

بهینه‌سازی ابعاد سازه‌های فضایی با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش‌های گرادیان

عباس وفایی صفت^۱ و سید حسین طباطبایی^۲

۱. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲. کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

تهران، اتوبان شهید بابایی

Abbas_v@yahoo.com

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های فضایی بهینه‌بودن ابعاد و در نتیجه وزن سازه است. بهینه‌سازی ابعادی عمدتاً به وسیله الگوریتم‌های گرادیان و الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. اصول عملکرد الگوریتم‌های گرادیان بر پایه مشتق تابع هدف و قیود مسئله است. عملکرد این الگوریتم‌ها به نقطه اولیه وابسته است و توانایی جستجوی همه فضای طراحی را ندارند. الگوریتم ژنتیک فضای زیادی را جستجو می‌کند ولی توانایی خیلی نزدیک شدن به نقطه بهینه اصلی را ندارد. در این مقاله، روشی ارائه شده است که فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک شروع شده است و خروجی آن به عنوان نقطه اولیه در الگوریتم گرادیان قرار داده می‌شود. برای ارزیابی روش ارائه شده، این روش برای بهینه‌سازی ابعاد یک نمونه سازه خریایی سه عضوی و یک خریایی ده عضوی و همچنین سازه مشبک آنتن سهموی به کار برده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ابعاد بهینه به دست آمده از روش ترکیب دو الگوریتم نسبت به نتایج الگوریتم ژنتیک برتری دارد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی ابعادی، سازه‌های فضایی، الگوریتم ژنتیک، سازه مشبک آنتن، المان محدود

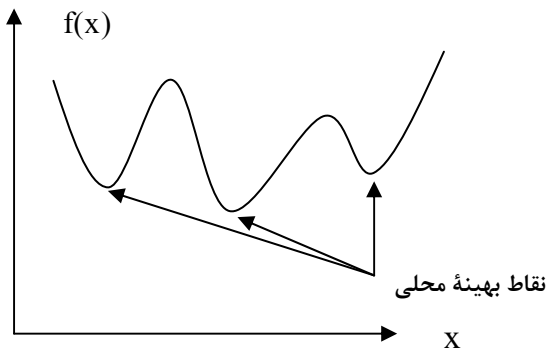
مقدمه

روش گرادیان^۱، روش برنامه مربع متوالی^۲ و روش‌های تقریبی، در بهینه‌سازی سازه موفق بوده است [۲]. بسیاری از این روش‌ها بر اساس بسط سری تیلور تابع هدف و قیود مسئله با توجه به متغیرهای طراحی استوار هستند. ایمای، از روش‌های عددی استوار بر ضرایب لاگرانژ که اغلب به روش اصلی دو گانه^۳ یاد می‌شود، استفاده کرده است [۳-۴]. این روش‌ها قابلیت به کارگیری برای مسائلی با قیود مساوی و نامساوی را دارند. نتیجتاً با انجام تحقیقات وسیع در این زمینه، تکنیک‌های محاسباتی جدیدی از قبیل الگوریتم ژنتیک با قابلیت به کارگیری در مسائل کاربردی متنوع یافت شده است. بلویوس، وانگ، تای و سسوک و همکارانشان فعالیت‌هایی

بهینه‌سازی ابعادی یکی از مراحل مهم در فرآیند طراحی سازه‌های فضایی است. بهینه‌سازی ابعادی به معنای یافتن ابعاد مناسب و بهینه برای یک سازه یا قطعه است و متغیرهای طراحی در این نوع بهینه‌سازی شامل ابعاد و اندازه‌های سازه مورد نظر هستند. تابع هدف معمولاً در این نوع بهینه‌سازی وزن یا استحکام است و قیود مسئله می‌تواند تنش، جابه‌جایی و محدودیت بر متغیرهای طراحی باشند [۶-۲]. فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند توسط روش‌های مختلفی انجام شود ولی فعالیت‌های انجام شده در این زمینه عموماً بر پایه استفاده از الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم‌های مشتقی (گرادیان) استوارند. وندریلت از محققانی است که در اعمال روش‌هایی از قبیل

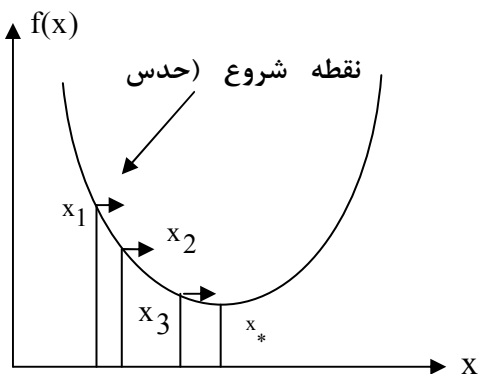
1. Gradient method
2. Sequential quadratic programming
3. Primal dual

کند شده و زمان فرآیند افزایش می‌یابد. عموماً الگوریتم‌های پایه مشتقی هنگامی که به نقطه بهینه نزدیک می‌شوند بهتر عمل می‌کنند [۲].



شکل ۱- تابعی با چندین نقطه بهینه محلی

در شکل (۲) نحوه پیشروی روش‌های گرادیان برای یافتن نقطه بهینه نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایش پیشروی روش‌های گرادیان جهت یافتن نقطه بهینه

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم کارا، کاربردی و بسیار قوی است که براساس قوانین حاکم بر ژن‌های طبیعی استوار است [۹]. این الگوریتم براساس تولید جمعیت زیاد برای یافتن بهترین تقریب‌ها عمل می‌کند و حل بهینه به صورت تدریجی به دست می‌آید. جمعیت در این روش به یک سری از کروموزوم‌ها اطلاق می‌شود و اصولی مانند انتخاب^۳، تقاطع کردن (برش)^۴ و جهش^۵ از اصول مهم در تولید کروموزوم‌ها است [۱۰]. الگوریتم ژنتیک در یافتن نواحی

در زمینه بهینه‌سازی سازه به وسیله الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند [۷-۵]. بنابراین با انجام تحقیقات زیاد و گسترده، زمینه و قلمرو الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سازه توسعه داده شد. به عنوان مثال، علی، بهدینان و فاواز، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی سازه‌های خریایی سه بعدی پرداخته‌اند [۸]. سئوسک و بلویسیوس، با استفاده از الگوریتم ژنتیک توپولوژی سازه‌های خریایی را بهینه‌سازی کرده‌اند [۵]. برخی از محققان نیز در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های پوسته‌ای الگوریتم‌هایی ارائه داده‌اند. به عنوان مثال، آقای زوو و همکاران به وسیله ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی، شکل و ابعاد روشی برای بهینه‌سازی سازه‌های پوسته‌ای ارائه کرده است [۱]. در اغلب روش‌های فوق برای بهینه‌سازی ابعاد، فقط از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک توانایی یافتن نقطه بهینه اصلی را از بین نقاط بهینه مختلف دارد ولی نمی‌تواند به آن نقطه خیلی نزدیک شود. در ادامه درباره الگوریتم‌های مشتقی و الگوریتم ژنتیک، نحوه عملکرد و نتایج آنها بحث شده است. و روشی برای بهینه‌سازی اندازه سازه‌ها با استفاده از هر دو الگوریتم به صورت پیوسته ارائه شده است.

روش‌های گرادیان (مشتقی)

از روش‌های مشتقی در بهینه‌سازی بسیار زیاد استفاده می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش نیوتن رافسون^۱ و گرادیان درهم آمیخته^۲ اشاره کرد. روش این الگوریتم‌ها براساس حرکت در یک مسیر و نگاه محلی برای دیدن جهت حرکت (با استفاده از گرادیان تابع) و پس از آن انتخاب مسیر جدید است بعد از تصمیم اینکه چقدر و تا کجا در طول آن مسیر باید حرکت کرد [۸].

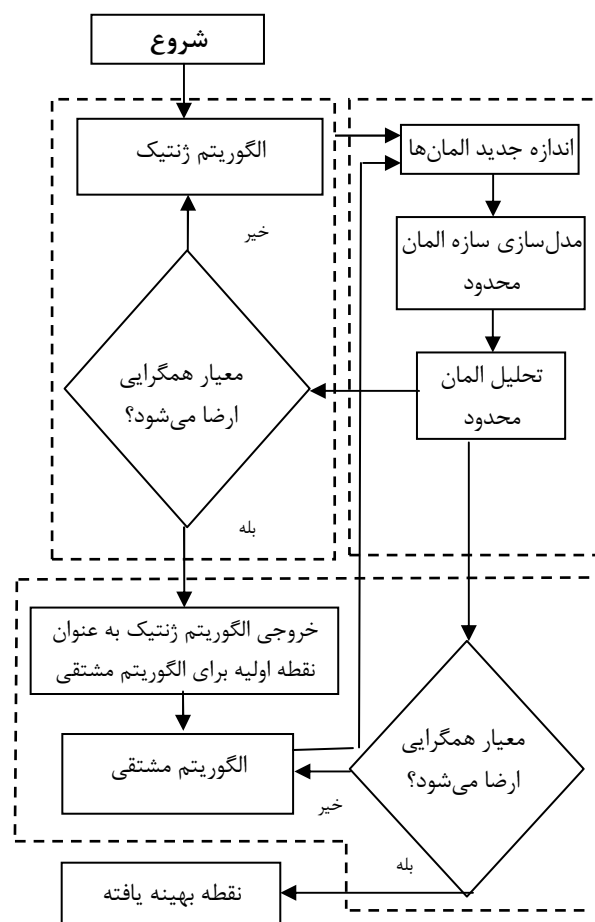
ذکر این نکته ضروری است که اگر تابع، هدف مشتق نداشته باشد، این الگوریتم‌ها قابل استفاده نخواهند بود. الگوریتم‌هایی که اصول عملکردی آنها بر اساس مشتق است برای شروع نیاز به نقطه اولیه دارند و جستجوی آنها به گونه‌ای است که همه نقاط بهینه را نمی‌یابند. آنها زمانی که به نزدیک‌ترین نقطه بهینه محلی (موضعی) که به نقطه اولیه نزدیک است می‌رسند، متوقف می‌شوند. در شکل (۱) تابعی نشان داده شده است که دارای چندین نقطه بهینه محلی است. مزیت این الگوریتم‌ها در این است، هنگامی که به نقطه بهینه نزدیک می‌شوند بهتر عمل می‌کنند و تا حد امکان به نقطه بهینه یافت شده نزدیک می‌شوند. برای یافتن بهینه‌ترین نقطه از توابعی مانند شکل (۱) باید فرآیند بهینه‌سازی را با چندین نقطه اولیه انجام داد. در این الگوریتم‌ها زمانی که تعداد پارامترها زیاد باشد پیشروی

3. Selection
4. Crossover
5. Mutation
6. Generation

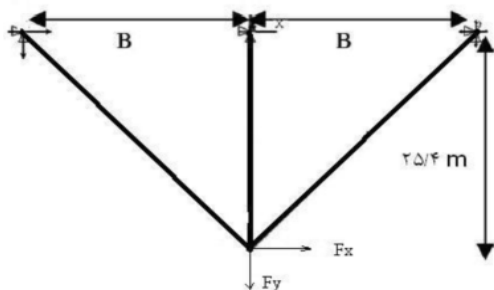
1. Newton Raphson
2. Conjugate Gradient

بهینه‌کردن وزن خرابی سه عضوی

سازه خرابایی سه عضوی در شکل (۴) نشان داده شده است. مشخصات جنس و مقادیر نیروی اعمالی بر سازه نیز در جدول (۱) ارائه شده است. تابع هدف در این طراحی نیز وزن سازه است و مسئله دارای قید جابه‌جایی است که مقدار آن برابر $0/0068$ متر است. متغیرهای طراحی شامل مساحت سطح مقطع سه عضو و فاصله بین دو تکیه‌گاه هستند. سطح مقطع اعضا به صورت میله‌ای در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- نمودار الگوریتم بهینه‌سازی اندازه



شکل ۴- شکل خرابای ۳ عضوی

نزدیک به نقطه بهینه به خوبی عمل می‌کند و به نقطه بهینه نزدیک می‌شود ولی هرگز به صورت مطلق بهینه کلی^۱ را نمی‌دهد [۲، ۵]. می‌توان چنین گفت که الگوریتم ژنتیک جستجوی جامعی را انجام می‌دهد. حال آنکه ضعف آن این است که توانایی زیاد نزدیک شدن به نقطه بهینه را ندارد [۵، ۶ و ۱۰]. حداقل سه نوع مسئله وجود دارد که استفاده از الگوریتم ژنتیک مفید است:

۱- تابع هدف هموار نباشد (یعنی قابل تشخیص نباشد).

۲- چندین نقطه بهینه محلی وجود داشته باشد.

۳- تعداد پارامترها زیاد باشد.

الگوریتم ارائه شده برای سازه

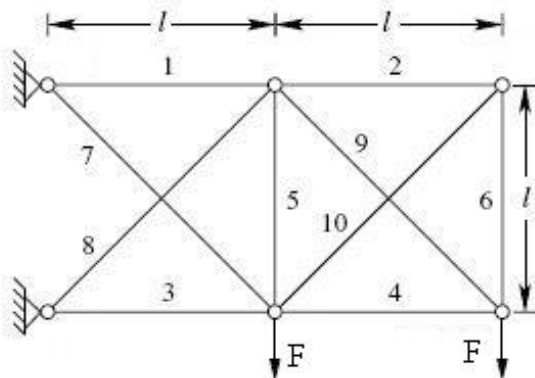
فرآیند بهینه‌سازی ابعادی می‌تواند توسط الگوریتم‌های مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک و روش‌های گرادیان انجام شود. با توجه به مزیت‌های مذکور برای الگوریتم ژنتیک و روش‌های گرادیان، استراتژی مناسب این است که فرآیند بهینه‌سازی ابتدا با الگوریتم ژنتیک شروع شده تا اینکه همه فضای جستجو بررسی شود. سپس جواب بهینه به دست آمده از آن به عنوان نقطه اولیه برای روش‌های گرادیان در نظر گرفته شود تا بدین ترتیب نقطه بهینه اصلی به دست آید.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی زمانی توانایی انجام فرآیند بهینه‌سازی را دارند که بتوانند سازه یا قطعه را مورد تحلیل اجزای محدود قرار دهند. به این ترتیب با مرتبط کردن برنامه بهینه‌سازی و المان محدود می‌توان ابزار لازم برای انجام فرآیند بهینه‌سازی را مهیا کرد. پس از هر تحلیل برنامه بهینه‌سازی خروجی المان محدود را دریافت می‌کند و خروجی خود را به المان محدود می‌دهد. این عمل تا ارضای معیارهای همگرایی و یافتن نقطه بهینه ادامه می‌یابد. فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مشتقی و المان محدود در نمودار شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این روش ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک جستجو آغاز می‌شود و در هر تکرار پس از یافتن ابعاد جدید، الگوریتم مدل المان محدود تغییر داده می‌شود و نتایج تحلیل را گرفته و قیود را بررسی می‌کند.

چنانچه ابعاد جدید، قیود را ارضا نکنند، الگوریتم وارد تکرار بعدی شده، ولی چنانچه قیود را ارضا نکنند جستجوی اولیه در فرآیند بهینه‌سازی متوقف شده و ابعاد یافت شده به عنوان نقطه اولیه برای الگوریتم مشتقی در نظر گرفته می‌شود. پس از آن جستجوی ثانویه آغاز می‌شود به این ترتیب که فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم مشتقی ادامه پیدا می‌کند تا نقطه بهینه یافت شود.

1. Global optimum

خرپای ۱۰ عضوی را نشان می‌دهد. تابع هدف، وزن سازه است و جابه‌جایی به عنوان قید در نظر گرفته شده است. متغیرهای طراحی نیز مساحت سطح مقطع اعضاء هستند. مقادیر مربوط به جنس سازه و قید جابه‌جایی در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۵- شکل خرپای ۱۰ عضوی

جدول ۳- مشخصات جنس سازه و مقدار قید مسئله بهینه‌سازی

ماده	آلومینیوم
مدول یانگ	$68/95 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$
وزن مخصوص	2768 Kg/m^3
تنش مجاز	$0.172375 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
حد جابه‌جایی	$\delta = 5.08 \text{ cm}$
طول l	9.144 m
نیرو	445.4 kN

در این بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به ازای اندازه جمعیت‌های مختلف چندین بار اجراء شده است. این مقادیر در جدول (۴) نشان داده شده است. مقدار تولید برای همه اجراها برابر ۳۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- نتایج اجراهای مختلف الگوریتم ژنتیک

تولید ۳۰۰			
اندازه جمعیت	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
وزن (N)	۲۲۵۹۸	۲۲۵۱۲	۲۲۴۵۰

این مسئله با استفاده از روش ارائه شده حل شده است و نتایج آن با روش‌های دیگر مقایسه شده است. این سازه با استفاده از روش مرتبه اول^۱، روش تقریب زیرمسئله^۲ و الگوریتم ژنتیک بهینه شده است [۸]. نتایج بهینه‌سازی با روش مذکور و سایر روش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات جنس خرپای سه‌عضوی، نیروهای اعمالی و قید مسئله بهینه‌سازی

جنس	نیروها	جابه‌جایی مجاز
$E = 14.48 \text{ Gpa}$ $\rho = 7.86 \text{ Kg/m}^3$	$F_x = 90718 \text{ N}$ $F_y = -90718 \text{ N}$	$u = 0.0068 \text{ m}$

جدول ۲- نتایج بهینه‌سازی سازه خرپای ۳ عضوی شکل (۴) با الگوریتم‌های مختلف

عضو	سطح مقطع اعضای خرپای سه‌عضوی (متر مربع)			
	روش ارائه شده	الگوریتم ژنتیک [۲]	روش تقریب زیر مسئله	روش مرتبه اول
۱	۰/۰۱	۰/۴۵۶۲	۰/۵۱۲۶	۰/۴۴۲۳
۲	۱/۰۰۰۳۳۸	۰/۰۰۰۶۴۵	۰/۰۰۱۹۶۷	۰/۰۰۰۴۰۵
۳	۰	۰/۰۰۱۴	۰/۱۵۲۸	۰/۰۰۰۶۴۵
B (m)	۰/۰۰۰۳۲	۲۵/۲۵	۱۴/۹۸	۲۵/۴۳
وزن (N)	۲۰/۲۹۴	۱۲۹/۴۴۵	۱۵۶/۰۱۶	۱۳۶/۶۳۵
	۱۲۳/۷۰۶			

در بین سه روش قبل الگوریتم ژنتیک جواب بهینه‌تری یافته است. ولی روش ارائه شده نسبت به روش‌های قبل وزن را بیشتر کاهش داده است.

مینیمم کردن وزن خرپای ۱۰ عضوی

یکی از مثال‌های معروف در زمینه بهینه‌سازی ابعاد، مسئله خرپای ۱۰ عضوی است. این خرپا با روش‌های مختلفی بهینه شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. روش‌هایی که با استفاده از آنها این خرپای ۱۰ عضوی بهینه شده شامل روش الگوریتم ژنتیک [۱۱]، مونت کارلو [۱۲] و روش ارائه شده توسط آقایان کریپاکاران و گوپتا [۱۳] هستند. خرپای مذکور از جنس آلومینیوم است و مقاطع اعضای آن به صورت میله‌ای در نظر گرفته شده است. شکل (۵)

1. First order method
2. Subproblem approximation method

آنها حدود ۲۸ کیلوگرم است و در چهار نقطه به گلبرگ متصل می‌شود.



شکل ۶- سازه آنتن سهموی یک ایستگاه زمینی ماهواره‌ای

سازه‌های پشتیبان باید به گونه‌ای طراحی شوند که در برابر باد حداکثر سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت مقاومت کنند [۱۵]. در این حالت فشار ناشی از باد با سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت مطابق زیر خواهد بود:

$$p = c_p \times 0.5 \times \rho \times v^2 \quad (1)$$

$$= 1.7 \times 0.5 \times 1.3 \times \left(\frac{250}{3.6}\right)^2 = 5322 \text{ pa}$$

در رابطه فوق c_p به عنوان ضریب فشار تعریف می‌شود که در این آنتن سهموی برابر ۱/۷ است [۱۴]. از آنجاکه سازه پشتیبان در چهار نقطه به گلبرگ متصل می‌شود، لذا نیروی باد از طریق این چهار نقطه به سازه منتقل می‌شود. با توجه به اینکه سطح هر یک از این گلبرگ‌ها برابر ۲/۳۴۹ متر مربع است، در حالت فشار ۵۳۲۲ پاسکال می‌توان نیروی وارده بر یک سازه پشتیبان را محاسبه کرد:

$$F = P \times A = 5322 \times 2.349 = 12.47 \text{ KN} \quad (2)$$

به این ترتیب مجموع نیروی انتقال یافته به سازه پشتیبان در چهار نقطه برابر ۱۲/۴۷ کیلونیوتن است. در شکل (۷) سازه پشتیبان مشبک که به ۱۴ عضو تقسیم‌بندی شده و همچنین نقاط اتصال سازه به پوسته منعکس کننده نشان داده شده است. مقادیر این چهار نیرو در جدول (۶) ارائه شده است. در جدول (۷) اندازه طول اعضای سازه مشخص شده است. سازه پشتیبان آنتنی که در این تحقیق بهینه شده از جنس آلومینیوم با ضریب پواسون $\nu=0.333$ ، تنش تسلیم $\sigma_y=180 \text{ MPa}$ ، مدول

مطابق روش ارائه شده، خروجی الگوریتم ژنتیک به عنوان نقطه اولیه برای الگوریتم‌های گرادیان در نظر گرفته می‌شود که نتیجه این بهینه‌سازی در جدول (۵) ارائه شده و با روش‌های دیگر مقایسه شده است.

مطابق نتایج به دست آمده روش ارائه شده وزن خرابی ۱۰ عضوی را بیشتر از سایرین کاهش داده است. همان‌طور که گفته شد؛ توانایی روش‌های گرادیان در نزدیک شدن به نقطه بهینه‌ای است که به نقطه اولیه نزدیک است. حال آنکه الگوریتم ژنتیک در یافتن نقطه بهینه اصلی توانایی دارد. پس با پیوستن این دو الگوریتم به یکدیگر می‌توان تا حد امکان به نقطه بهینه نزدیک شد.

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی سازه خرابی ۱۰ عضوی شکل (۵) با الگوریتم‌های مختلف

شماره عضو	روش الگوریتم ژنتیک [11] (cm ²)	روش مونت کارلو [12] (cm ²)	روش کریاکاران و گوینا [۱۳] (cm ²)	روش ارائه شده (cm ²)
۱	۲۰۶/۴۶	۲۰۰/۰۱	۲۰۰/۰۱	۱۸۱/۵۰۹
۲	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۳۱۷۵
۳	۱۵۱/۶۲	۱۲۹/۰۴	۱۵۴/۸۵	۱۹۱/۷۷۳
۴	۱۰۳/۲۳	۹۰/۳۳	۹۳/۵۵	۱۰۸/۵۶۳
۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۵۸۳۲
۶	۰/۶۵	۰/۶۵	۳/۲۳	۱/۶۳۶۸
۷	۵۴/۸۴	۵۱/۶۲	۴۸/۳۹	۲۸/۰۳۴
۸	۱۲۹/۰۴	۱۴۵/۱۷	۱۳۸/۷۲	۱۳۳/۰۳۲
۹	۱۳۲/۲۷	۱۴۵/۱۷	۱۳۵/۴۹	۱۳۱/۱۱۸
۱۰	۰/۶۵	۹۶/۷۸	۰/۶۵	۰/۵۳۲۹
وزن (N)	۲۲۶۵۳/۵۵	۲۵۸۲۹/۷۳	۲۲۵۷۳/۶۸	۲۲۳۰۷

بهینه‌سازی ابعاد مقاطع اعضای سازه پشتیبان آنتن سهموی

کاهش وزن سازه پشتیبان آنتن سهموی ایستگاه‌های زمینی ضمن حفظ استحکام لازم، کنترل حرکت آنتن در ره‌گیری ماهواره را ساده‌تر می‌کند و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. سازه پشتیبان به صورت مشبک است که برای افزایش استحکام پوسته منعکس کننده در مقابل نیروهایی از قبیل باد، در پشت آن قرار می‌گیرد [۱۴]. شکل (۶) سازه آنتن سهموی یک ایستگاه زمینی را نشان می‌دهد.

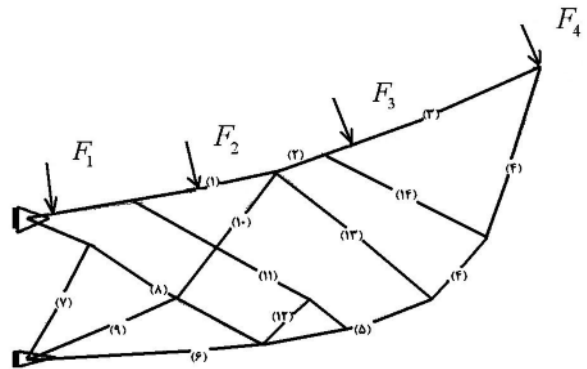
در این تحقیق سازه یک آنتن ۸/۲ متری بهینه‌سازی شده است. آنتن مذکور ۲۴ عدد سازه پشتیبان دارد که وزن هر یک از

مقاطع اعضای سازه مذکور به صورت قوطی است.

الاستیسیتیته $E=71.7 \text{ GPa}$ و چگالی $\rho=2768 \text{ Kg/m}^3$ است.

جدول ۶- مقادیر نیروهای وارد بر سازه پشتیبان

نیرو	مقدار (نیوتن)
F_1	۴۷۰
F_2	۳۳۰۰
F_3	۴۰۰۰
F_4	۴۷۰۰



جدول ۷- طول اعضای سازه پشتیبان

شماره عضو	طول (متر)
۱	۱/۶۲
۲	۰/۹
۳	۰/۹۳۱
۴	۱/۶۹
۵	۱/۱۴۵
۶	۱/۵
۷	۰/۸۰۴
۸	۱/۷۱۳
۹	۱/۰۲۷
۱۰	۱/۰۵۴
۱۱	۱/۵۸۶
۱۲	۰/۴۲۴
۱۳	۱/۲۹۹
۱۴	۱/۱۸

شکل ۷- نمای دو بعدی سازه مشبک پشتیبان به همراه شرایط مرزی

در این طراحی اندازه ضلع مربع داخلی اعضا به عنوان متغیرهای طراحی و ضخامت برای همه مقاطع برابر ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. تابع هدف وزن سازه و قیود طراحی شامل قید تنش در اعضاست.

$$\text{Min } W = \rho g \sum_{i=1}^n ((x_i + 2t)^2 - x_i^2) l_i \quad (3)$$

$$\text{S.t } \sigma_i \leq 80 \text{ MPa}$$

در رابطه فوق، n تعداد مقاطع (اعضا)، x_i اندازه ضلع مربع داخلی هر مقطع، l_i طول هر عضو و t ضخامت مقطع اعضاست.

جدول ۸- نتایج بهینه سازی ابعاد سازه بر اساس الگوریتم های مشتقی

اندازه ضلع مربع داخلی هر مقطع (متر)				شماره مقطع
نقطه شروع ۰/۰۹ متر		نقطه شروع ۰/۰۷ متر		
الگوریتم نقطه داخلی	الگوریتم مجموعه فعال	الگوریتم نقطه داخلی	الگوریتم مجموعه فعال	
۰/۰۸۲۷	۰/۰۷۶۲	۰/۰۸	۰/۰۷۸۶	۱
۰/۰۸۴۸	۰/۰۷۱۱	۰/۰۸	۰/۰۷۴۱	۲
۰/۰۸۶۲	۰/۰۸۹۵	۰/۰۷	۰/۰۶۴	۳
۰/۰۸۵۴	۰/۰۷۴۵	۰/۰۷	۰/۰۶۹۲	۴
۰/۰۸۶	۰/۰۶۹۷	۰/۰۷	۰/۰۶۹۱	۵
۰/۰۸۵۶	۰/۰۸۰۴	۰/۰۷	۰/۰۷۱۶	۶
۰/۰۸۶۴	۰/۰۹۰۶	۰/۰۷	۰/۰۷۰۶	۷
۰/۰۸۵۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷	۰/۰۶۹۸	۸
۰/۰۸۶۱	۰/۰۸۷۹	۰/۰۷	۰/۰۶۹۴	۹
۰/۰۸۶۱	۰/۰۸۴۵	۰/۰۷	۰/۰۶۵۷	۱۰
۰/۰۸۵۵	۰/۰۸۰۳	۰/۰۷	۰/۰۶۸۷	۱۱
۰/۰۸۶۸	۰/۰۹۸۵	۰/۰۷	۰/۰۷۰۳	۱۲
۰/۰۸۵۸	۰/۰۸۵۷	۰/۰۷	۰/۰۶۸۸	۱۳
۰/۰۸۶	۰/۰۸۸۶	۰/۰۷	۰/۰۶۸۸	۱۴
۴۰/۱۳	۳۷/۶۴	۳۴/۹	۳۴/۰۴۶	جرم (کیلوگرم)
۱۴۲	۱۳۰۰	۲۲۲	۲۵۲	تعداد تکرار
۶:۶۴"	۴۵:۷۰"	۷:۷۳"	۱۰:۱۸"	زمان CPU

جدول ۹- نتایج بهینه‌سازی ابعاد سازه بر اساس الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ارائه شده

اندازه ضلع مربع داخلی هر مقطع (متر)		شماره مقطع
الگوریتم مجموعه فعال	ژنتیک الگوریتم	
۰/۰۵۷۰	۰/۰۸۲	۱
۰/۰۷۶۰۱	۰/۱۰۳	۲
۰/۰۶۱۶۲	۰/۰۹۲	۳
۰/۰۲۶۳۴	۰/۰۴۹	۴
۰/۰۲۳۴۵	۰/۰۲۹	۵
۰/۰۲۷۱۰	۰/۰۳۳	۶
۰/۰۰۴۵۲	۰/۰۰۸	۷
۰/۰۳۶۷	۰/۰۳۴۲	۸
۰/۰۳۷۶۹	۰/۰۵۴۲	۹
۰/۰۸۶۵۸	۰/۱۰۳	۱۰
۰/۰۰۲۹۳	۰/۰۰۸	۱۱
۰/۰۰۳۸۸	۰/۰۰۵	۱۲
۰/۰۲۰۰۶	۰/۰۲۴	۱۳
۰/۰۲۲۷۴	۰/۰۴۳	۱۴
۱۹/۶۲	۲۴/۶۶	جرم (کیلوگرم)
۲۸۷۶	۱۹۶۵۲۵	تعداد تکرار
۳۶:۷۵"	۳۵۲۸'	زمان CPU

بحث و نتیجه‌گیری

مطابق آنچه نشان داده شد، نتیجه بهینه‌سازی به‌دست آمده از الگوریتم‌های مشتقی به نقطه اولیه بستگی دارند. دلیل این مسئله آن است که تابع هدف چندین نقطه بهینه محلی دارد و هر بار با در نظر گرفتن نقطه شروع متفاوت، الگوریتم پس از چندین تکرار به نقطه بهینه محلی‌ای که به نقطه شروع نزدیک‌تر است، می‌رسد و آن را به‌عنوان نقطه بهینه اصلی می‌یابد. به همین علت برای توابعی که چندین نقطه بهینه محلی دارند استفاده از روش‌های گرادیان (مشتقی) مناسب نیست. از آنجا که الگوریتم ژنتیک فضای جستجوی زیادی را بررسی می‌کند و از بین نقاط بهینه محلی، بهترین نقطه (نقطه بهینه اصلی) را می‌یابد، لذا استفاده از آن در این نوع مسائل مفید است. بهترین روش آن است که از الگوریتم ژنتیک برای یافتن نقطه بهینه اصلی استفاده شود و سپس خروجی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ورودی برای الگوریتم‌های مشتقی در نظر گرفته شود تا بهینه‌ترین نقطه به‌دست آید.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مسئله خرپای ده عضوی و خرپای سه عضوی مشاهده می‌شود که روش مذکور توانسته است نسبت به روش‌های دیگر وزن را بیشتر کاهش دهد و لذا روشی مناسب برای بهینه‌سازی اندازه نسبت به سایر روش‌های موجود باشد. از آنجا که الگوریتم ژنتیک فضای جستجوی زیادی را بررسی می‌کند لذا در مسائلی که تعداد متغیرهای طراحی افزایش می‌یابد،

نتایج بهینه‌سازی سازه به‌وسیله الگوریتم‌های مشتقی

فرآیند بهینه‌سازی ابتدا به‌وسیله الگوریتم‌های مشتقی انجام شده است. دو الگوریتم معروف از الگوریتم‌های مشتقی الگوریتم مجموعه فعال^۱ و نقطه داخلی^۲ هستند که نتایج بهینه‌سازی ابعاد اعضای سازه بر اساس آنها برای نقاط شروع مختلف ارائه شده است. در جدول (۸) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مشتقی و با نقطه شروع ۰/۰۷ متر برای تمام اعضاء نشان داده شده است. این اطلاعات شامل اندازه ضلع مربع داخلی مقاطع ۱۴ عضو (متر)، وزن سازه، تعداد تکرار و زمان (دقیقه) بهینه‌سازی الگوریتم‌هاست.

همچنین در جدول (۸) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مشتقی و با نقطه شروع ۰/۰۹ متر نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده از دو الگوریتم مجموعه فعال و نقطه داخلی تقریباً به یکدیگر نزدیک است. حال آنکه الگوریتم نقطه داخلی در تعداد و زمان کمتری به نتیجه می‌رسد ولی دقت الگوریتم مجموعه فعال بیشتر است.

نتایج بهینه‌سازی سازه به‌وسیله الگوریتم ژنتیک

در این مسئله الگوریتم ژنتیک با تعداد تولید ۲۰۰، اندازه جمعیت^۳ ۲۵، احتمال برش^۴ ۵۰٪ و احتمال جهش^۵ ۱۰٪ فرآیند را آغاز کرده است. نتیجه بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم اشتقاقی و در نظر گرفتن نتایج الگوریتم ژنتیک به‌عنوان نقطه اولیه مطابق جدول (۹) است. از آنجا که الگوریتم مجموعه فعال دقت بیشتری نسبت به نقطه داخلی دارد، بنابراین از آن برای بهینه‌سازی استفاده شده است. بنابراین نتایج بهینه‌سازی ابعاد سازه پشتیبان مطابق جدول (۹) است. جرم نهایی به‌دست آمده از بهینه‌سازی برای مقاطع قوطی ۱۹/۲۳۲ کیلوگرم خواهد شد. از آنجا که جرم اولیه یک سازه پشتیبان آتن ۸/۲ متری حدود ۲۸ کیلوگرم است می‌توان گفت سازه حدود ۳۲ درصد (۸/۷۶ کیلوگرم) کاهش جرم یافته است. نظر به اینکه آتن مذکور دارای ۲۴ عدد سازه پشتیبان است، پس جرم کل سازه حدود ۲۱۰/۲۴ کیلوگرم کاهش یافته است.

1. Active-set
2. Interior-point
3. Population size
4. Crossover probability
5. Mutation probability

Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2005

- [7] Šešok, D. and Belevičius, R., "Use of Genetic Algorithms in Topology Optimization of Truss Structures", *Mechanika*, Vol. 64, No.2, 2007, pp.34-39.
- [8] Ali, N., Behdinan, K. and Fawaz, Z., "Applicability and Viability of a GA Based Finite Element Analysis Architecture for Structural Design Optimization", *Computers and Structures*, Vol. 81, Issues 22-23, 2003, pp. 2259-2271.
- [9] Marcelin, J. L., "Genetic Search Applied to Selecting Support Positions in Machining of Mechanical Parts", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 5, 2001, pp. 344-347
- [10] Kaya, N. and Öztürk, F., "Topological Machining Fixture Layout Synthesis Using Genetic Algorithms", *International ANSYS Conference*, Pittsburgh, USA, 2004
- [11] Rajeev S., Krishnamoorthy CS. "Genetic Algorithms-based Methodologies for Design Optimization of Trusses," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 350-358.
- [12] Elperin T., "Monte-Carlo Structural Optimization in Discrete Variables With Annealing Algorithm". *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 26, Issue 4, 1988, pp. 815-821.
- [13] Kripakaran, P., Gupta, A. and Baugh Jr., J.W. "A Novel Optimization Approach for Minimum Cost Design of Trusses," *Computers and Structures*, Vol. 85, Issues 23-24, 2007, pp. 1782-1794,
- [14] Richards, C. J., *Mechanical Engineering in Radar and Communications*, Plessey Radar Ltd, Plessey Electronics Group, Edit 1, Van Nostrand Reinhold Company, 1969.
- [15] TIA/EIA Standards, TIA/EIA 222-F, "Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures", *Telecommunications Industry Association*, 1996.

زمان جستجو توسط الگوریتم ژنتیک افزایش می‌یابد که این مطلب به عنوان یکی از نقاط ضعف این روش است.
مطابق نتایج به دست آمده، جرم سازه مشبک آنتن سهموی پس از بهینه‌سازی حدود ۱۹ کیلوگرم است که با توجه به جرم سازه که حدود ۲۸ کیلوگرم است، می‌توان گفت که این سازه در حدود ۹ کیلوگرم (۳۲ درصد) کاهش جرم داشته است.

مراجع

- [1] Zhou, M., Pagalapati, N., Thomas, H. L. and Shyy, Y. K., "An Integrated Approach to Topology, Sizing, and Shape Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, No. 5, 2004, pp. 308-317.
- [2] Vanderplaats G. N., *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, 1984.
- [3] Imai, K., Configuration Optimization of Trusses by the Multiplier Method, Mechanics and Structures Department, School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, Report No. UCLA-Eng-7842, 1978.
- [4] Hoppe, R. H. W., Petrova, S. I. and Schulz, V., "Primal-Dual Newton-Type Interior-Point Method for Topology Optimization", *Journal Of Optimization Theory And Applications*, Vol. 114, No. 3, pp. 545-571, 2002
- [5] Wang, S.Y. and Tai, K., "Graph Representation for Structural Topology Optimization Using Genetic Algorithms", *Computers and Structures*, Vol. 82, Issues 20-21, pp. 1609-1622, 2004.
- [6] Tai, K., and Prasad, J., "Multiobjective Topology Optimization Using a Genetic Algorithm and a Morphological Representation of Geometry", *6th World*