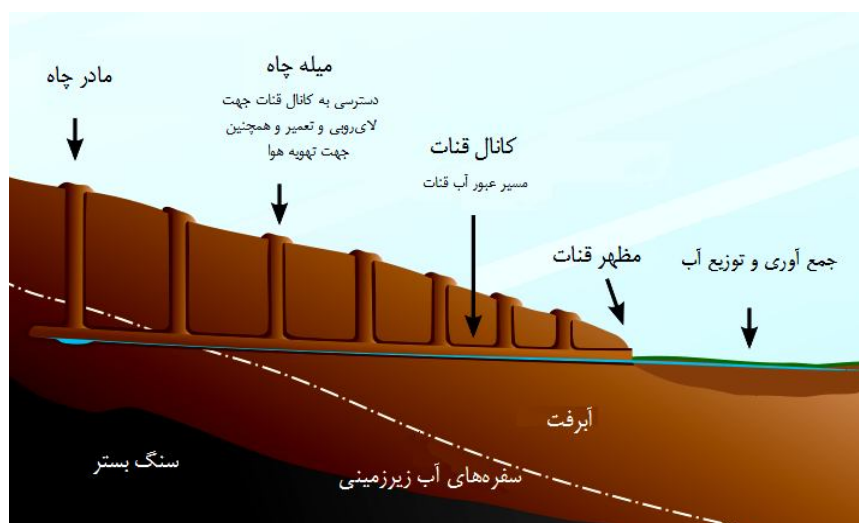
قنات یکی از شگفت‌انگیزترین تأسیسات آبی ساکن و پنهان موجود زیرزمینی در تاریخ بشری می‌باشد که به عنوان یک کانال زیرزمینی حفر شده توسط انسان، جهت جمع‌آوری آب شیرین و انتقال و مدیریت آن به سطح زمین برای مصارف کشاورزی، انسانی و دامی ایجاد شده است. در ایران، از قنات بیش‌تر جهت انتقال آب جاری در مناطق نیمه بیابانی و خشک استفاده می‌شود. آب موجود در لایه (لایه‌های) آبدار مناطق مرتفع زمین یا رودخانه‌ها و برکه‌ها را به کمک نیروی ثقل و بدون کاربرد نیروی کشش و هیچ نوع انرژی الکتریکی یا حرارتی با جریان طبیعی جمع‌آوری و منتقل می‌شود و به نقاط پست‌تر می‌رساند. قنات تأسیسات پیچیده‌ای هستند که عناصر آن‌ها شامل تأسیسات بیرون خاک (هرنج، استخر، نهرها و مقسم‌ها) و تأسیسات درون خاک (مادر چاه، تران، تره‌کاره، خشکه کار و میله) می‌باشد (شکل 1). بخشی از عملیات فنی در قنات، آب و خاکی است که تحت تأثیر عوامل مؤثر بر ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک است. این عوامل شامل دانه‌بندی مواد و مصالح تشکیل‌دهنده خاک، دانه‌بندی خاک، درصد تراکم، لایه‌بندی، ارتفاع لایه، نحوه استقرار

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فردوس

2 و 3- دانشیار و استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

4- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس تهران

\* - نویسنده مسئول: (Email: Akbarpour@birjand.ac.ir)



شکل 1- اجزای تشکیل دهنده قنات

شکل تخم مرغی مانند بوده است به طوری که براساس تجربیات گذشته‌گان و علم معماری قنات نشان داده است که این شکل، پایداری و استحکام مناسب در برابر تخریب ساختمان قنات در دراز مدت را دارا می‌باشد. پایداری و استحکام کول و هم‌چنین وزن آن تابعی از ابعاد هندسی آن می‌باشد به طوری که می‌توان با یافتن بهترین ابعاد هندسی آن، علاوه بر استحکام و مقاومت لازم، کم‌ترین وزن را داشته باشد که کاهش وزن باعث کاهش هزینه مصرفی مصالح به کار رفته در ساخت کول شده و بنابراین هزینه اجرایی قنات به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از اینرو، طراحی شکل بهینه کول بتنی در کوره قنات با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و الگوریتم جامعه پرندگان هدف اصلی این مطالعه می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مدل‌سازی سه بعدی کول و اجزای پیرامون آن در کوره قنات با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود (ANSYS 2006) انجام خواهد شد و سپس با الحاق این نرم‌افزار به روش بهینه‌سازی الگوریتم جامعه پرندگان، شکل بهینه کول به‌دست آورده خواهد شد. وزن کول به عنوان تابع هدف مساله بهینه‌سازی و متغیرهای طراحی شامل پارامترهای هندسی کول در نظر گرفته خواهند شد. هم‌چنین تنش-های فشاری و کششی بتن به عنوان محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی لحاظ خواهند گردید.

## مواد و روش‌ها

### مسئله بهینه‌سازی شکل کول

هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین جواب در خروجی از یک تابع یا فرآیند، به وسیله تغییر ورودی‌های یک سیستم می‌باشد. واژه «بهترین» بیان می‌دارد که بیش از یک جواب و راه حل برای مسئله

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در مورد قنات انجام شده است. صدر و سلامی (1368)، تحقیقی با عنوان نقش سرمایه‌گذاری و لایروبی در کاهش تلفات آبدهی و حفاظت قنات استان‌های فارس ارائه نمودند. در این تحقیق، به منظور بررسی افزایش کارایی آبدهی قنات‌های استان فارس دو عامل کول‌کاری و لایروبی در 100 رشته از قنات مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نه تنها دو عامل یاد شده اثر مثبت و تأثیرگذاری بر آبدهی قنات دارد، بلکه کول-کاری حداقل 12 برابر لایروبی بازدهی دارد. ایزدی و ناظم‌السادات (1388) با مطالعه ویژگی فیزیکی آبدهی و بررسی امکان ذخیره‌سازی آب قنات کتک ارسنجان، نشان دادند که قنات کتک یکی از منابع تأمین آب مورد نیاز کشاورزان شهر ارسنجان می‌باشد. در این مطالعه ویژگی‌های مربوط به آبدهی، شیب بستر، شیب سطح آب و طول بخش‌های تره‌کار و خشکه‌کاری به‌طور میدانی پایش شد و امکان ذخیره‌سازی آب در طول فصل‌های غیر رویشی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده، بیانگر آن بودند که با توجه به روش رایج شده در این مطالعه، قنات کتک با آبدهی نزدیک به 15 لیتر در ثانیه و شیب بستر 0/0013 قابلیت ذخیره‌ی آب در فصل‌های غیر رویشی را دارد. مغربی (1389) اثرات گل‌آلوده‌سازی آب قنات بلده فردوس در انتقال به باغات و زمینه‌های کشاورزی بررسی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که برای جلوگیری از تلفات آب از قبیل نشست و تبخیر آب داخل کانال در گذشته و تاکنون از این روش استفاده شود. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در شکل کوره قنات، شکل کول می‌باشد و شکل کول باید به گونه‌ای باشد که بتواند پایداری و استحکام لازم را در برابر بارها و نیروهای وارده بر قنات را داشته باشد. از دیرباز یکی از بهترین اشکال به‌دست آمده در ساخت کول‌ها،

پارامترهای ابعاد هندسی کول تخم مرغی شکل می باشد. این متغیرها در شکل 2 نشان داده شده است. بنابراین بردار متغیرهای طراحی شکل کول به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{X}^T = \{h_c, b_c, t_c, w_c\} \quad (2)$$

که در آن،  $h_c$  ارتفاع کول،  $b_c$  عرض کول،  $t_c$  ضخامت جداره کول و  $w_c$  عمق کول می باشد.

تابع هدف در مسئله بهینه سازی شکل کول، وزن بتن مورد نیاز در ساخت کول می باشد که به صورت زیر تعیین می شود:

$$f(\mathbf{X}) = W = \rho g V(\mathbf{X}) \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $W$  وزن کول،  $\rho$  چگالی بتن،  $g$  شتاب ثقل زمین و  $V$  حجم کول می باشد.

تنش های به وجود آمده در سازه کول بایستی در محدوده مجاز تنش مصالح جنس کول باشد و طراحی به گونه ای صورت پذیرد که ضمن آنکه در هیچ نقطه از کول، تنش های فشاری و کششی بتن از حد مجاز بیش تر نگردد، بتوان حتی الامکان از تمام مقاومت کول استفاده نمود. در این تحقیق، قید تنش در تمامی نقاط کول به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\sigma_t \leq \bar{\sigma}_t \quad (4)$$

$$\sigma_c \leq \bar{\sigma}_c \quad (5)$$

که در روابط فوق،  $\sigma_t$  و  $\sigma_c$  تنش های کششی و فشاری در نقاط کول می باشد که براساس شرایط بارگذاری موجود کول و آنالیز اجزای محدود کول تعیین می شود.  $\bar{\sigma}_t$  و  $\bar{\sigma}_c$  تنش های مجاز کششی و فشاری بتن معمولی می باشد. در این مطالعه، بتن با چگالی 2400 کیلوگرم بر مترمکعب و تنش فشاری بتن معادل 23 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

وجود دارد که یافتن بهترین جواب (جواب بهینه) بستگی به مسئله در دسترس، روش حل و خطای مجاز دارد. مسئله بهینه سازی شکل کول، یک فرایند حل برای یافتن بهترین ابعاد هندسی کول با هدف کاهش وزن کول می باشد. همچنین در این فرایند حل باید تنش های فشاری و کششی بتن در بدنه کول از مقادیر تنش های مجاز فشاری و کششی بتن تجاوز نکند تا استحکام و پایداری لازم در برابر بارهای وارده را داشته باشد. از اینرو، مسئله بهینه سازی شکل کول به صورت زیر فرمول بندی شده است:

$$\text{Find : } \mathbf{X}^T = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \mathbf{R}$$

$$\text{Minimize : } f(\mathbf{X}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to : } g_i(\mathbf{X}) \leq \bar{g}_{all,i}; i=1,2,\dots,n$$

که در رابطه فوق،  $\mathbf{X}$  و  $F(\mathbf{X})$  به ترتیب بردار متغیرهای طراحی شکل کول و تابع هدف مسئله بهینه سازی می باشد. همچنین  $g_i(\mathbf{X})$  و  $\bar{g}_{all,i}$  به ترتیب  $i$  امین قید مسئله بهینه سازی و مقدار مجاز متناظر  $i$  امین قید و  $T$  ترانهاده بردار می باشد. از گذشته دور، اشکال مورد استفاده در ساخت کول ها شامل موارد زیر می باشد:

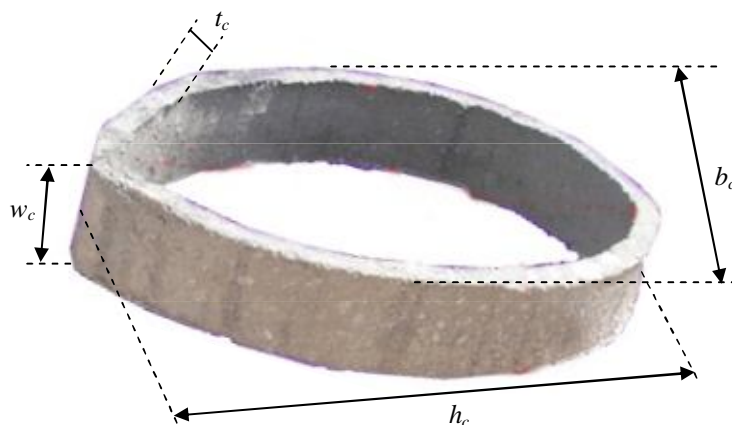
کول تخم مرغی شکل که به هر دو صورت سر و ته به کار گرفته می شود.

کول شبه بیضی دو تکه احتمالاً برای اجرای آسان آن و با شرایط بسیار تنگ به کار گرفته می شود.

کول سه تکه که فقط مقنbian شهرری از آن یاد کرده اند.

طوقه ها و کول های منفذدار که در مادر چاه و آبدار نصب می شدند.

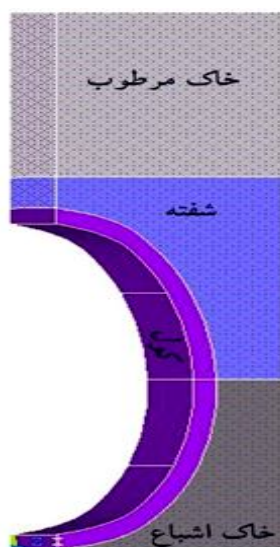
در مناطق کویری معمولاً کول تخم مرغی شکل بیش ترین کاربرد را دارد. در این مطالعه، بهینه سازی شکل کول تخم مرغی شکل بررسی شده است. بردار متغیرهای طراحی شکل کول شامل



شکل 2- مدل هندسی کول تخم مرغی

فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. برای این منظور، یک مدل اجزای محدود سه بعدی کول در نرم‌افزار ANSYS تهیه شده است. قابلیت کدنویسی (APDL) مدل اجزای محدود سازه در نرم‌افزار ANSYS این امکان را فراهم می‌سازد تا به‌طور مستقیم از این نرم‌افزار و نتایج تحلیل آن در فرایند بهینه‌سازی استفاده نمود. از اینرو در این مطالعه، مدل سه‌بعدی کول و محیط اطراف آن با استفاده از قابلیت کدنویسی انجام شده است. نیروهای اعمال شده در مدل‌سازی کول شامل نیروی وزن کول، نیروی وزن مرده خاک (خاک طبیعی) در بالای کول، نیروی وزن خاک اشباع در کوره داخل قنات و نیروهای ناشی از وزن شفته بوده است. در شکل 3، نیمی از مدل سه‌بعدی کول و محیط اطراف آن نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که به دلیل تقارن مدل کول و محیط اطراف آن، تنها نیمی از مدل کول و محیط اطراف در نرم‌افزار ANSYS در نظر گرفته شده است که این امر، باعث افزایش سرعت تحلیل مدل و کاهش زمان فرایند بهینه‌سازی شده است. هم‌چنین، اولین قدم در طراحی بهینه شکل کول تخم‌مرغی و مدل‌سازی آن در نرم‌افزار ANSYS، انتخاب یک مدل هندسی ریاضی مناسب برای کول می‌باشد. مدل هندسی باید ساده و از سهولت اجرایی خوبی برخوردار باشد و انطباق خوبی با مدل موجود کول مورد استفاده داشته باشد.



شکل 3- مدل سه بعدی کول و محیط اطراف آن

مدل‌های ریاضی مختلفی برای ایجاد هندسه تخم‌مرغ ارائه شده است. در این تحقیق، از مدل ریاضی زیر استفاده شده است:

$$\frac{x^2}{h_c^2} + \frac{y^2}{b_c^2} (e^{2x}) = 1 \quad (9)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده در معادله 9، در شکل زیر نشان

تنش مجاز کششی بتن براساس آیین‌نامه (2008) ACI-318 برابر  $0.7\sqrt{f_c'}$  در نظر گرفته شد.  $f_c'$  مقاومت فشاری 28 روزه نمونه استوانه‌ای بتن می‌باشد که در آزمایشگاه تعیین می‌شود. هم‌چنین، تنش مجاز فشاری بتن برابر  $f_c'$  فرض شده است.

### تابع جریمه

محاسبات بهینه‌سازی در روش‌های تکاملی و فراکوشی مبتنی بر بهینه‌سازی توابع بدون قید بیان شده است. جهت اعمال قیود بر تابع هدف مقید، باید مجموعه تابع هدف و قیود حاکم بر آن را به یک تابع آزاد معادل تبدیل نمود. به همین منظور با اعمال عملیات جبری بر تابع هدف و قیود، تابع جدیدی را معرفی می‌کنیم که تحت اثر هیچ قیدی ندارد. بدیهی است که بهینه تابع آزاد معادل برابر بهینه تابع هدف اولیه تحت اثر قیود مسئله می‌باشد. تابع آزاد معادل با عنوان تابع الحاقی (تابع برازندگی) معرفی می‌شود. از اینرو، نظریه تابع جریمه برای تشکیل تابع الحاقی ارائه شده است. روش‌های مختلفی برای اعمال تابع جریمه بر تابع هدف و قیود معرفی شده است. در این مطالعه، روش تابع جریمه خارجی استفاده شده است که کاربرد موفق آن در بهینه‌سازی مسائل مهندسی در تحقیقات گذشته نشان داده شده است (Khatibinia, Rajeev Krishnamoorthy, 1992). در این روش، تابع هدف و قیود حاکم بر آن را به صورت زیر به تابع آزاد معادل تبدیل می‌شود:

$$\tilde{f}(X) = f(X) (1 + R_p P_f) \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $\tilde{f}$  تابع الحاقی یا تابع آزاد معادل،  $P_f$  تابع جریمه خارجی و  $R_p$  ضریب تابع جریمه می‌باشد. تابع جریمه خارجی در بهینه‌سازی مسائل مهندسی به صورت مجموع نرمال شده قیود تخطی کننده در فرایند بهینه‌سازی تعریف می‌شود:

$$P_f = \sum_i \left[ \max \left( \frac{g_i}{g_{all,i}} - 1, 0 \right) \right]^2 \quad (7)$$

هم‌چنین  $R_p$  یک ضریب عددی است که در همگرایی الگوریتم مؤثر است و به صورت زیر ارائه شده است:

$$R_p = 25 \left[ 1 + r \cdot (n_g - 1) \right] \leq M \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $r$  ضریب ثابتی است که برابر 0/2 پیشنهاد می‌شود و  $n_g$  شمارنده تکرار فرایند بهینه‌سازی می‌باشد. پارامتر  $M$  یک عدد نسبتاً بزرگ است که معمولاً برابر 100 فرض می‌شود.

### مدل‌سازی کول

در این تحقیق، روش اجزای محدود برای مدل‌سازی و تحلیل کول در برابر بارهای وارده بر آن و محاسبه تنش‌های موجود کول در

داده شده است:

در این الگوریتم هر جواب مسئله، یک پرندۀ در فضای جستجو است که ذره نام دارد و هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی مسئله به دست می آید، بر این اساس پرندۀ ای که به منبع غذا نزدیک تر است، شایستگی بیش تری دارد. همچنین هر پرندۀ دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت پرندۀ و میزان سرعت را نشان می دهد و در فرآیند بهینه سازی هر پرندۀ جهت خود را بر اساس تجربه شخصی و تجربه جامعه اصلاح می کند. در فرمول بندی الگوریتم، ذره  $i$  ام در موقعیت  $x$  و در تکرار  $k+1$  ام به وسیله رابطه 10 موقعیت خود را بهبود می بخشد:

$$\mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{x}_k^i + \mathbf{v}_{k+1}^i \quad (10)$$

که در این رابطه  $\mathbf{v}_{k+1}^i$  سرعت ذره  $i$  ام است که به صورت زیر در هر تکرار به هنگام می شود:

$$\mathbf{v}_{k+1}^i = w \mathbf{v}_k^i + c_1 r_1 (\mathbf{p}_k^i - \mathbf{x}_k^i) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_k^g - \mathbf{x}_k^i) \quad (11)$$

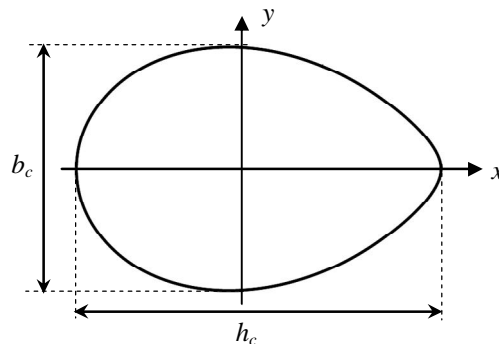
در روابط فوق  $\mathbf{v}_k^i$  مقدار بردار سرعت در تکرار  $k$  ام،  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی بین صفر و یک و  $\mathbf{p}_k^i$  نشان دهنده بهترین موقعیت ذره  $i$  ام و  $\mathbf{p}_k^g$  موقعیت بهترین ذره در تمام جامعه تا تکرار  $k$  ام می باشد. برای مثال  $c_1$  و  $c_2$  پارامترهای اعتماد نامیده می شوند و تعیین کننده میزان اطمینان به جریان ذرات و یا حرکت جامعه می باشد. بهترین مقادیر برای پارامترهای  $c_1$  و  $c_2$  برابر با 2 می باشد.  $w$  پارامتر لختی وزن نامیده می شود. پارامتر  $w$  نقش مهمی را در رفتار همگرایی الگوریتم جامعه پرندگان بر عهده دارد به طوری که مقدارهای زیاد  $w$  باعث افزایش مقدار بردار سرعت می شود و در هر تکرار گام های بزرگ تری برداشته خواهد شد و با کوچک شدن  $w$  این گام ها کوچک تر می شود که برای رسیدن به بهینه در گام های آخر مفید می باشد. در این تحقیق، از رابطه زیر استفاده شده است (Shi and Eberhart, 2008):

$$w_{k+1} = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} k \quad (12)$$

همانطور که در مرجع (Li et al., 2007) عنوان شده است مقادیر  $w_{\min}$  و  $w_{\max}$  به ترتیب برابر با 0/9 و 0/4 می باشند.

### نتایج عددی

به منظور بررسی طراحی شکل بهینه کول در کوره قنات با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم جامعه پرندگان، بهینه سازی شکل یک کول با ابعاد واقعی انجام شده است. این کول با مشخصات هندسی نشان داده شده در جدول 1 امروزه در بسیاری از مناطق ایران مورد استفاده می باشد.



شکل 4- هندسه مدل تخم مرغ با پارامترهای هندسی آن

### الگوریتم جامعه پرندگان

اخیراً گروهی از الگوریتم های بهینه سازی فراکوشی براساس شبیه سازی تعامل اجتماعی یک گروه خاص از موجودات زنده برای دستیابی به منابع غذایی به ارئه شده اند. الگوریتم جامعه پرندگان (PSO)<sup>1</sup> که در سال 1995 توسط ابرهات و کندی (Eberhart and Kennedy, 1995) معرفی شد، جزء این گروه می باشند. این الگوریتم بهینه سازی از نحوه زندگی پرندگان و ماهی ها الهام گرفته شده است که به صورت گروهی زندگی می کنند و بسیاری از احتیاجات خود، از جمله جستجوی غذا را به صورت دسته جمعی و با کمک یکدیگر و با استفاده از خرد جمعی انجام می دهند. در این الگوریتم فرض شده است که پرندگان در جستجوی غذا به صورت غریزی فاصله خود تا غذا را حس می کنند در حالی که از مکان آن اطلاعی ندارند. علاوه بر این، فرض شده است که تمام پرندگان با به اشتراک گذاشتن اطلاعات خود موقعیت نزدیک ترین پرندۀ به غذا را می دانند و موقعیت خود در فضای جستجو را بر مبنای آن اصلاح می کنند. فرآیند حرکت پرندگان به سمت منبع غذا یک

پدیده اتفاقی طبیعی است که باعث می شود هر پرندۀ در گروه با سرعت و جهت خاص خود حرکت کند و موقعیت اولیه خود را در گروه بهبود دهد، بردار سرعت براساس حافظه ذخیره شده به وسیله هر پرندۀ بهبود می یابد که این حافظه شبیه حافظه اطلاعات شخصی هر فرد می باشد و از طرف دیگر موقعیت هر ذره در گروه با توجه به رفتار کلی گروه بهبود می یابد و گروه در مسیر جستجوی خود به مناطق بهتری دست می یابد و این چرخه بهبود موقعیت هر ذره و متعاقباً بهبود موقعیت کل گروه ادامه دارد تا گروه به بهترین نقطه (منبع غذایی) برسد. کاربردهای موفق این الگوریتم در مهندسی توسط سلاجقه و همکاران (Salajegheh et al., 2008; 2009) نشان داده شده است.

بهینه‌سازی براساس کم‌ترین مقدار وزن به‌دست آمده در جدول 3 ارائه شده است:

جدول 3- مقادیر بهینه پارامترهای هندسی کول

متغیر هندسی	$h_c$	$t_c$	$b_c$	$w_c$
اندازه (m)	1/1	0/04	0/5	0/15

وزن بهینه کول برابر 45 کیلوگرم، تنش حداکثر و حداقل به ترتیب برابر 248813 و 880 پاسکال به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که وزن کول در حدود 27/5% کاهش یافته است. بنابراین بهینه‌سازی شکل کول می‌تواند به مقدار قابل توجهی باعث کاهش مصرف بتن و هزینه تمام شده کول گردد. هم‌چنین بیش‌ترین جابجایی راس کول برابر 0/022 میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین نمایش تنش‌ها و جابجایی کول در نرم‌افزار ANSYS در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است.

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که متغیر هندسی  $w_c$  برابر کران پایین انتخاب شده است. لذا در مرحله بعد، متغیر هندسی  $w_c$  مقدار ثابت و برابر کران بالا (مقدار به‌کار رفته در مدل واقعی) انتخاب شد و بقیه پارامترهای هندسی کول متغیر فرض شد. بنابراین، نتایج بهینه‌سازی شکل کول با استفاده از الگوریتم جامعه پرندگان در جدول زیر نشان داده شده است:

جدول 4- مقادیر بهینه پارامترهای هندسی کول

متغیر هندسی	$h_c$	$t_c$	$b_c$
اندازه (m)	1/1	0/04	0/50

جدول 1- مشخصات هندسی کول تخم‌مرغی موجود

متغیر هندسی	$h_c$	$t_c$	$b_c$	$w_c$
اندازه (m)	1/05	0/05	0/60	0/20

ابتدا کول موردنظر در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی شد و نتایج تحلیل آن مورد بررسی قرار گرفت. براساس این نتایج، تنش حداکثر و تنش حداقل در کول به ترتیب برابر 301127 و 187 پاسکال می‌باشد و بیش‌ترین جابجایی در راس کول برابر 0/03 میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین وزن این کول در حدود 62 کیلوگرم می‌باشد. در اشکال 5 و 6، نتایج تحلیل کول نشان داده شده است.

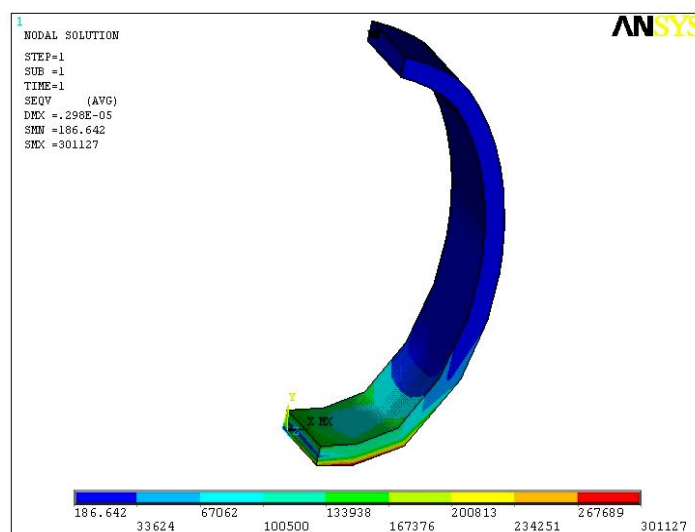
برای بهینه‌سازی شکل کول، کرانه‌های بالا و پایین متغیرهای هندسی شکل کول در فرایند بهینه‌سازی به‌صورت زیر انتخاب شده است:

در این مطالعه،  $f_c'$  برابر 23 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در الگوریتم جامعه پرندگان، تعداد ذرات جمعیت و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم به ترتیب برابر 30 و 100 در نظر گردید. این مقادیر براساس چندین دفعه اجرای برنامه بهینه‌سازی، تغییر دادن مقادیر فوق و انجام آنالیز حساسیت به‌دست آمده است. هم‌چنین به‌منظور در نظر گرفتن ماهیت تصادفی الگوریتم جامعه پرندگان، 10 اجرای مستقل انجام شده است.

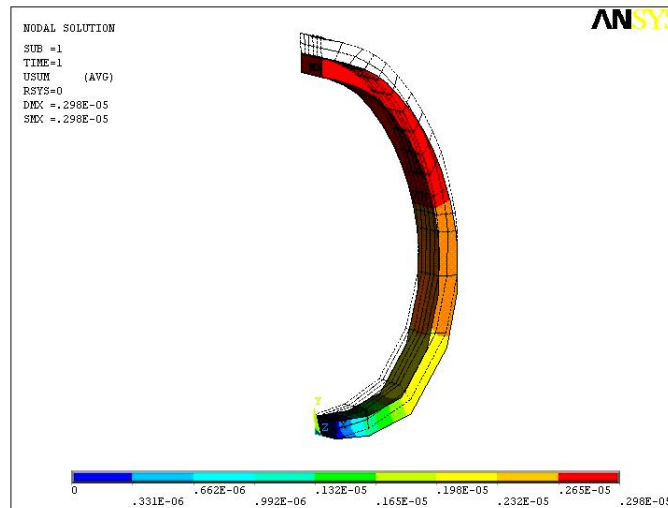
جدول 2- کرانه‌های بالا و پایین متغیرهای هندسی شکل کول

متغیر هندسی	$h_c$	$t_c$	$b_c$	$w_c$
کران پایین (m)	0/7	0/04	0/50	0/15
کران بالا (m)	1/1	0/10	0/70	0/20

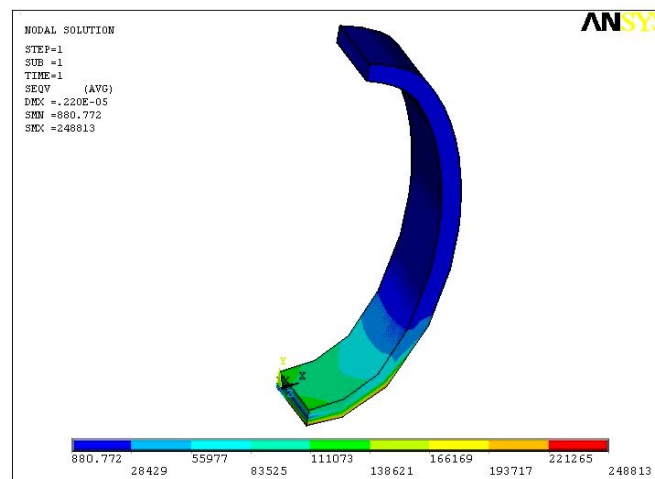
پس از 10 اجرای مستقل برنامه بهینه‌سازی، بهترین حل



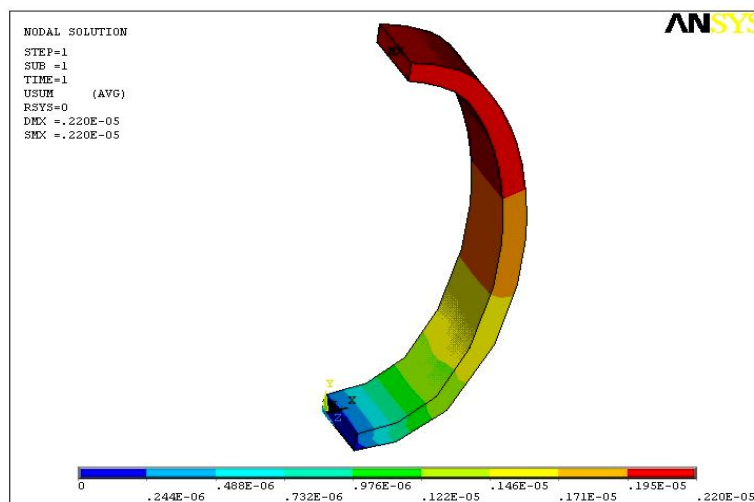
شکل 5- مدل‌سازی کول موجود و مقادیر تنش‌های تولید شده تحت بارگذاری در نرم‌افزار ANSYS



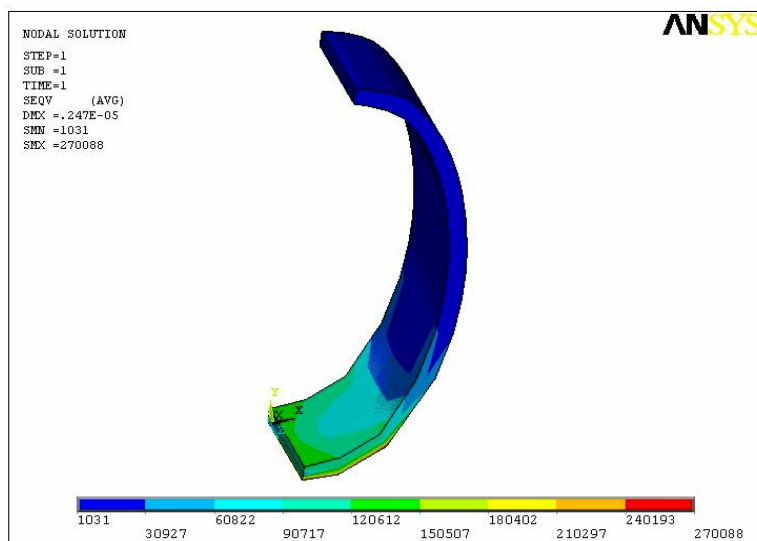
شکل 6- مدل سازی کول موجود و مقادیر جابجایی تولید شده تحت بارگذاری در نرم افزار ANSYS



شکل 7- توزیع مقادیر تنش ها در کول بهینه شده



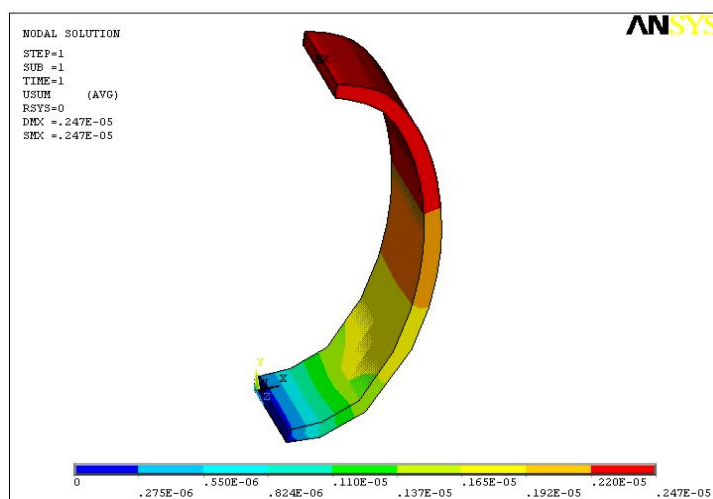
شکل 8- توزیع مقادیر جابجایی در کول بهینه شده



شکل 9- توزیع تنش‌های در کول بهینه شده

نرم‌افزار ANSYS در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی شکل کول بیانگر کارایی بالای الگوریتم جامعه پرندگان در طراحی بهینه شکل کول می‌باشد به طوری که وزن بهینه کول بهینه شده در مقایسه با کول موجود به میزان قابل توجه‌ای کاهش داشته است و تنش‌های فشاری و کششی بتن بدنه کول در محدوده مجاز بوده است.

در این حالت، وزن بهینه کول برابر 48 کیلوگرم، تنش حداکثر و حداقل به ترتیب برابر 270088 و 1031 پاسکال به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که وزن کول در حدود 22/5% نسبت به کول موجود کاهش یافته است. بنابراین با بهینه‌سازی شکل کول، می‌توان به مقدار قابل توجهی کاهش در مصرف بتن و هزینه تمام شده کول داشت. همچنین در این حالت، بیش‌ترین جابجایی راس کول برابر 0/025 میلی‌متر می‌باشد. نمایش تنش‌ها و جابجایی کول بهینه در



شکل 10- توزیع جابجایی کول بهینه شده در نرم‌افزار ANSYS

منظور، ابتدا مدل‌سازی سه بعدی کول و اجزای اطراف آن در نرم‌افزار ANSYS انجام شد و سپس شکل بهینه کول با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم جامعه پرندگان و الحاق آن به نرم‌افزار ANSYS به دست آورده شد. نتایج حاصله از بهینه‌سازی نشان داد که

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، طراحی شکل بهینه کول در کوره قنات با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم جامعه پرندگان می‌باشد. برای این



- Japan, 39–43.
- Khatibinia, M., Salajegheh, E., Salajegheh, J. and Fadaee, M. J. 2012. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel. *Engineering. Optimiz.* 45: 1–19.
- Li, L. J., Huang, Z. B., Liu, F., Wu, Q. H. 2007. A heuristic [particle](#) swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Comput. Struct.* 85: 340–349.
- Shi, Y., Eberhart, R. 1998. A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 69–73.
- Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C. S. 1992. Discrete optimization of structures using genetic algorithm. *Journal of Structure. Engineering. ASCE.* 118.5: 1233–1250.
- Salajegheh, E., Gholizadeh, S. and Khatibinia, M. 2008. Optimal design of structures for earthquake loads by a hybrid RBF-BPSO method. *Earthq. Engineering. Vibrat.* 7, 14–24.
- Salajegheh, E., Salajegheh, J., Seyedpoor, S. M. and Khatibinia, M. 2009. Optimal design of geometrically nonlinear space trusses using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Science. Iran.* 6.5: 403–414.
- که الگوریتم الگوریتم جامعه پرندگان، توانسته است وزن کول را بهینه نماید و شکل بهینه‌ای برای کول به دست آورد و بدون اینکه در پایداری کول خللی ایجاد شود. بنابراین کاهش وزن بتن در واقع باعث کاهش مصرف بتن و هزینه تمام شده کول گردد و این امر موجب صرفه‌جویی اقتصادی در ساخت کول و قنات شود.
- ### منابع
- صدری، ک، سلامی، ح. 1368. نقش سرمایه‌گذاری و لایروبی در کاهش تلفات آبدهی و حفاظت استان‌های فارس. *مجله کشاورزی ایران*. جلد 1 و 2، 55–72.
- مغربی، م. ف. 1389. بررسی گل آلوده‌سازی آب قنات بلده فردوس در انتقال به باغات و زمین‌های کشاورزی. *طرح پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد*.
- ایزدی، ت. ناظم‌السادات، ج. 1388. ویژگی فیزیکی آبدهی و بررسی امکان ذخیره‌سازی آب قنات کتک ارسنجان. *مجله مهندسی آب*. سال دوم. 21–30.
- ACI. 2008. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ANSYS Inc. Theory Reference. 2006. Release 10.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc.
- Eberhart, R. C., Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particles swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya,



## Optimal Shape Design of Ghanat Kaval using Finite Element Method and Particle Swarm Optimization

E. Fallahi<sup>1</sup>, A. Akbarpour<sup>2,\*</sup>, M. Khatibinia<sup>3</sup> and H. Ebrahimi<sup>4</sup>

Received: Apr.26, 2015

Accepted: Oct.07, 2015

### Abstract

Ghanats are water structures of Iranian invention. Groundwater extraction is transferred by Ghanat, with the force of gravity and from underground and away from the evaporation. Structure of Ghanats created in Iran was changed from the used state to unused state, and the resistant structures or Kaval were used in order to prevent the destruction of structure of Kariz. The aim of this study is the optimal shape design of Ghanat Kaval using finite element method and particle swarm optimization. For this purpose, first, 3D modelling of Kaval and its around element was implemented in ANSYS software. Then, optimal shape design of Kaval was achieved using particle swarm optimization and linking it to ANSYS software. Weight of Kaval was considered as the objective of optimization problem, and the geometry parameters of Kaval were design variables. Also, stress of the body Kaval (compressive and tension stresses) was considered as constraint. The optimum results were shown that particle swarm optimization had high performance in the optimal shape design of Kaval so that the weight of Kaval in comparison with the existent Kaval was considerably decreased.

**Keywords:** Ghanat, Kaval, Optimal design, Finite element method, Particle swarm optimization.

1- Master of Science Student, Islamic Azad University, Ferdows Branch

2, 3- Associate Professor and Assistant Professor. Department of Civil Engineering, University of Birjand

4- Associate Professor, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Theran

(\* - Corresponding Author Email: Akbarpour@birjand.ac.ir)