

استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌یابی وزنی گنبد‌های مشبك تک لایه فولادی با پیکربندی‌های مختلف

مهندی بندگی، فرزاد شهابیان

(دریافت: ۸۹/۹/۲۴، پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۵)

چکیده

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌یابی وزنی (حداقل) گنبد‌های مشبك تک لایه فولادی تحت اثر بارهای ثقلی یکنواخت استفاده شده است. برای این کار، ۳۷۸ نمونه گنبد با شش نوع پیکربندی مختلف و با دهانه‌هایی از ۱۰ تا ۵۰ متر و نسبت‌های ارتفاع به دهانه از $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{2}$ تحلیل و طراحی شده و در هر مورد وزن و پیکربندی بهینه سازه توسط الگوریتم ژنتیک تعیین گردیده است. در ادامه، از نتایج حاصل برای آموزش و طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین وزن بهینه سازه استفاده شده است. بدین ترتیب می‌توان با توجه به قطر یک ساختمان مدور، مناسب‌ترین پوشش از نوع گنبد مشبك تک لایه فولادی را با یک پیکربندی مشخص و با وزن بهینه بدست آورد.

كلمات کلیدی

گنبدمشبك تک لایه فولادی، بهینه‌یابی، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی

Optimum Design (Minimum Weight) of Sigle-layer-lattice Domes with Different Topologies using Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks

M. Bandegi, F. Shahabian

ABSTRACT

In this paper, the two methods of genetic algorithm and neural networks have been combined to achieve the optimum design (minimum weight) of single-layer-lattice domes subjected to uniform gravitational loading. Herein, 378 models with six topologies, spans between 10 and 50 m and different span-to-height ratio from 1/8 to 1/2 have been analyzed and designed for the optimum weight and configuration using genetic algorithm. Furthermore, the results were being used to train the artificial neural networks to predict the optimum weight of the space domes. Thus, for a circular site plan with a specific diameter, an optimum single-layer-lattice dome with specific configuration could be proposed by using the neuro-genetic system.

Key words

Single-layer-lattice Dome, Optimization, Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks

۱. کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، bandegi_m@yahoo.com (نویسنده مسئول)

۲. دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، fshahabianm@yahoo.com

ذرات، Harmony Search و Big Bang- Big Crunch برای بهینه سازی گنبدهای شودلر و لاملا استفاده کردند. ایشان در مقاله دیگری [۱۴] روش Charged System Search را برای بهینه سازی هندسی و پیکربندی گنبدهای ژئودزیک به کار بردند.

برای بهینه سازی سازه های فضاکار به علت وجود متغیرهای زیاد بایستی تعداد زیادی تحلیل صورت بگیرد. این کار موجب می شود که برای یافتن پاسخ بهینه، زمان زیادی صرف شود. در این مقاله برای غلبه بر این مشکل از روش الگوریتم ژنتیک و شبکه های عصبی مصنوعی استفاده می شود. بدین منظور با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، گنبدهای مشبک تک لایه فولادی تحت اثر بارهای ثقلی یکنواخت با پیکربندی و ابعاد مختلف طراحی و پاسخ بهینه در هر مورد تعیین می گردد. سپس با استفاده از نتایج مرحله قبلی و دسته بندی آنها، اقدام به طراحی و آموزش شبکه های عصبی مصنوعی می گردد. بدین ترتیب می توان با استفاده از شبکه های عصبی طراحی شده، با سرعت و دقت بالا و بدون نیاز به تحلیل های مکرر، مشخصات گنبدهای بهینه را برای پوشش یک فضای دلخواه بدست آورد.

۲- روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک بر پایه نظریه تکامل در طبیعت که در آن بهترین ها حق بقا دارند، بنا شده است. الگوریتم ژنتیک که گونه ای از الگوریتم های تکاملی است، نخستین بار توسط جان هلند در دانشگاه میشیگان مطرح شد [۱۵]. هلند در رساله ای با عنوان "تطابق در طبیعت و سیستم های مصنوعی"، به معرفی مبانی ریاضی و مفاهیم اصلی روش الگوریتم ژنتیک، شامل عملگرهای سه گانه انتخاب، ادغام و جهش پرداخت.

اولین مرحله در تولید یک نسل، انتخاب یا همان تولید مثل می باشد. برای انتخاب کروموزوم های با شایستگی بالا روش های مختلفی وجود دارد. پس از مرحله انتخاب، نوبت به مرحله ادغام می رسد. عملگر انتخاب مقدار دو

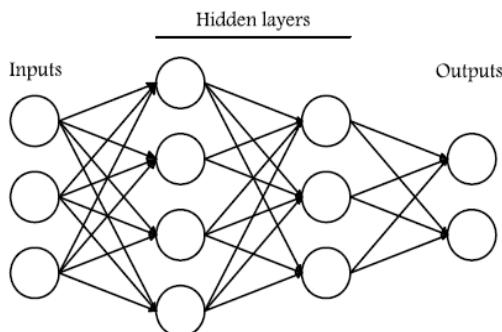
سازه های فضاکار به علت سبکی و داشتن ظاهری جذاب، همواره به عنوان راهکاری اقتصادی برای پوشش فضاهای وسیع و بدون ستون مانند سالن های ورزشی، نمایشگاه ها، آشیانه هواپیما ها، مساجد و امثال آنها به کار گرفته شده اند. در این میان گنبدها به عنوان سیستم های سازه ای زیبا و توانا در ایجاد فضاهایی گستره از قدیم مورد توجه طراحان بوده است. سازه های فضاکار توانایی تحمل بار به صورت سه بعدی را دارا بوده و امکان توزیع بارهای اعمالی در یک نقطه را به گونه ای که عضوهای زیادی آن را تحمل کنند فراهم می آورند. پر عضو بودن این نوع سازه ها علی رغم ایجاد سختی زیاد و تغییر شکل های کم موجب شده است تا تحلیل و طراحی آنها پیچیده و زمانبر شود. از این رو مطالعات بیشتر برای روش های جدید طراحی بهینه سازه های فضاکار اجتناب ناپذیر است.

بهینه سازی خرپاها با روش های کلاسیک توسط محققین مختلفی انجام شده است. خلاصه ای از کارهای انجام شده در این زمینه توسط تاپینگ [۱] و بندسو و همکاران [۲] گردآوری شده است. از آن جا که عوامل مؤثر در طراحی خرپاها نظیر سطح مقطع پروفیل های انتخابی به صورت پارامترهای گسسته می باشند، لذا استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش جستجوی مؤثر در فضاهای طراحی وسیع و گسسته مورد توجه قرار گرفته است. گلدبرگ و سمتانی [۳] و راجیو و کریشنامورثی [۴] از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی خرپاها استفاده کردند. هاجلا و لی [۵]، راجان [۶]، راجیو و کریشنامورثی [۷] و دب و گولاوی [۸] از روش فوق برای بهینه سازی توبولوژی (پیکربندی) خرپاها استفاده کردند. کاوه و ثروتی [۹] از روش شبکه های عصبی برای طراحی شبکه های فضاکار دو لایه استفاده کردند. ساکا [۱۰] از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی گنبدهای مشبک تک لایه استفاده کرد. رهامی و همکاران [۱۱] از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی توام همکاران [۱۱] از روش توبولوژی خرپاها استفاده کردند. کاوه و طلعت اهری [۱۲-۱۳] از روش های جدید نظیر اجتماع مورچگان، توده



نتیجه نیز از یک تابع خطی (یا غیرخطی) عبور می‌کند تا خروجی ساخته شود.

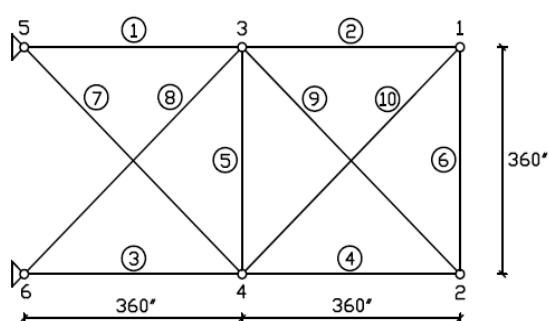
یکی از پرکاربردترین انواع شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون (MLP) با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطی (BP) می‌باشد (شکل (۲)). در صورت انتخاب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی مناسب برای پرسپترون‌های چند لایه، می‌توان یک نگاشت غیر خطی را با دقت مطلوب انجام داد.



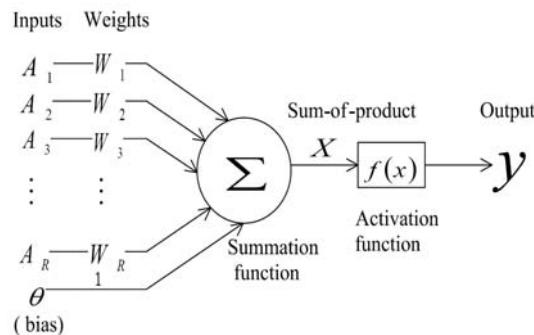
شکل (۲): ساختار شبکه‌های عصبی MLP

۴- طراحی بهینه گنبدهای فضاسکار

در این مقاله، از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سازه‌های فضاسکار گنبدهای شکل استفاده شده است. برای این کار ابتدا سازه‌های فضاسکار با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل گردیده، سپس با استفاده از نتایج تحلیل و به کارگیری روش الگوریتم ژنتیک، طراحی بهینه گنبدهای فضاسکار، قبل از انجام تحلیل و طراحی بهینه گنبدهای فضاسکار، به منظور بررسی دقت برنامه اجزای محدود و الگوریتم ژنتیک، نتایج بدست آمده برای یک خرپای ۱۰ عضوی که در شکل (۳) نشان داده شده است، با نتایج حاصل از سایر روش‌ها مقایسه می‌شود.



شکل (۳): خرپای ۱۰ عضوی



شکل (۱): مدل نرون در یک شبکه عصبی مصنوعی

رشته را که بطور تصادفی انتخاب شده‌اند، در نقاطی که بطور اتفاقی از دو رشته انتخاب می‌شود جابجا می‌کند. احتمال ادغام دو کروموزوم در این مرحله توسط نرخ ادغام کنترل می‌شود. آخرین مرحله در تولید نسل جدید، عمل جهش می‌باشد. این عمل برای حفظ اطلاعات قبلی و اجتناب از نقاط بهینه موضعی می‌باشد. امکان جهش هر جزء از یک کروموزوم، مستقل از سایر جزء‌های یک رشته از کروموزوم‌ها می‌باشد، بدین معنی که برای هر یک از جزء‌ها یک عدد تصادفی تولید شده و چنانچه این عدد از نرخ جهش کوچکتر باشد آن جزء تغییر می‌کند و در غیر این صورت دست نخورده باقی می‌ماند. این فرآیند بطور متناوب تکرار می‌شود تا بهترین نتیجه عاید گردد.

۳- روش شبکه‌های عصبی مصنوعی

استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی که عملکرد مغز را الگوبرداری می‌کند به عنوان بخشی از هوش مصنوعی، رشدی چشمگیر در دهه ۹۰ میلادی را تجربه کرد. کار یک شبکه عصبی، ایجاد یک الگوی خروجی براساس الگوی ورودی ارائه شده به شبکه می‌باشد. این کار با تنظیم و آموزش شبکه توسط اطلاعات (تجربیات) قبلی صورت می‌گیرد.

یک شبکه عصبی مصنوعی که به صورت مخفف با ANN نمایش داده می‌شود از ترکیب واحدهایی به نام نرون که در شکل (۱) نشان داده شده است، تشکیل می‌گردد. ورودی این نرون در ضرایب وزن‌دار ضرب شده و سپس با یک عدد ثابت که بایاس نامیده می‌شود جمع می‌گردد.

جدول (۱): مشخصات مقاطع انتخابی خرپای ۱۰ عضوی

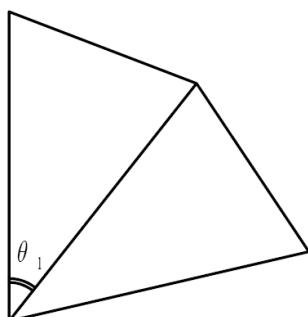
شماره قطع	سطح قطع (in ²)												
1	1.62	7	2.63	13	3.47	19	4.18	25	5.12	31	13.9	37	19.9
2	1.8	8	2.88	14	3.55	20	4.22	26	5.74	32	14.2	38	22
3	1.99	9	2.93	15	3.63	21	4.49	27	7.22	33	15.5	39	22.9
4	2.13	10	3.09	16	3.84	22	4.59	28	7.97	34	16	40	26.5
5	2.38	11	3.13	17	3.87	23	4.80	29	11.5	35	16.9	41	30
6	2.62	12	3.38	18	3.88	24	4.97	30	13.5	36	18.8	42	33.5

$$W = \sum_{j=1}^m \rho l_j A_j \quad (1)$$

در رابطه (۱)، l_j طول عضو، A_j سطح مقطع عضو، ρ چگالی و W وزن سازه می‌باشد.

۲-۱-۴- متغیرهای مسأله بهینه‌سازی

در این مقاله، برای بهینه سازی، علاوه بر در نظر گرفتن سطح مقطع عضوها به عنوان متغیر طراحی، از متغیری هندسی برای بهینه کردن هندسه گنبدها استفاده می‌شود. برای این کار، زاویه قرارگیری حلقه‌ها به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود تا بتوان نوع پیکربندی را نیز در فرآیند بهینه‌سازی کنترل نمود. با این کار علاوه بر امکان تغییر در طول عضوها، می‌توان ارتفاع مناسب قرارگیری گره‌های واقع بر حلقه‌ها را با توجه به سطح بارگیر گره‌ها پیدا نمود. از این رو برای گنبدهای دو حلقه‌ای همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، یک زاویه به عنوان متغیر هندسی و برای گنبدهای سه حلقه‌ای مطابق شکل (۵) دو زاویه به عنوان متغیر هندسی در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۴): متغیرهای زاویه‌ای گند دو حلقه‌ای



در این مثال، ضریب کشسانی مصالح در $E = 1 \times 10^4$ ksi، چگالی $\rho = 0.1$ lb/in³، تنش $\sigma_a = \pm 25$ ksi و تغییر مکان مجاز $u_a = \pm 2$ in در نظر گرفته شده است. این سازه تحت بارهای قائم ۱۰۰ kips در گره‌های ۲ و ۴ قرار گرفته است. در این تحلیل از وزن سازه صرف‌نظر شده است.

مشخصات مقاطع انتخابی برای عضوها این خرپا مطابق جدول (۱) می‌باشد [۱۶]. نتیجه حاصل از روش الگوریتم ژنتیک (GA) پیشنهادی با نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف در جدول (۲) مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها جواب بهتری را ارائه می‌دهد.

۴- الگوسازی

در این پژوهش برای الگوسازی و تحلیل، یک برنامه اجزای محدود سازه فضاکار سه بعدی نوشته شده است. در این برنامه، با توجه به پیکربندی‌های مختلف، اقدام به ایجاد فرم هندسی دلخواه گنبدها با استفاده از مختصات کروی شده است.

۱-۱-۴- تابع هدف

در هنگام طراحی سازه‌ها علاوه بر رعایت ضوابط آیین‌نامه‌ای تلاش می‌شود که وزن سازه نیز حداقل شود. برای این کار، وزن سازه به عنوان تابع هدف انتخاب می‌شود.

جدول (۲): مقایسه نتایج بدست آمده از روش GA با سایر روش‌ها برای خرپای ۱۰ عضوی

روش	وزن (پوند)	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
R-K [16]	5613	33.5	1.62	22.00	15.50	1.62	1.62	14.20	19.90	19.90	2.62
C [16]	5586	30.00	1.62	22.90	13.50	1.62	1.62	13.90	22.00	22.00	1.62
S-F [16]	5541	30.00	1.62	26.50	15.50	1.62	1.62	13.90	22.00	22.00	1.62
روش GA پیشنهادی	5505	33.50	1.62	22.90	15.50	1.62	1.62	7.22	22.90	22.00	1.62

مشخص گردیده است. در این شکل L دهانه گند و H

ارتفاع گند می‌باشد.

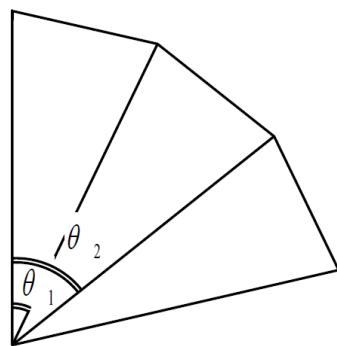
۳-۱-۴- قیدهای مسئله

با توجه به ضوابط طراحی سازه‌های فضاسکار، سه قید مربوط به تنش عضوها، لاغری عضوها و تعییرمکان گره‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

می‌توان قید تنش را که برای عضو j ام با $r_j g$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه شماره (۲) بیان کرد:

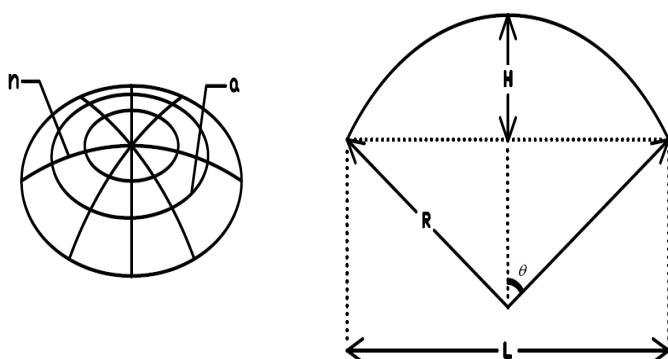
$$g_j = \frac{f_j}{F_j} - 1 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، f_j تنش موجود در عضو j ام و F_j تنش مجاز عضو j ام می‌باشد.



شکل (۵): متغیرهای زاویه‌ای گند سه حلقه‌ای

مشخصات گنددهای فضاسکار در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول a و n به ترتیب تعداد حلقه‌های مداری و تعداد نصف النهارها می‌باشند که در شکل (۶)



شکل (۶): مشخصات هندسی گبدها

جدول (۳): مشخصات گنددهای فضاسکار

شماره شکل گند	نوع گند	n	a	تعداد گرهها	تعداد عضوها	تعداد تیپ عضوها	تعداد کل متغیرها
الف	دیاماتیک	6	2	19	42	4	5
ب		6	3	37	90	6	8
ج	شودلر	8	2	17	40	4	5
د		8	3	25	64	6	8
ه	شودلر نوع دوم	8	2	17	40	4	5
و		8	3	25	64	6	8

۴-۱-۵-تابع برازنده

از آنجا که الگوریتم ژنتیک برای مسائل بیشینه‌سازی مناسب است، برای پیدا کردن وزن بهینه (حداقل) سازه از تابع برازنده رابطه (۷) کمک گرفته می‌شود.

$$(7) f_i = (\varphi_{\max} + \varphi_{\min}) - \varphi_i$$

در رابطه (۷)، f_i تابع برازنده فرد i ام با φ_{\max} و φ_{\min} به ترتیب بیشترین و کمترین تابع وزن در نسل مورد بررسی می‌باشد.

برای اعمال قید لاغری برای عضو j ام که با e_j نشان داده می‌شود، از رابطه (۳) استفاده می‌شود. در این رابطه \bar{e}_j لاغری مجاز است:

$$(3) e_j = \frac{\lambda_j}{\bar{\lambda}_j} - 1$$

برای کنترل جایگایی گرهها، قید تغییر مکان را که برای درجه آزادی i ام با h_i نشان داده می‌شود، مطابق با رابطه (۴) خواهد بود. لازم به ذکر است که در این رابطه d_i تغییر مکان درجه آزادی i ام بوده و \bar{d}_i تغییر مکان مجاز می‌باشد.

$$(4) h_i = \frac{d_i}{\bar{d}_i} - 1$$

۴-۱-۶-تابع هدف نامقید

در این مسئله برای پایان دادن به فرایند جستجو، برای تعداد نسل‌ها محدودیت قرار داده شده است.

۲-۴-تحلیل و طراحی

در مرحله تحلیل و طراحی ابتدا سازه به روش اجزای محدود تحلیل می‌گردد و در مرحله بعد به کمک الگوریتم ژنتیک، سازه بهینه طراحی می‌شود. در این محاسبات، شدت بار مرده و بار زنده برابر با Kg/m^2 ۱۵۰ در نظر گرفته شده است.

پلان تیپ‌بندی ۶ نوع گند انتخابی در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخصات به کار رفته برای تحلیل و طراحی هریک گبهای نشان داده شده در شکل (۷) عبارتند از:

۱- دهانه گند (L): ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۵۰ متر.

در این مقاله، برای حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک باید ابتدا مسئله مقید به حالت نامقید تبدیل شود. برای این کار، از تعریف ضریب نقض محدودیت سازه (p ، مطابق با رابطه (۵) استفاده می‌شود.

(۵)

$$p = \sum_{i=1}^n [\max(h_i, 0)]^2 + \sum_{j=1}^m [\max(g_j, 0)]^2 + [\max(e_j, 0)]^2 \Big\}$$

در رابطه (۵)، m تعداد عضوها و n تعداد درجات آزادی می‌باشد.

تابع هدف نامقید به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$(6) \phi = W(1 + K.p)$$

در این رابطه W وزن سازه و K ضریب تاثیر نقض محدودیت p در تولید نسل‌های بعدی است. در این مسئله، مقدار ضریب تاثیر نقض محدودیت با آزمون و خطاهای مکرر برابر ۱۰۰ انتخاب شده است.



$$E = 2.1 \times 10^6$$

Kg / cm²

ضریب کشسان:

$$\gamma = 0.00785$$

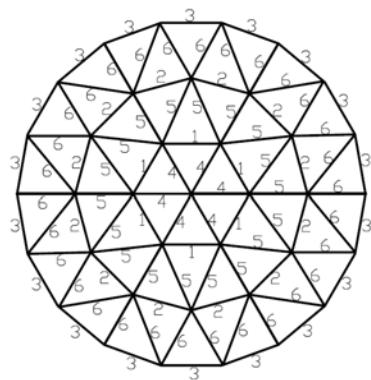
Kg / cm³

وزن مخصوص فولاد:

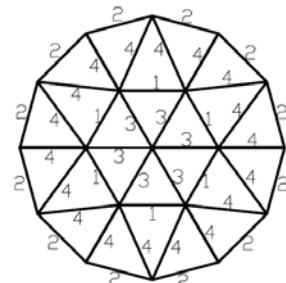
۲- نسبت ارتفاع به دهانه گند (H/L): $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$

$\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$

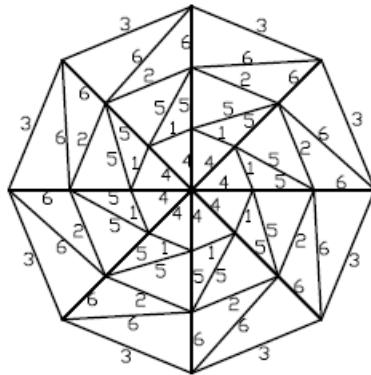
مقاطع عضوها از ۳۲ نیمrix لوله‌ای با ضریب کشسان و وزن مخصوصی برابر با مقادیر زیر از جدول (۴) انتخاب می‌شوند.



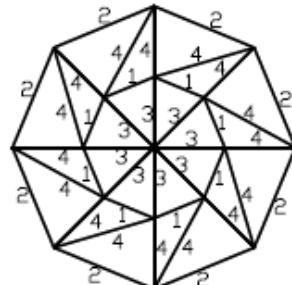
ب- گند دیاماتیک سه حلقه‌ای



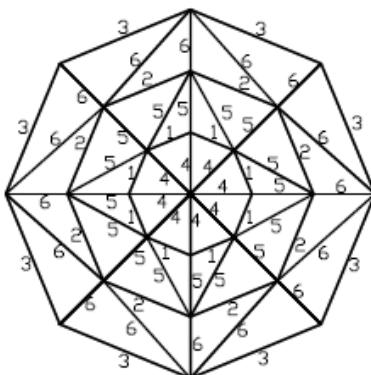
الف- گند دیاماتیک دو حلقه‌ای



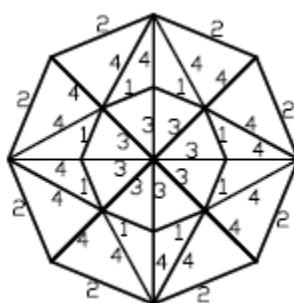
د- گند شودلر سه حلقه‌ای



ج- گند شودلر دو حلقه‌ای



و- گند شودلر نوع دوم سه حلقه‌ای



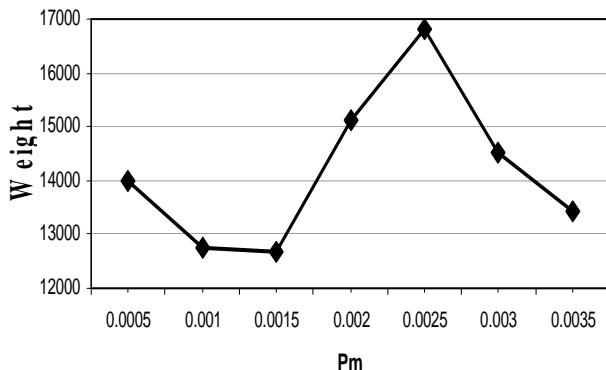
ه- گند شودلر نوع دوم دو حلقه‌ای

شکل (۷): پلان و نمای گندها به همراه تیپ‌بندی عضوها

جدول (۴): مشخصات مقاطع

شماره مقطع	قطر خارجی(cm)	ضخامت (cm)									
1	2.69	0.32	9	11.43	0.36	17	21.91	0.5	25	32.39	1
2	4.24	0.32	10	11.43	0.63	18	21.91	0.8	26	32.39	1.6
3	4.83	0.4	11	13.97	0.63	19	21.91	1.25	27	40.64	0.63
4	6.03	0.5	12	13.97	1	20	24.45	1.2	28	40.64	1.6
5	7.61	0.32	13	16.83	0.63	21	27.3	0.63	29	45.7	1
6	7.61	0.5	14	16.83	1	22	27.3	1	30	45.7	1.6
7	8.89	0.4	15	19.37	0.63	23	27.3	1.6	31	50.8	0.8
8	8.89	0.63	16	19.37	1	24	32.39	0.63	32	50.8	2

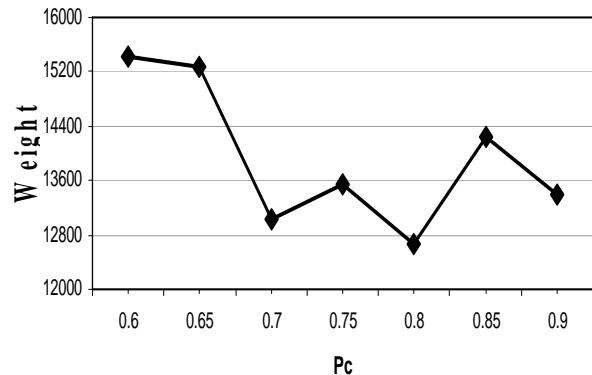
همان طور که در جدول (۵) دیده می‌شود گنبدهای نوع دیاماتیک در مقایسه با نوع شودلر دارای وزن بهینه کمتری می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به مرجع [۱۲]، گنبد نوع شودلر در مقایسه با گنبد نوع لاملا دارای وزن بهینه کمتری دیاماتیک در مقایسه با نوع شودلر و لاملا دارای وزن بهینه کمتری می‌باشد.



شکل (۹): تغییرات وزن بهینه گنبد دیاماتیک نمونه برای نرخهای جهش مختلف ($P_c = 0/8$)

به عنوان نمونه، روند همگرا شدن نسل‌های الگوریتم ژنتیک به پاسخ بهینه به عنوان نمونه برای گنبد دیاماتیک سه حلقه‌ای با طول ۲۰ متر و نسبت ارتفاع به دهانه $\frac{1}{2}$ در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. از شکل (۱۰) مشخص می‌گردد که جواب بهینه برای این گنبد در نسل ۲۴۶ حاصل شده است.

در روند همگرا شدن به پاسخ بهینه مشخص شد که انتخاب نرخهای ادغام (P_m) و جهش (P_c) به ترتیب برابر $0/8$ و $0/0015$ بهترین نتیجه را بدست می‌دهد. در ادامه، با توجه به نتایج حاصل، ملاحظه گردید که تعداد جمعیت اولیه ۲۵۰ و تعداد نسل‌های ۴۵۰ برای همگرای به بهترین پاسخ مناسب است. به عنوان نمونه نحوه بررسی و انتخاب نرخهای P_c و P_m برای یافتن وزن بهینه گنبد دیاماتیک سه حلقه‌ای با دهانه ۳۰ متر و نسبت $\frac{H}{L}$ برابر $\frac{1}{2}$ در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است.



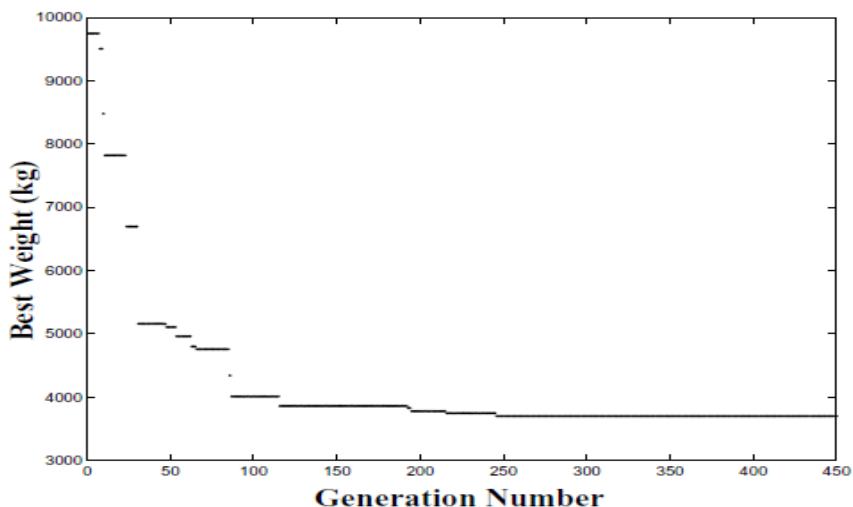
شکل (۸): تغییرات وزن بهینه گنبد دیاماتیک نمونه برای نرخهای ادغام مختلف ($P_m = 0/0015$)

بخشی از پاسخهای بهینه برای گنبدهای دارای ابعاد و پیکربندی‌های مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است.



جدول (۵): بخشی از نتایج سازه‌های فضاسکار گنبدی شکل

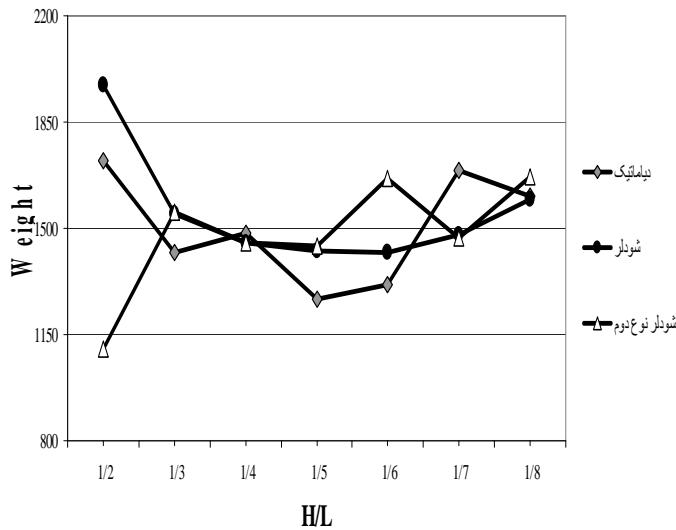
شودلر نوع دوم				شودلر				دیاماتیک			
وزن (kg)	نسبت ارتفاع به دهانه	دهانه (m)	تعداد حلقه	وزن (kg)	نسبت ارتفاع به دهانه	دهانه (m)	تعداد حلقه	وزن (kg)	نسبت ارتفاع به دهانه	دهانه (m)	تعداد حلقه
758	$\frac{1}{2}$	10	2	728	$\frac{1}{2}$	10	2	714	$\frac{1}{2}$	10	2
795	$\frac{1}{5}$	10	2	526	$\frac{1}{5}$	10	2	540	$\frac{1}{5}$	10	2
600	$\frac{1}{3}$	10	3	600	$\frac{1}{3}$	10	3	539	$\frac{1}{3}$	10	3
644	$\frac{1}{8}$	10	3	533	$\frac{1}{8}$	10	3	484	$\frac{1}{8}$	10	3
9909	$\frac{1}{3}$	30	2	9683	$\frac{1}{3}$	30	2	8243	$\frac{1}{3}$	30	2
20568	$\frac{1}{7}$	30	2	10171	$\frac{1}{7}$	30	2	7507	$\frac{1}{7}$	30	2
9970	$\frac{1}{4}$	30	3	9799	$\frac{1}{4}$	30	3	8589	$\frac{1}{4}$	30	3
10018	$\frac{1}{5}$	30	3	9801	$\frac{1}{5}$	30	3	8296	$\frac{1}{5}$	30	3
38366	$\frac{1}{2}$	50	2	37192	$\frac{1}{2}$	50	2	35812	$\frac{1}{2}$	50	2
58216	$\frac{1}{6}$	50	2	38841	$\frac{1}{6}$	50	2	28624	$\frac{1}{6}$	50	2
35415	$\frac{1}{3}$	50	3	37741	$\frac{1}{3}$	50	3	29237	$\frac{1}{3}$	50	3
40623	$\frac{1}{7}$	50	3	40443	$\frac{1}{7}$	50	3	30375	$\frac{1}{7}$	50	3



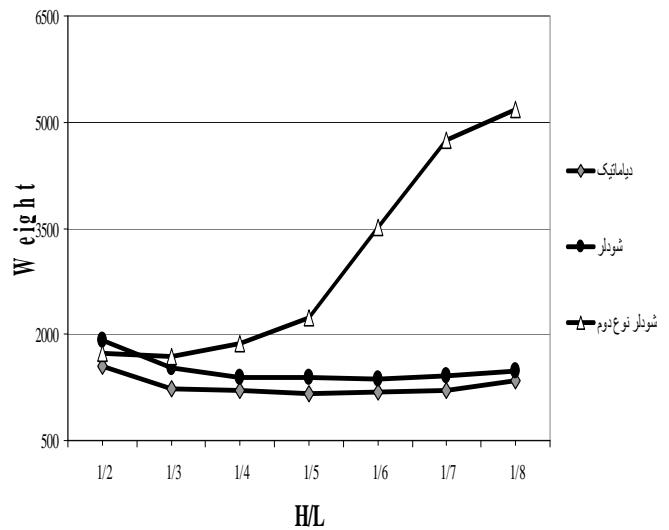
شکل (۱۰): روند همگرایی نسل‌های الگوریتم ژنتیک به وزن بهینه برای گنبد دیاماتیک سه حلقه‌ای با دهانه ۲۰ متر و ارتفاع ۱۰ متر

بخشی از این دست آوردها که می‌تواند به صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرد، در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) نشان داده شده است.

با استفاده از نتایج بدست آمده، می‌توان تغییرات وزن بهینه پیکربندی‌های گوناگون را بر اساس تعداد حلقه‌های هر گندبای نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف را بدست آورد.

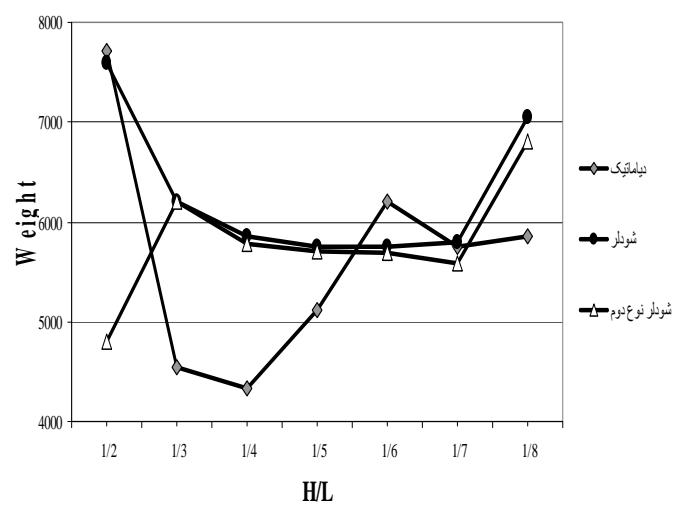


ب - گندبهای سه حلقه‌ای

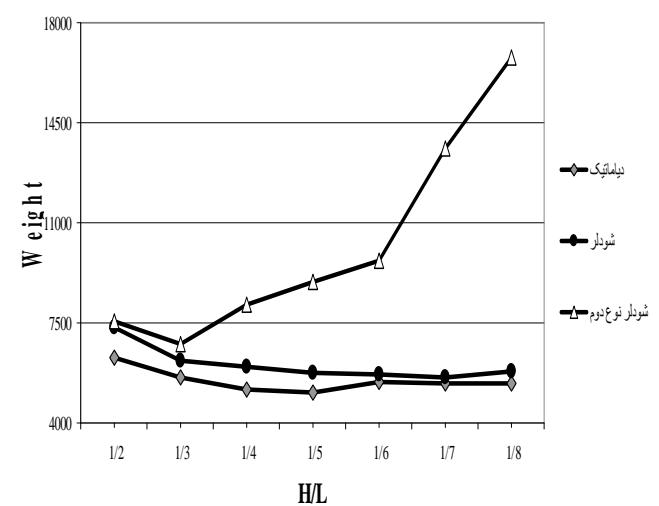


الف - گندبهای دو حلقه‌ای

شکل (۱۱): تغییرات وزن بهینه گندبهای با قطر ۱۵ متر در نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف



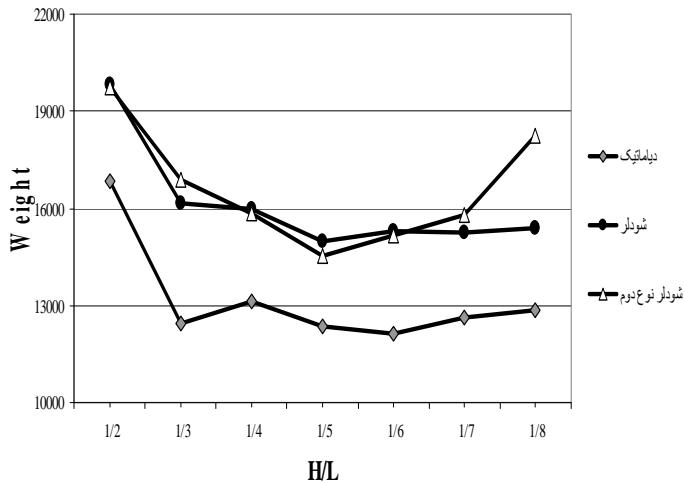
ب - گندبهای سه حلقه‌ای



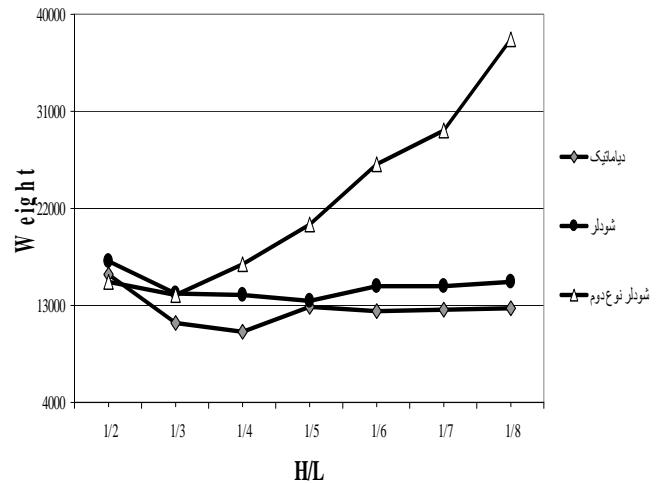
الف - گندبهای دو حلقه‌ای

شکل (۱۲): تغییرات وزن بهینه گندبهای با قطر ۲۵ متر در نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف



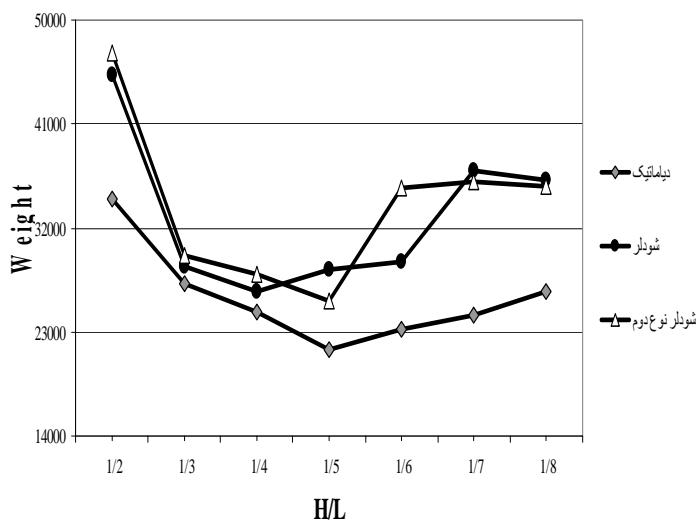


ب - گنبدهای سه حلقه‌ای

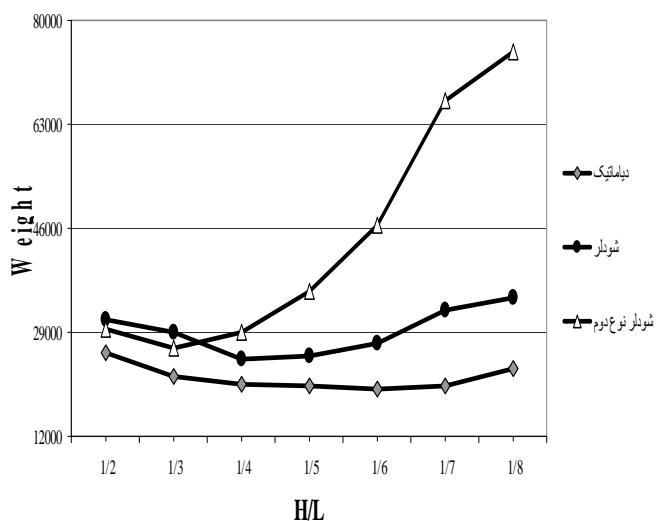


الف - گنبدهای دو حلقه‌ای

شکل (۱۳): تغییرات وزن بهینه گنبدهای با قطر ۳۵ متر در نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف



ب - گنبدهای سه حلقه‌ای



الف - گنبدهای دو حلقه‌ای

شکل (۱۴): تغییرات وزن بهینه گنبدهای با قطر ۴۵ متر در نسبت‌های ارتفاع به دهانه مختلف

قرارگیری حلقه‌ها و A_1 تا A_6 نوع تیپ‌بندی عضوها را مشخص می‌کند.

در جدول (۶) نمونه‌هایی از مشخصات گنبدهای بهینه‌سازی شده نشان داده شده است. در این جدول θ_1 و θ_2 زاویه

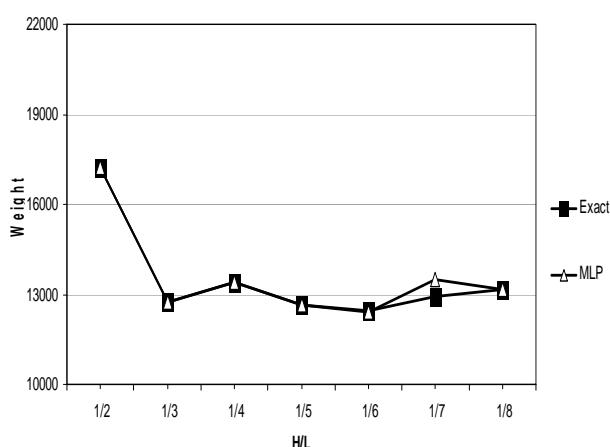
جدول (۶): نمونه هایی از طراحی بهینه سازه های گنبدی دارای پیکربندی های مختلف

وزن بهینه (kg)	θ_2	θ_1	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	دهانه (cm)	نسبت ارتفاع به دهانه	نوع گنبد
3716	-	80.00	-	-	9	17	5	9	2000	1/2	پیکربندی
2858	-	29.07	-	-	9	11	5	10	2000	1/5	
3614	60.00	20.00	9	9	5	2	5	5	2000	1/2	
1416	29.07	14.53	7	7	9	2	5	7	2000	1/5	
20192	-	80.00	-	-	21	27	9	17	4000	1/2	
16092	-	19.38	-	-	21	21	9	21	4000	1/5	
21931	60.00	40.00	17	17	21	5	11	15	4000	1/2	
15400	24.22	14.53	17	17	13	5	10	13	4000	1/5	
4322	-	80.00	-	-	9	17	5	7	2000	1/2	شودر
3343	-	14.53	-	-	11	5	5	7	2000	1/5	
5258	30.00	10.00	13	5	2	5	5	2	2000	1/2	
3421	14.53	9.69	11	3	3	5	5	5	2000	1/5	
24213	-	60.00	-	-	24	24	13	11	4000	1/2	
18764	-	19.38	-	-	24	17	13	21	4000	1/5	
24639	50.00	30.00	24	17	17	13	9	13	4000	1/2	
19525	19.38	9.69	24	13	10	13	17	11	4000	1/5	
4264	-	70.00	-	-	11	9	5	11	2000	1/2	پیوندی دوم
5896	-	38.76	-	-	10	13	5	17	2000	1/5	
1939	50.00	30.00	9	5	5	5	3	5	2000	1/2	
3345	19.38	9.69	11	5	5	5	5	5	2000	1/5	
20717	-	70.00	-	-	21	17	13	24	4000	1/2	
28392	-	33.91	-	-	24	24	13	27	4000	1/5	
28851	20.00	10.00	27	10	9	13	9	8	4000	1/2	
21970	14.53	4.84	27	11	6	13	1	9	4000	1/5	



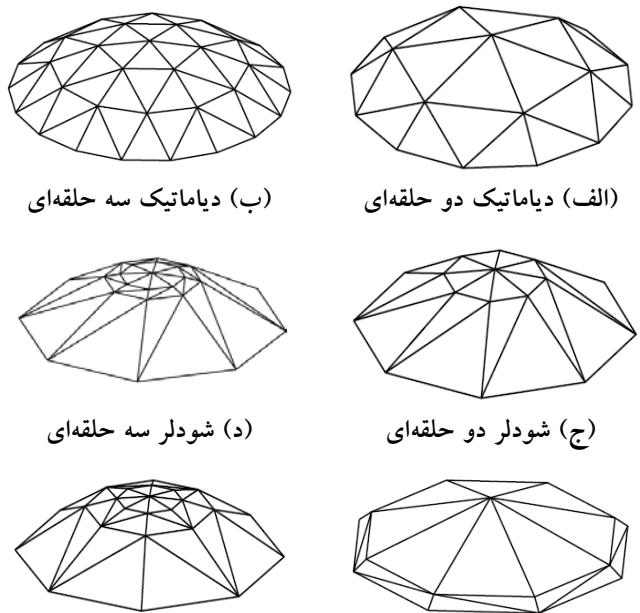
طراحی هر شبکه، از ۶۳ داده استفاده شد، که از آن میان تعداد ۵۴ داده برای آموزش شبکه و تعداد ۹ داده باقیمانده برای آزمایش شبکه در نظر گرفته شدند.

برای انتخاب بهترین شبکه عصبی در تخمین وزن بهینه گنبدها، بیش از ۴۰ نوع شبکه با تعداد لایه‌ها و نرون‌های مختلف آموزش داده شده و در نهایت بهترین شبکه که مشخصات آن در جدول (۷) نشان داده شده است، برای آموزش انتخاب گردید. حال می‌توان با کمک شبکه‌های عصبی طراحی شده، تغییرات وزن بهینه هر نوع از گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه خاص برای قطرهای مختلف را به سرعت و با دقت مناسب به دست آورد. به عنوان نمونه در شکل (۱۶) قابلیت تخمین وزن بهینه برای گنبد دیاماتیک سه حلقه‌ای با دهانه ۳۵ متر به کمک شبکه عصبی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شبکه عصبی از دقت بالایی در تخمین وزن بهینه گنبدها برخوردار می‌باشد.



شکل (۱۶): تخمین وزن بهینه گنبد دیاماتیک سه حلقه‌ای با قطر ۳۵ متر در نسبت‌های دهانه به ارتفاع مختلف به کمک شبکه عصبی

نمونه‌ای از فرم گنبدهای بهینه شده برای دهانه ۲۰ متر و نسبت ارتفاع به دهانه $\frac{1}{5}$ در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۵): نمای گنبدهای بهینه شده با قطر ۲۰ متر و نسبت‌های ارتفاع به دهانه $\frac{1}{5}$

۵- پیش‌بینی وزن بهینه سازه‌های فضاسازی با استفاده از شبکه عصبی

در این مقاله، از نتایج حاصل از طراحی بهینه ۳۷۸ نوع گنبد فضاسازی جهت آموزش شبکه‌های عصبی استفاده شده است. برای این کار، در ابتدا برای هر نوع پیکربندی یک شبکه آموزش داده شد که با توجه به رضایت بخش نبودن نتایج، داده‌های مربوط به هر پیکربندی را در دو رده‌بندی مختلف یکی گنبد دولایه و دیگری گنبد سه لایه قرارداده و در مجموع ۶ شبکه عصبی طراحی گردید. بدین ترتیب برای

جدول (۷): مشخصات بهترین شبکه MLP در آموزش داده‌ها

تابع عملکرد لایه خروجی	تعداد نرون‌های لایه خروجی	تابع عملکرد لایه مخفی	تعداد نرون‌ها در هر لایه مخفی	تعداد ورودی‌ها
خطی همانی	1	Log sigmoid	20 15 15 10 5	2

جدول (۸): مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی با روش ژنتیک الگوریتم

نتایج شبکه عصبی		(GA) وزن بهینه (Kg)	نسبت ارتفاع به دهانه	دهانه (m)	تعداد حلقه	نوع گنبد
درصد خطأ	وزن تخمینی (Kg)					
-2.00	540	551	1/6	1000	2	بُرْج
2.33	8435	8243	1/3	3000	2	
2.58	16507	16092	1/5	4000	2	
-0.61	491	494	1/6	1000	3	
-3.93	12868	13394	1/2	3000	3	
0.19	525	524	1/8	1000	2	
2.14	5814	5692	1/6	2500	2	
4.21	23021	22091	1/6	4000	2	
-0.30	5740	5757	1/5	2500	3	
-0.96	10147	10245	1/7	3000	3	
3.34	43115	41721	1/8	5000	3	بُرج مُدْرَف
-2.72	7149	7349	1/7	2000	2	
0.99	11360	11249	1/4	3000	2	
-0.23	26364	26424	1/3	4500	2	
5.03	564	537	1/7	1000	3	
3.41	3552	3435	1/7	2000	3	
1.92	41215	40440	1/6	5000	3	

قرار گرفته است، امکان تغییر موقعیت حلقه‌های مداری است که به وسیله آن می‌توان طول عضوها و پیکربندی سازه را کنترل نمود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای هر گنبد با دهانه خاص گزینه‌های مختلفی از نظر نوع پیکربندی و همچنین نسبت ارتفاع به دهانه وجود دارد، که با توجه به تصمیم طراح و با کمک نمودارهایی مشابه با آنچه در این مقاله ارائه شد، طرحی با کمترین وزن انتخاب می‌شود.

به منظور کاربردی کردن نتایج این پژوهش، علاوه بر ارائه نمودارهای طراحی، به منظور افزایش سرعت در تخمین وزن بهینه گنبدهای فضاسکار جدید، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان راه حلی کارا استفاده شد. برای این کار از نتایج بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک برای طراحی شبکه‌های عصبی استفاده گردید. با مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی با مقادیر واقعی حاصل از الگوریتم ژنتیک مشخص گردید که عملکرد شبکه‌های طراحی شده بسیار مطلوب می‌باشد.

در جدول (۸) نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی در تخمین وزن بهینه گنبدهای فضاسکار با مقادیر حاصل از الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه شده است. با توجه به مقدار کم خطای می‌توان نتیجه گرفت که تخمین وزن بهینه سازه‌ها با دقت مناسبی انجام گرفته است.

۶- نتیجه

در این مقاله، از روش الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه سازه‌های فضاسکار گنبدی شکل استفاده شده است. برای این کار، برنامه طراحی بهینه گنبدهای فضاسکار به کمک الگوریتم ژنتیک برای گنبدهایی با پیکربندی مختلف نوشته شده و تعداد ۳۷۸ نمونه گنبد با پیکربندی‌های مختلف و با دهانه-هایی از ۱۰ تا ۵۰ متر و نسبت‌های ارتفاع به دهانه از $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{2}$ به صورت بهینه طراحی گردیده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم در روش طراحی بهینه گنبدها که در این مقاله مورد توجه



Journal of Space Structures, 25(4), p.p. 217-227, 2010.

13. Kaveh, A. and Tagatahari, S., "Optimal design of Schweler and ribbed domes via hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm", Journal of Constructional Steel Research, 66, p.p. 412-419, 2010.
14. Kaveh, A. and Tagatahari, S., "Geometry and topology optimization of geodesic domes using charged system search", 43, p.p. 215-229, 2011.
15. Holland, J.H., "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
16. De Souza, R.P. and Fonseca J.S.O., "Optimum truss design under failure constraints combining continuous and integer programming", International Conference on Engineering Optimization, 2008.
1. Topping, B.H.V., "Shape optimization of skeletal structures; A review", Journal of Structural Engineering, 11, p.p. 1933-1951, 1983.
2. Bendsoe, M.P., Ben-tal, A., and Zowe, J., "Optimization methods for truss geometry and topology design", Structural Optimization, 7, p.p. 141-159, 1994.
3. Goldberg, D.E., and Samtani, M.P., "Engineering optimization via genetic algorithms", Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computations, ASCE, p.p. 471-482, 1986.
4. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C.S., "Discrete optimization of structures using genetic algorithms", Journal of Structural Engineering, ASCE, 118 (5), p.p. 1233-1250, 1992.
5. Hajela, P., and Lee, E., "Genetic algorithms in truss topological optimization", International Journal of Solids and Structures, 32, p.p. 3341-3357, 1992.
6. Rajan, S.D., "Sizing, shape and topology optimization of trusses using genetic algorithm", Journal of Structural Engineering, 121(10), p.p. 1480-1487, 1995.
7. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C.S., "Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses", Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(3), p.p. 350-358, 1997.
8. Deb, K., and Gulati, S., "Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms", Finite Elements in Analysis and Design, 37, p.p. 447-465, 2001.
9. Kaveh, A. and Servati, H., "Design of double layer grids using backpropagation neural networks", Computers and Structures, 79, p.p. 1561-1568, 2001.
10. Saka, M.P., "Optimum topological design of geometrically nonlinear single layer latticed domes using coupled genetic algorithm", Computers and Structures, 85, p.p. 1635-1646, 2007.
11. Rahami, H., Kaveh, A. and Gholipour, Y., "Sizing, geometry and topology of trusses via force method and genetic algorithm", Engineering Structures, 30(9), p.p. 2360-2369, 2008.
12. Kaveh, A. and Tagatahari, S., "Optimal design of single layer domes using Meta-Heuristic algorithms; A comparative study", International