

بهینه‌یابی دکل‌های انتقال نیرو به کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی

علی کاوه (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

یعقوب قلی‌پور (دانشیار)

حسین رحامی (استادیار)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

دکل‌های انتقال نیرو از اجزای مهم و اصلی خطوط انتقال نیرو هستند که در برقرسانی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. دکل‌های انتقال نیرو ضمن این که عهده‌دار نگهداری هادی‌ها در فاصله‌ی معینی از زمین هستند، باید قادر به تحمل نیروهای مکانیکی وارده بر خود در بدترین شرایط محیطی و جوی باشند. با توجه به تعدد اعضای این سازه‌ها و هزینه‌ی بالای هر یک، هم از نظر مصالح و هم اجرا، بهینه‌سازی آنها می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. این سازه‌ها معمولاً تحت اثر ترکیب بارگذاری‌های متعدد قرار گرفته و در روند بهینه‌سازی با تحلیل‌های متعدد روبه‌رو خواهیم بود. در این گزارش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. یکی از مشکلات موجود در استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌یابی سازه‌ها این است که باید به‌ازای هر رشته، هر نسل از یک برنامه‌ی تحلیل‌گر محاسبات مربوط را انجام دهد. چنین امری مستلزم معکوس‌سازی ماتریس‌ها است. در بررسی دکل‌ها دیده شد که با زیاد شدن اعضا و نیز در شرایطی که بهینه‌یابی هندسه‌ی دکل نیز مد نظر باشد، هم‌گرایی این روش بسیار کند است. در این شرایط از ترکیب شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. به این ترتیب که وظیفه‌ی قسمتی از تحلیل دکل به عهده‌ی شبکه است. استفاده از شبکه در کنار ژنتیک سرعت هم‌گرایی را بسیار بالا می‌برد. الگوریتم ژنتیک نیز چندجمعیتی انتخاب شده است. به‌طور خلاصه هدف از این نوشتار تأثیر به‌کارگیری شبکه و عدم استفاده از آن و نیز مقایسه تأثیر استفاده از ژنتیک چندجمعیتی است.

alikhavah@iust.ac.ir
ygpoor@ut.ac.ir
hrahami@iust.ac.ir

واژگان کلیدی: دکل‌های انتقال نیرو، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

خوردگی یا زنگ‌زدگی در محیط‌های خورنده و در نتیجه نیاز به تعمیرات و سرویس بیشتر.

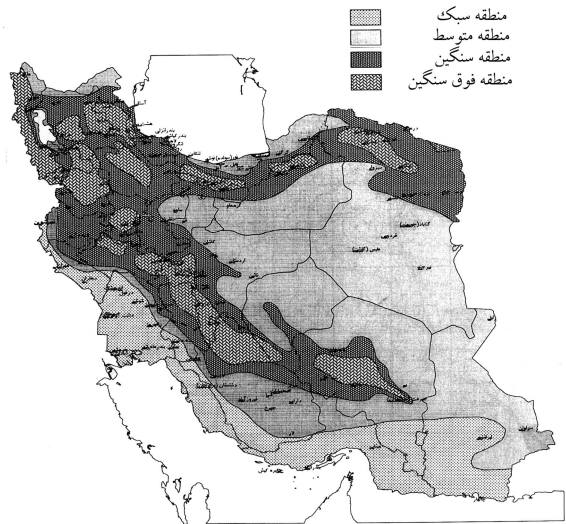
دکل‌های انتقال نیرو در خطوط انتقال ولتاژ بالا، با دهانه‌های بلند کاربرد دارند. این دکل‌ها چون از قابلیت طراحی بر مبنای شرایط محیطی مسیر برخوردارند، کاربرد بسیار گسترده‌ی در خطوط انتقال نیرو دارند. امکان بهره‌گیری از این نوع دکل‌ها در شرایط بار مکانیکی متفاوت و نیز ساخت و احداث آن‌ها برای خطوط چندمداره از دیگر خصوصیات مطلوب آنها است. مزایا و معایب این نوع دکل‌ها در مقایسه با سایر پایه‌های انتقال نیرو، در ادامه ارائه می‌شود. مزایای استفاده از این دکل‌ها عبارت‌اند از: امکان استفاده‌ی آن‌ها در دهانه‌های خیلی بلند، تقلیل آثار سوء برخورد صاعقه با دکل‌ها، انعطاف‌پذیری آن‌ها در مقابل نیروهای مکانیکی، سهولت حمل و نقل، سهولت مونتاژ و نصب در شرایط منطقه، امکان ساخت با ارتفاع‌های مختلف، برخورداری از عمر طولانی‌تر، سهولت طراحی و ساخت آن‌ها برای شرایط متفاوت محیطی و سهولت تعمیرات و جایگزینی قطعات. معایب این دکل‌ها نیز در مقایسه با سایر پایه‌ها عبارت است از: نیاز به فونداسیون بیشتر، نیاز به مواد و مصالح بیشتر، پهنای بیشتر، افزایش زمان نصب، امکان جدا شدن و جدا کردن نشی‌ها، امکان

بارگذاری دکل‌های انتقال نیرو

دکل‌های خطوط انتقال نیرو سازه‌هایی هستند که برای نگهداری سیم‌های جریان فشارقوی طراحی می‌شوند؛ و بنابراین باید برای شرایط مختلفی که در طول عمر خط انتقال پیش خواهد آمد بارگذاری شده و طراحی شوند.

بارگذاری دکل‌ها بر اساس نیروی اعمال‌شده توسط سیم‌ها و زنجیره‌ی مقرر در محل اتصال آن به دکل صورت می‌گیرد. بنابراین برای سادگی محاسبه، نیروهای مذکور را در محل اتصال سیم‌ها و زنجیره به دکل در سه جهت قائم، افقی و طولی تجزیه و جدا از یکدیگر محاسبه می‌کنیم. در محاسبه‌ی این نیروها شرایط بارگذاری

نقشه پهنه بندی مناطق چهارگانه آب و هوایی کشور



شکل ۱. نقشه‌ی پهنه‌بندی مناطق چهارگانه‌ی بارگذاری کشور.

محاسبه‌ی نیروی افقی^۳

نیروی افقی حاصل از فشار باد بر سطح سیم با توجه به سرعت مبنای باد، برای هر منطقه از جدول ۱ استخراج و براساس یک فرمول مشخص محاسبه می‌شود. همچنین در کلیه‌ی دکل‌های زاویه و در دکل‌های آویزی وقتی که دکل با زاویه نسبت به امتداد خط طراحی می‌شود مؤلفه‌ی عرضی نیروی کششی سیم به صورت نیروی افقی ظاهر می‌شود که مقدار آن قابل محاسبه است.

محاسبه‌ی نیروی طولی^۴

نیروی طولی حاصل از اختلاف مؤلفه‌ی طولی نیروی کشش سیم در دو دهانه‌ی مجاور دکل باید محاسبه شود. در حالت بارگذاری غیرمتعادل، شرایط بارگذاری در دهانه‌های دو طرف دکل یکسان نبوده و نیروهایی به صورت غیرمتعادل -- علاوه بر نیروهای محاسبه‌شده در بخش قبل -- ظاهر می‌شود که لازم است در روابط مربوطه اصلاحاتی صورت پذیرد.

بار ناشی از وزن دکل

وزن دکل عبارت است از مجموع وزن اعضای تشکیل‌دهنده‌ی دکل شامل نبشی‌ها و صفحه‌های نگه‌دارنده و پیچ و مهره و واشر که در هر مقطع از دکل (پانل) محاسبه و به صورت نیروی قائم در طراحی در نظر گرفته می‌شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی نیروی حاصل از وزن دکل در دستورالعمل طراحی دکل آمده است. باید توجه داشت که در محاسبه‌ی وزن دکل، در صورت وجود یخ از وزن یخ روی اعضا صرف نظر می‌شود.

بار ناشی از فشار باد روی دکل

فشار باد روی سطح اعضای دکل به صورت نیروی عرضی در طراحی دکل اعمال می‌شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی سطح بادخور دکل و فشار باد روی دکل در دستورالعمل طراحی دکل آمده است.

ضرایب اضافه بار

روش طراحی دکل‌های انتقال نیرو مبتنی بر روش بارهای نهائی است. در این روش بارهای طراحی قبلاً با توجه به ارزش و کیفیت آنها در ضرایب بار متفاوتی ضرب می‌شوند. در این روش تنش‌های نهائی ایجاد شده در اعضای دکل با تنش تسلیم آنها مقایسه می‌شوند. ضرایب پیشنهادی این دستورالعمل در جدول ۲ آورده شده است.

مبنای طراحی

مبنای طراحی دکل‌ها در آئین‌نامه‌های مختلف آمده است.^[۳-۶] در اینجا صرفاً ضوابط مرتبط با تنش‌های فشاری ارائه می‌شود. تنش فشاری مجاز با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

منطقه‌ی که خط انتقال در آن احداث خواهد شد در نظر گرفته می‌شود. شرایط بارگذاری شامل مقادیر سرعت مبنای باد، مقدار یخ و حالات مختلف بارگذاری از نقشه‌ی پهنه‌بندی ایران قابل استخراج است (جدول ۱).

در طراحی خطوط انتقال نیرو، دسترسی به مشخصه‌ی آب و هوایی واقعی یکی از نیازهای اساسی است. شرایط آب و هوایی مناطق مختلف که مسیر خطوط انتقال نیرو از آنها می‌گذرد، در انتخاب شرایط بارگذاری مناسب و طراحی و محاسبات مکانیکی برای تجهیزات خطوط انتقال نیرو، و در نتیجه بهینه‌کردن مشخصات خط به لحاظ فنی و اقتصادی و تأمین قابلیت اعتماد مورد نظر نقش تعیین‌کننده دارد. به دلیل در دسترس نبودن آمار هواشناسی دقیق و جامع مورد نیاز برای انتخاب شرایط بارگذاری مناسب برای خطوط انتقال نیرو در مناطق مختلف کشور، تعیین شرایط بارگذاری بر مبنای مشخصات طراحی خطوط موجود و تطبیق شرایط منطقه با مشخصه‌ی آب و هوایی بعضی از استانداردهای طراحی بین‌المللی به خصوص استاندارد بارگذاری دکل‌ها در آمریکا (NESC)^۱ انجام گرفته است.

در ایران، نقشه‌ی پهنه‌بندی آب و هوایی کشور با استفاده از آمار هواشناسی ایستگاه‌های موجود در سطح کشور و پردازش این اطلاعات، و نیز نقشه‌های پهنه‌بندی قدیمی موجود در شرکت مشاور تهیه شده است (شکل ۱). بارهای روی دکل شامل مؤلفه‌های قائم، افقی، طولی و ترکیباتی از آنها است که آئین‌نامه‌ی بارگذاری مربوطه به آن پرداخته است.^[۱-۲] در ادامه خلاصه‌ی نکات این آئین‌نامه -- بدون ذکر فرمول‌های مربوطه -- ارائه می‌شود.

محاسبه‌ی نیروی قائم^۲

بارهای قائم شامل بار قائم حاصل از وزن سیم، بار قائم حاصل از وزن یخ، و بار قائم حاصل از وزن مقره و یراق‌آلات است. با توجه به شرایط آب و هوایی مسیر خطوط انتقال، به خصوص در مناطق کوهستانی، تشکیل یخ روی سیم هادی و محافظ محتمل است. همچنین بار حاصل از وزن مقره و یراق‌آلات با توجه به نقشه‌ی زنجیره‌ی مقره براساس تعداد مقره و وزن هر مقره و وزن ملحقات زنجیره بایستی محاسبه شود.

جدول ۱. شرایط بارگذاری برای مناطق چهارگانه‌ی آب و هوایی کشور (براساس پهنه‌بندی ایران).

(الف)

مقدار ثابت kg/m	باد m/s (kg/m ²)	یخ (ضخامت شعاعی) mm	درجه حرارت	نوع بارگذاری			نوع منطقه
				استاندارد	بارگذاری	متعادل	
-	۲۸(۵۰)	-	۱۵	باد متوسط	بارگذاری متعادل	سبک (۱)	
۰٫۰۷	۲۶٫۵(۴۴)	-	-۱	NESC-HEAVY			
-	۴۵(۱۲۶)	-	۰	باد شدید	حدی		
-	۲۲(۳۰)	۶	-۵	یخ و باد			
-	۴۵(۱۲۶)	-	۰	بار طولی نامتعادل - پارگی سیم در باد شدید	بارگذاری غیرمتعادل		
-	۲۲(۳۰)	۶-۰	-۵	بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف آسیان - باد بدون یخ در طرف دیگر			
-	-	-	۲۵	شرایط EDS			
-	-	-	-۵	حداقل درجه حرارت			
-	-	-	۵۰ - ۵۵*	حداکثر درجه حرارت			
-	۲۵(۴۰)	۷	-۱۰	یخ و باد متوسط	بارگذاری متعادل	متوسط (۲)	
۰٫۲۵	۱۷٫۸(۲۰)	۶٫۵	-۱۰	NESC-MEDIUM			
-	۴۰(۱۰۰)	-	۱۵	باد شدید	حدی		
-	-	۱۵	-۵	یخ سنگین			
-	-	۱۵	-۵	بار طولی نامتعادل-پارگی سیم در یخ سنگین	بارگذاری غیرمتعادل		
-	۲۵(۴۰)	۷-۰	-۱۰	بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف آسیان - باد بدون یخ در طرف دیگر			
-	-	-	۲۰	شرایط EDS			
-	-	-	-۲۰	حداقل درجه حرارت			
-	-	-	۴۵-۴۰	حداکثر درجه حرارت			

(ب)

مقدار ثابت kg/m	باد m/s (kg/m ²)	یخ (ضخامت شعاعی) mm	درجه حرارت	نوع بارگذاری			نوع منطقه
				استاندارد	بارگذاری	متعادل	
-	۲۰(۲۵)	۱۵	-۲۰	باد متوسط	بارگذاری متعادل	سنگین (۳)	
۰٫۴۵	۱۷٫۸(۲۰)	۱۲٫۵	-۲۰	NESC-HEAVY			
-	۴۰(۱۰۰)	-	۱۵	باد شدید	حدی		
-	-	۲۰ - ۲۵*	-۵	یخ و باد			
-	-	۲۰ - ۲۵*	-۵	بار طولی نامتعادل - پارگی سیم در باد شدید	بارگذاری غیرمتعادل		
-	۲۰(۲۵)	۱۵ - ۰	-۲۰	بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف آسیان - باد بدون یخ در طرف دیگر			
-	-	-	۱۸	شرایط EDS			
-	-	-	-۲۵	حداقل درجه حرارت			
-	-	-	۳۵-۴۰	حداکثر درجه حرارت			
-	۲۰(۲۵)	۲۰	-۲۰	یخ و باد متوسط	بارگذاری متعادل	فوق سنگین (۴)	
-	۴۰(۱۰۰)	-	۱۵	باد شدید			
-	-	۳۰ - ۵۰**	-۵	یخ سنگین	حدی		
-	-	۳۰ - ۵۰**	-۵	بار طولی نامتعادل-پارگی سیم در یخ سنگین			
-	۲۰(۲۵)	۲۰-۰	-۲۰	بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف آسیان - باد بدون یخ در طرف دیگر	بارگذاری غیرمتعادل		
-	-	-	۱۵	شرایط EDS			
-	-	-	-۳۰	حداقل درجه حرارت			
-	-	-	۳۰	حداکثر درجه حرارت			

* ارتفاع از سطح دریا: ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر - ۲۰ میلی‌متر ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متر - ۲۵ میلی‌متر

** ارتفاع از سطح دریا: ۲۵۰۰-۳۰۰۰ متر - ۳۰ میلی‌متر ۳۵۰۰-۴۰۰۰ متر - ۳۵ میلی‌متر ۴۰۰۰-۴۵۰۰ متر - ۴۰ میلی‌متر ۴۵۰۰-۵۰۰۰ متر - ۵۰ میلی‌متر

جدول ۲. ضرایب اضافه بار.

ضرایب اضافه بارهای وارده از سیم روی دکل			نوع بارگذاری	
<i>S.F.w</i>	<i>S.F.t</i>	<i>S.F.v</i>	بارگذاری استاندارد	بارگذاری متعادل
۲٫۵	۱٫۶۵	۱٫۵	باد و یخ و باد متوسط	NESC LIGHT NESC MEDIUM NESC HEAVY
۲٫۵	۱٫۶۵	۱٫۵	باد شدید	
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۱	یخ سنگین	
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۱	پارگی سیم	بارگذاری حدی
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۱	یخ و باد در یک طرف دهانه باد بدون یخ در طرف دیگر	بارگذاری غیرمتعادل

S.F.w: ضریب اضافه بار برای نیروی قائم

S.F.t: ضریب اضافه بار برای نیروی افقی و طولی ناشی از کشش سیم

S.F.v: ضریب اضافه بار برای نیروی افقی ناشی از فشار باد

الف) برای اعضای با بار محوری در دو انتهای طول مهارنشده

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}$$

ب) برای اعضای که در یک انتها بار محوری و در انتهای دیگر دارای خروج از مرکزیت هستند و $\frac{L}{r}$ آنها از مقدار ۱۲۰ کم تر است:

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75 \frac{L}{r}$$

ج) برای اعضای که در هر دو انتها دارای خروجی از مرکزیت هستند و $\frac{L}{r}$ آنها از ۱۲۰ کم تر است:

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0.5 \frac{L}{r}$$

طراحی اعضای فرعی

برای اعضای فرعی دو نوع کنترل صورت می‌گیرد:

۱. برای اعضای که با محور افقی زاویه‌ی کم‌تر از ۳۰ درجه دارند تحمل بار قائم ۱۵۰ کیلوگرم توسط عضو فرعی کنترل می‌شود.

۲. برای کلیه اعضای فرعی لاغری کم‌تر از ۲۵۰ کنترل می‌شود.

بهینه‌سازی دکل‌ها

روش ژنتیک یک نوع جست‌وجوی اتفاقی است که در حل مسئله‌های گسسته قابلیت‌های فراوانی دارد. این شیوه‌ی بهینه‌سازی با متغیرهای طراحی به صورت رشته‌هایی با طول معین که به صورت ۰ و ۱ رمزگذاری شده‌اند، کار می‌کند. هر یک از این رشته‌ها همانند کروموزوم در یک دستگاه زنده بوده و رمزهای دودویی ۰ و ۱ مشابه ژن‌ها است. هر رشته نماینده‌ی یک طرح است. فنون ژنتیکی سرشت تکراری دارند که با تعدادی طرح از پیش تعیین شده کار می‌کنند. تکرار هر گام یک نسل نامیده می‌شود. با توجه به معیار کیفی که صلاحیت نام دارد، طرح‌های مطلوب‌تر برای تولید نسلی بهتر انتخاب، و با عملگرهایی همانند تکثیر، پیوند و جهش، نسل جدیدی با صلاحیت بالاتر تولید می‌شود. با تکرار نسل‌ها، طرح‌ها بهبود می‌یابند و سرانجام طرح بهینه پیدا می‌شود.

در اینجا نیز مشابه اقدامات انجام شده‌ی قبلی^[۷] از روش نیروها در کنار روش انرژی برای تسریع فرایند بهینه‌سازی استفاده شد. برای دکل‌هایی با تعداد اعضای کم نیز می‌توان چنین روشی را به کار برد. استفاده از ترکیب انرژی، روش نیروها و الگوریتم ژنتیک منجر به حذف عملیات معکوس‌سازی ماتریس خواهد شد.

ابتدا لازم است اشاره‌ی کوتاه به روش‌های مختلف انرژی شود.

به‌طور کلی در رفتار غیر خطی مادی رابطه‌ی تنش - کرنش به شکل $\epsilon = f(\sigma)$ یا $\sigma = g(\epsilon)$ خواهد بود. در این صورت محاسبه‌ی انرژی کرنشی، انرژی مکمل، و انرژی پتانسیل کل مطابق رابطه‌های ۷ و ۸ خواهد بود:

$$U = \int \int g(\epsilon) d\epsilon dV, U^c = \int \int f(\sigma) d\sigma dV \quad (7)$$

$$V = U - P^t u \quad (8)$$

۱) در شرایطی که $KL/r < Cc$

$$F_a = \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{\pi^2 Cc^2} \right] F_y \quad (1)$$

۲) در شرایطی که $KL/r > Cc$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (2)$$

و مقدار Cc نیز چنین محاسبه می‌شود:

$$Cc = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (3)$$

فرمول‌های ۱ تا ۳ در شرایطی که نسبت عرض به ضخامت مقطع از مقدار تعیین شده‌ی زیر بیشتر نباشند، قابل استفاده است:

$$\left(\frac{b}{t} \right)_{\lim} = \frac{661}{\sqrt{F_y}} \quad (4)$$

E : مدول کشسانی فولاد

F_y : تنش تسلیم فولاد

$\frac{KL}{r}$: حداکثر ضریب لاغری قطعه مهار نشده

در شرایطی که مقدار $\frac{b}{t}$ از مقدار ذکر شده در بالا بیشتر باشد از روابط ۵ و ۶ برای محاسبه تنش فشاری استفاده می‌شود:

$$F_{cr} = \left[1.8 - 0.18 \frac{b/t}{(b/t)_{\lim}} \right] F_y \quad \text{اگر } \frac{661}{\sqrt{F_y}} < \frac{b}{t} < \frac{992}{\sqrt{F_y}} \quad (5)$$

$$F_{cr} = \frac{588000}{(b/t)^2} \quad \text{اگر } \frac{992}{\sqrt{F_y}} < \frac{b}{t} \quad (6)$$

نحوه‌ی محاسبه‌ی $\frac{KL}{r}$ اعضا به صورت زیر است:

۱. برای پایه‌های دکل یا اعضای که در انتها دارای اتصال ۱۰۰٪ مفصلی هستند، $K = 1$ است.

۲. برای سایر اعضا که نیرو تحمل می‌کنند مقدار $\frac{KL}{r}$ باید چنین محاسبه شود:

سازه با رفتار خطی، مجموع انرژی‌های مکمل (U^c) و انرژی کرنشی (U) صفر است، تابع هدف چنین انتخاب می‌شود:

$$F = W(1 + \alpha(U + U^c)^2) \quad (16)$$

که در آن α یک عدد بزرگ انتخاب می‌شود. دیده می‌شود که تابع جریمه چنان ارائه شده است که کمینه‌ی آن صفر باشد. برای محاسبه‌ی U ، با تشکیل B_1 و B_2 متناظر با کلیه‌ی درجات آزادی، می‌توان نوشت:

$$\{d\} = [B_1^t][F_m]([B_2\{p\} + [B_1]\{q\}) \quad (17)$$

$$U = \frac{1}{\gamma} \{d\}^t [K] (d) - \{d\}^t \{F\} \quad (18)$$

که در آنها $[K]$ ماتریس سختی، و $\{F\}$ نیروهای گرهی است. در هنگام تعادل، مقدار U منفی و مجموع آن با U^c برابر صفر است.

علاوه بر روابط ۱۷ و ۱۸ می‌توان با فرمول‌بندی دیگری سازه را به صورت بهینه طراحی کرد، بدون آن که نیاز به U باشد و فقط از U^c کمک گرفته شود. چنان که دیده شد U^c را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۲ نوشت، و در تحلیل آن را کمینه کرد. مشتق‌گیری از این رابطه قبل از دست‌یابی به رابطه‌ی ۱۳، به رابطه‌ی ۱۹ خواهد رسید.

$$\frac{\partial U^c}{\partial q} = 0 \Rightarrow [H_{qp}]\{p\} + [H_{qq}]\{q\} = \{0\} \quad (19)$$

بنابراین باید q چنان انتخاب شود که رابطه‌ی ۱۹ برقرار شود (به‌جای این که بگوییم q باید رابطه‌ی ۱۵ را کمینه کند). اما سمت راست رابطه‌ی ۱۹ یک بردار صفر است، که برای استفاده باید به بردار اسکالر تبدیل شود. در بهترین حالت، نرم این بردار حساب می‌شود. نرم یک بردار جذر مجموع مربعات درایه‌های آن است. اگر این نرم معادل صفر شود، چاره‌ی نیست جز آن که کل درایه‌ها صفر شوند. در روش قبل کمیت اسکالر به‌عنوان یک انرژی مکمل معرفی شده بود که برای صفر شدن آن مجبور شدیم آن را با انرژی (U) ترکیب کنیم. در اینجا چنانچه هدف بهینه‌یابی مقاطع $\{A\}$ و هندسه‌ی $\{D\}$ باشد، می‌توان نوشت:

$$F(q, A, D) = W(A, D)(1 + \alpha norm([H_{qp}]\{p\} + [H_{qq}]\{q\})) \quad (20)$$

که در آن ورودی $\{q\}$ ، $\{A\}$ و $\{D\}$ است. تعداد متغیرهای $\{q\}$ کافی است به تعداد درجه‌ی نامعینی استاتیکی باشد، زیرا مابقی نیروها با توجه به هندسه و توپولوژی هر رشته از رابطه‌ی ۹ قابل محاسبه است. همچنین $[H_{qp}]$ و $[H_{qq}]$ تابع مشخصات انتخابی مقاطع، هندسه و توپولوژی خواهند بود که با داشتن این دو از رابطه‌ی بالا F محاسبه می‌شود، و کمینه‌شدن آن به‌ازای α زیاد، یعنی کمینه‌شدن وزن (W). چنانچه سازه قیود دیگری نیز داشته باشد، کافی است آنها را نرمالیزه و سپس به‌کمک یک ضریب جریمه به رابطه‌ی بالا اضافه کنیم. لذا فرمول‌بندی نهایی مسئله عبارت است از:

$$\begin{aligned} & Find q, A, D; A \in \{S_d \text{ or } S_c\} \\ & Min F(q, A, D) = W(A, D)(1 + \alpha[norm([H_{qp}]\{p\} + \\ & [H_{qq}]\{q\}) + \sum_{m=1}^{nc} \max[0, g_m(q, A, D)]) \end{aligned} \quad (21)$$

که در آنها U انرژی کرنشی، U^c انرژی مکمل، V انرژی پتانسیل کل، P بارهای خارجی و u تغییر مکان گره‌ها هستند. با توجه به قضیه‌ی اول کاستگلیانو برای هر سیستم ارتجاعی (خطی یا غیرخطی) انرژی پتانسیل در حالت تعادل پایدار، کمینه است و مشابه آن در قضیه‌ی دوم انرژی مکمل، چنانچه نیروهای داخلی سازگاری را ارضا کنند، کمینه خواهد بود. به‌طور کلی U متناظر روش سختی و U^c نظیر روش نرمی خواهد بود. در اولی به دنبال تغییر مکان‌ها، و در دومی به دنبال نیروهای مجهول می‌گردیم. از آنجا که در یک سازه‌ی نامعین، تعیین نیروها در قسمت نامعین سازه منجر به محاسبه‌ی ساده‌ی نیرو در سایر اعضا خواهد شد، استفاده از U^c و در واقع روش نرمی، ما را با مجهولات کم‌تری در تحلیل روبه‌رو می‌کند. به‌این ترتیب در ادامه با انتخاب روش نیرو بر مبنای اصل کم‌ترین کار مراحل تحلیل بیان می‌شود. فرض کنید $\{p\} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}^t$ به‌عنوان نیروهای گرهی، $\{q\} = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}^t$ بیان‌گر m مجهول نیروی اضافی و $\{r\} = \{r_1, r_2, \dots, r_j\}^t$ به‌عنوان نیروی داخلی کلیه‌ی اعضا منظور شود. در این صورت از تعادل:

$$\{r\} = [B_2]\{p\} + [B_1]\{q\} = [B_2 \ B_1] \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$U^c = \frac{1}{\gamma} \{r\}^t [F_m] \{r\} \quad (10)$$

که در آن $[F_m]$ ماتریس نرمی سوارنشده‌ی سازه، $[B_2]\{p\}$ جواب ویژه و $[B_1]\{q\}$ جواب مکمل است. اکنون $\{q\}$ باید چنان تعیین شود که U^c حداقل شود. با جای‌گذاری $\{r\}$ از رابطه‌ی ۹ در ۱۰ خواهیم داشت:

$$U^c = \frac{1}{\gamma} [p \ q]^t [H] \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, [H] = [B_2 \ B_1]^t [F_m] [B_2 \ B_1] \quad (11)$$

با تفکیک $[H]$ به چهار جزء $[H_{qp}]$ ، $[H_{qq}]$ ، $[H_{pp}]$ و $[H_{pq}]$ در نهایت:

$$U^c = \frac{1}{\gamma} (\{p\}^t [H_{pp}]\{p\} + \{p\}^t [H_{pq}]\{q\} + \{q\}^t [H_{qp}]\{p\} + \{q\}^t [H_{qq}]\{q\}) \quad (12)$$

در روش کلاسیک از U^c نسبت به $\{q\}$ مشتق گرفته، و با مساوی صفر قرار دادن آن به رابطه‌ی ۱۳ می‌رسیم:

$$\{q\} = -[H_{qq}]^{-1} [H_{qp}]\{p\} \quad (13)$$

از آنجا که ماتریس $[H]$ متقارن است لذا $[H_{qp}]^t = [H_{pq}]$. عبارت اول در رابطه‌ی ۱۲ ثابت است و عبارت‌های دوم و سوم آن با یکدیگر برابرند، لذا می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی ۱۴ در نظر گرفت:

$$U^c = \frac{1}{\gamma} (\{p\}^t [H_{pp}]\{p\} + \{q\}^t [H_{qp}]\{p\} + \{q\}^t [H_{qq}]\{q\}) \quad (14)$$

با جای‌گذاری $\{q\}$ از رابطه‌ی ۱۳، دو عبارت آخر حذف می‌شود و در نهایت:

$$U^c = \frac{1}{\gamma} (\{p\}^t [H_{pp}]\{p\} + \{q\}^t [H_{qp}]\{p\}) \quad (15)$$

در اینجا هدف ارائه‌ی یک فرمول‌بندی مناسب برای رسیدن به کم‌ترین میزان وزن است. برای این منظور، با استفاده از این ایده که در حالت تعادل و سازگاری یک

که در آن S_d و S_c به ترتیب معرف مقاطع منفصل یا متصل‌اند. $g_m(q, A, D)$ بیان‌گر میزان نقض قیود، و nc نشان‌گر تعداد قیود (شامل قید تنش، تغییر مکان و قید کمناش) خواهد بود. مزیت مهم این فرمول‌بندی گنجانیده‌شدن عبارت تحلیل‌گر در داخل تابع هدف است، و به همین دلیل یک فرمول‌بندی مناسب برای الگوریتم ژنتیک است. بنابراین در روند بهینه‌سازی نیازی نیست که به‌ازای هر رشته در هر نسل، محاسبات مربوطه را یک برنامه‌ی تحلیل‌گر انجام دهد. سرعت به‌کارگیری چنین روشی بسیار بالا است.

در روش فوق چنانچه بهینه‌سازی مقاطع هدف باشد، سطح مقطع هر عضو با توجه به دسته‌بندی اعضا انتخاب می‌شود؛ و چنانچه هدف بهینه‌یابی مقاطع و هندسه باشد، این دو متغیر به‌عنوان مجهولات مسئله انتخاب می‌شوند. به‌این ترتیب متغیرهای مسئله در مقایسه با روش قبل کم‌تر خواهد بود سپس برای تحلیل هر یک از اعضای نسل‌ها از یک تحلیل‌گر استفاده می‌شود. انجام چنین امری بسیار طولانی خواهد بود، چرا که با بزرگ‌شدن مسئله اعضای هر نسل نیز بیشتر می‌شود؛ همچنین محاسبات تحلیل هر سازه باعث کندی عملیات بهینه‌سازی و گاهی عدم هم‌گرایی آن خواهد شد. در این حالت ابتدا برای چند نسل اولیه از برنامه‌ی تحلیل‌گر استفاده می‌شود؛ سپس سطح مقطع اعضا به‌عنوان ورودی، و نیروی اعضا و جابه‌جایی‌های مورد نظر (در هر سازه ممکن است بر روی چند گره خاص محدودیت تغییر مکان وجود داشته باشد) به‌عنوان خروجی شبکه انتخاب می‌شود. پس از آموزش این شبکه، وظیفه‌ی تحلیل برعهده‌ی شبکه خواهد بود. در انجام چنین کاری با چند مشکل روبه‌رو خواهیم شد.

اولاً بدیهی است که شبکه‌ها در واقع تقریب‌زننده‌های تابعی بسیار مناسبی هستند و در مراحل پایانی الگوریتم ژنتیک جواب‌های هر نسل ممکن است با نسل قبل اختلاف بسیار ناچیزی داشته باشد. بنابراین استفاده از شبکه ممکن است در این مراحل منجر به بهینه‌های غیرواقعی شود که ناشی از تقریبی است که در تحلیل، به‌واسطه‌ی استفاده از شبکه، به وجود آمده است. در انجام مثال‌های مختلف دیده شد که این مشکل در بیشتر اوقات به جواب‌های نادرست خواهد انجامید. برای حل این مشکل کل نسل‌ها را به ۳ گروه تقسیم می‌کنیم. گروه اول و سوم از تحلیل دقیق و گروه دوم از شبکه استفاده می‌کند. برای این منظور ابتدا الگوریتم ژنتیک با توجه به ابعاد مسئله و تعداد ورودی‌ها، از طریق تحلیل دقیق مقادیر نیرو و تغییر مکان دست می‌یابد. پس از آماده‌شدن داده‌های کافی، کلیه‌ی مقادیر سطح مقطع اعضا به‌عنوان ورودی شبکه انتخاب می‌شوند. نیروی اعضا و تغییر مکان‌ها نیز تشکیل‌دهنده‌ی خروجی خواهد بود. نکته‌ی مهم آن است که آموزش چنین شبکه‌ی نباید به‌شدت زمان‌بر باشد، در غیر این صورت فاقد کارایی لازم است و شبکه تأثیر قابل توجهی در تسریع بهینه‌سازی نخواهد داشت.

تعداد نسل‌های مربوط به گروه اول باید به‌اندازه‌ی باشد که کل فضای جست‌وجو را چنان پوشش دهد که شبکه‌ی حاصل از آن از قابلیت ارائه‌ی جواب مناسب برخوردار باشد. این نکته کاملاً بستگی به ابعاد مسئله و تعداد متغیرهای طراحی آن دارد. به‌منظور رعایت دقت، پس از مهیا‌شدن حدوداً ۱۰ برابر تعداد نرون‌های ورودی می‌توان به شبکه‌ی حاصل از آن امیدوار بود. برای کنترل این موضوع، پس از آموزش شبکه، ضریب همبستگی حاصل از خروجی شبکه و داده‌های آزمودنی که معادل ۵٪ هر نسل است، به‌عنوان معیار صحت استفاده از شبکه در مراحل بعدی انتخاب می‌شود. مقدار این ضریب در اینجا حداقل برابر با ۰/۹۹ انتخاب شده است.

در میان شبکه‌های مختلف، شبکه‌های با تابع پایه شعاعی (RBF) مناسب‌تر از بقیه‌اند. یکی از قابلیت‌های بسیار بالای این نوع شبکه‌ها قدرت شناسایی الگوهای متفاوت در مدت‌زمان بسیار کم است و نیز در دسته‌بندی الگوها بسیار بهتر از

MLFF کار می‌کنند. شبکه‌ی فوق از آنجا که معادل استنتاج‌گر فازی عمل می‌کند، مسلماً در جواب‌گویی به مسئله‌ی مورد نظر کارایی بیشتری خواهد داشت. یک شبکه‌ی مبتنی بر توابع شعاعی شامل یک لایه‌ی ورودی از گره‌های منبع، یک لایه‌ی مخفی از واحدهای پردازش غیرخطی به‌همراه یک با‌یاس و یک لایه‌ی خروجی از وزن‌های خطی است. با استفاده از خروجی‌های محاسبه‌شده در لایه‌ی مخفی، در پاسخ به یک بردار ورودی و با استفاده از یک پاسخ مطلوب در خروجی، وزن‌ها تعیین می‌شوند.

توابع غیرخطی در لایه‌ی مخفی این شبکه‌ها (توابع پایه) عموماً گوسی‌شکل انتخاب می‌شوند، و پارامترهای آنها شامل مرکز و عرض تابع است. به‌طور ساده می‌توان گفت که هر نرون لایه‌ی مخفی هنگامی دارای خروجی بزرگ‌تر است که بردار ورودی شبکه به مرکز توابع غیرخطی نرون نزدیک‌تر باشد. با افزایش فاصله‌ی بردار ورودی از مرکز توابع غیرخطی، خروجی نرون نیز کاهش می‌یابد.

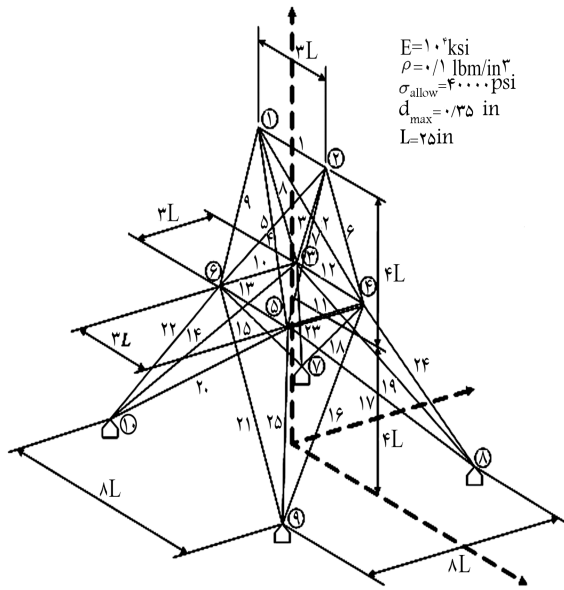
از جمله شبکه‌های متناظر با RBF می‌توان به شبکه‌های (GRNN)^۵ اشاره کرد. این شبکه‌ها به‌لحاظ ساختار همانند RBF عمل می‌کنند و فقط در ساختار لایه‌ی دوم آنها اندکی تفاوت وجود دارد. در اینجا خروجی شبکه به‌صورت ترکیب خطی از حاصل ضرب داخلی خروجی‌های شبکه در خروجی لایه‌ی مخفی خواهد بود که در نهایت نرمالیزه می‌شود. بدیهی است در چنین شرایطی تأثیر پذیری خروجی نسبت به خروجی‌های آموزش داده شده بیشتر می‌شود. یعنی خروجی‌های شبکه در رسیدن به یک خروجی خاص تأثیر مستقیم خواهند داشت. چنین شبکه‌ی قادر است به‌ازای هر ورودی خاص، ابتدا ورودی‌های نزدیک به ورودی مورد نظر در مجموعه داده‌های آموزشی را انتخاب کند و سپس با توجه به فاصله‌ی هر کدام از آنها از ورودی مربوطه -- که معمولاً «فاصله‌ی اقلیدسی» نامیده می‌شود -- خروجی نظیر را محاسبه کند. این خروجی را می‌توان به‌نحوی ترکیبی از چند خروجی متناظر در سری داده‌های آموزشی، که دارای ورودی‌های نزدیک به ورودی مورد نظر ما هستند، دانست.

بزرگی‌های اشاره شده شبکه را برای حل مسائلی با تعداد نرون‌های ورودی و خروجی زیاد و سری آموزشی کم، کارساز می‌کند. این همان موردی است که در این نوشتار با آن برخورد خواهیم کرد. از آنجا که معمولاً در بارگذاری دکل‌ها با حالات مختلفی روبه‌رو خواهیم بود؛ لذا باید برای هر حالت، بارگذاری یک شبکه آموزش داده شود. سرعت بالای آموزش شبکه‌های RBF از این نظر مشکلی ایجاد نخواهد کرد. به‌این ترتیب شبکه‌ی مورد نظر برای حالت بارگذاری δ م چنین معرفی می‌شود:

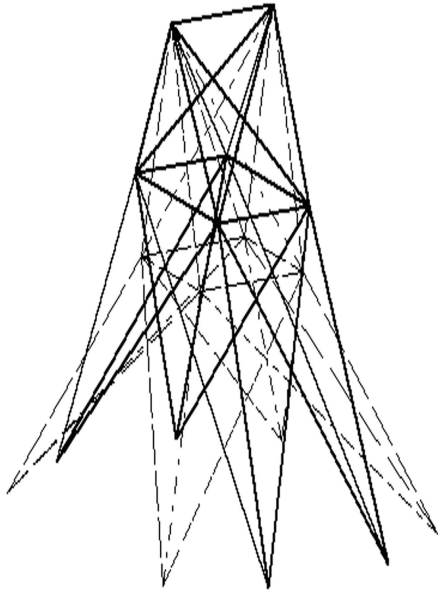
$NN(\delta): RBF(Area, [Force, Displacement])$

با انجام مثال‌های مختلف دیده شد که به‌منظور کنترل خروجی‌های شبکه، مناسب‌تر آن است که در کنار آموزش شبکه در هر نسل، ۵٪ هر یک از زیرجامعه‌ها با استفاده از تحلیل دقیق محاسبه شود. مزیت این روش آن است که در هر نسل این تعداد الگو می‌تواند برای کنترل شبکه به کار گرفته شود، و مثلاً اگر خروجی شبکه با تحلیل دقیق دارای خطایی بیشتر از یک حد مشخص شود، بیان‌گر آن است که از این گام به بعد محدوده‌ی متغیرها تفاوت یافته و باید شبکه‌ی جدیدی با داده‌های جدید آموزش داده شود. اما از آنجا که انتخاب اولیه‌ی نسل اول تصادفی بوده و کل محدوده‌ی جست‌وجو را می‌پوشاند، در کلیه‌ی مثال‌ها دیده شد که هیچ‌گاه نیاز به آموزش مجدد شبکه نبوده و شبکه‌ی اولیه تا انتها به‌کار گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که ابتدا خود تابع هدف به‌عنوان خروجی شبکه به کار گرفته شد، اما با انجام چند مثال دیده شد که نتایج مناسبی را ارائه نمی‌دهد.

استفاده از شبکه به‌سادگی محدوده‌ی جواب را ارائه می‌دهد، اما چنان که ذکر شد نمی‌توان در مراحل انتهایی الگوریتم از آن استفاده کرد. به‌این ترتیب یک معیار



شکل ۲. هندسه‌ی یک دکل ۲۵ میله‌یی.



شکل ۳. هندسه‌ی تغییر یافته‌ی دکل ۲۵ میله‌یی در مقایسه با هندسه‌ی اولیه.

به مختصات گره‌ها، گروه‌بندی اعضا و داده‌های طراحی است. در اینجا متغیرهای مسئله علاوه بر A و D ، شامل γ متغیر نیرویی q است. الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده از نوع ساده (تک جمعیتی) است. با انتخاب جمعیتی برابر با 40 ، پس از 50 نسل تکرار، با نرخ 0.8 برای پیوند و 0.05 برای جهش، مقایسه‌ی نتایج حاصله با دیگر نتایج موجود در جدول ۵ آمده است. در شکل ۳ نیز هندسه‌ی تغییر یافته در مقایسه با هندسه‌ی اولیه نشان داده شده است.

مثال ۲: در این مثال، بهینه‌یابی مقاطع و هندسه‌ی یک دکل کوچک ۲۴۴ میله‌یی مورد نظر است (شکل ۴). در این مسئله که نخستین بار توسط Saka معرفی شد^[۱۱] اعضای دکل به 26 گروه دسته‌بندی شده است. مدول کشسانی برابر 210 KN/mm^2 و

توقف برای استفاده از شبکه باید به کار گرفته شود. بدیهی است بهترین انتخاب میزان تغییرات در تابع هدف خواهد بود. در انجام مثال‌ها معیار توقف این است که چنانچه مقدار انحراف معیار تابع هدف هر نسل از 2 درصد میانگین آن نسل کم‌تر شود، خروجی‌ها تا اندازه‌ی به هم نزدیک‌اند که شبکه ممکن است تقریب مناسبی ارائه ندهد. از اینجا به بعد شبکه کنار گذاشته شده و از تحلیل دقیق استفاده می‌شود. یادآور می‌شویم که با توجه به مشخص بودن محدوده‌ی هر متغیر در ابتدا، به‌طور معمول فضای جست‌وجو پس از چند نسل به اندازه‌ی کافی پوشش داده می‌شود. یک شبکه صرفاً باید درون‌یابی مناسبی داشته باشد، که با توجه به تعدد داده‌ها در فضای محدود، این یک توقع بدیهی از شبکه است که جواب‌های مناسبی ارائه دهد. تابع هدف درست مشابه رابطه‌ی ۲۱ است، با این تفاوت که نیازی به منظور کردن عبارت دوم نیست.

در این نوشتار از الگوریتم ژنتیک مهاجرتی (چندجمعیتی) که کارایی آن در مسائل بسیار بزرگ نشان داده شده، بهره‌برده‌ایم. همچنین نشان داده شده که این الگوریتم با احتمال بیشتری به بهینه‌ی کلی هم‌گرا می‌شود.^[۹-۱۱] در این روش به جای استفاده از یک جامعه از چند جامعه‌ی مستقل از هم استفاده می‌شود. این زیرجامعه‌ها، مستقل از یکدیگر و به روش الگوریتم ژنتیک برای چند نسل مشخص بهینه می‌شوند. پس از آن، در پایان هر نسل افرادی در بین جامعه‌ها مهاجرت می‌کنند. این روش نه تنها دارای سرعت محاسبات بالاتر است بلکه نسبت به روش‌های تک‌جامعه، نیاز به محاسبه‌ی تابع هدف کم‌تری دارد. نحوه‌ی انتخاب افراد برای مهاجرت ممکن است به‌صورت مختلفی صورت پذیرد:

۱. انتخاب افراد برای مهاجرت به‌صورت تصادفی؛
 ۲. انتخاب بهترین فرد هر جامعه برای مهاجرت.
- حالات‌های ممکن بسیاری برای ساختار مهاجرت افراد بین زیرجامعه‌ها وجود دارد. مثلاً مهاجرت می‌تواند به یکی از روش‌های زیر انجام شود:
۱. بین تمامی زیرجامعه‌ها (ساختار شبکه کامل یا بدون محدودیت)؛
 ۲. مهاجرت به‌صورت ساختار حلقه‌یی؛
 ۳. مهاجرت بین زیرجامعه‌های همسایه.
- معمول‌ترین روش به‌منظور مهاجرت، مهاجرت بدون محدودیت یا همان شبکه‌ی کامل است. در این ساختار افراد می‌توانند از هر جامعه‌یی به جوامع دیگر مهاجرت کنند. برای هر زیرجامعه یک حوضچه برای کروموزوم‌های مهاجر سایر زیرجامعه‌ها وجود دارد که افراد مهاجرتی که مایل‌اند به این زیرجامعه مهاجرت کنند، ابتدا در این حوضچه قرار می‌گیرند (می‌توان این حوضچه را به اداره‌ی مهاجرت هر کشور تشبیه کرد)؛ سپس از بین افراد، فردی به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و اجازه‌ی ورود به جامعه را می‌یابد.

به این ترتیب استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک مهاجرتی در کنار شبکه‌های عصبی، می‌تواند کمک مناسبی در بهینه‌سازی مسائل بزرگ معیار بهینه‌سازی باشد. کاربرد روش‌های ذکر شده در مثال‌های زیر دیده می‌شود. پایان کار در هر دو مثال زمانی است که درصد تغییرات وزن هر گام نسبت به گام قبل از یک هزارم تجاوز نکند.

مثال‌های کاربردی

مثال ۱: هدف این مثال بهینه‌یابی مقاطع و هندسه‌ی یک دکل کوچک ۲۵ میله‌یی مطرح شده در مقالات است که در شکل ۲ هندسه‌ی اولیه‌ی آن نشان داده شده است. در جداول ۳ و ۴ نیز داده‌های این مسئله آمده است. این اطلاعات مربوط

جدول ۳. مختصات گره‌ها و گروه‌بندی اعضای دکل ۲۵ میله‌یی.

اعضا و گره‌های آنها	گروه	z cm(in)	y cm(in)	x cm(in)	گره
۱(۱, ۲)	X_1	۵۰۸(۲۰۰)	۰, ۰	-۹۵, ۲۵(-۳۷, ۵)	۱
۲(۱, ۴), ۳(۲, ۳), ۴(۱, ۵), ۵(۲, ۶)	X_2	۵۰۸(۲۰۰)	۰, ۰	۹۵, ۲۵(۳۷, ۵)	۲
۶(۲, ۵), ۷(۲, ۴), ۸(۱, ۳), ۹(۱, ۶)	X_3	۲۵۴(۱۰۰)	۹۵, ۲۵ (۳۷, ۵)	-۹۵, ۲۵(-۳۷, ۵)	۳
۱۰(۳, ۶), ۱۱(۴, ۵)	X_4	۲۵۴(۱۰۰)	۹۵, ۲۵ (۳۷, ۵)	۹۵, ۲۵(۳۷, ۵)	۴
۱۲(۳, ۴), ۱۳(۵, ۶)	X_5	۲۵۴(۱۰۰)	-۹۵, ۲۵ (-۳۷, ۵)	۹۵, ۲۵(۳۷, ۵)	۵
۱۴(۳, ۱۰), ۱۵(۶, ۷), ۱۶(۴, ۹), ۱۷(۵, ۸)	X_6	۲۵۴(۱۰۰)	-۹۵, ۲۵ (-۳۷, ۵)	-۹۵, ۲۵(-۳۷, ۵)	۶
۱۸(۳, ۸), ۱۹(۴, ۷), ۲۰(۶, ۹), ۲۱(۵, ۱۰)	X_7	۰, ۰	۲۵۴(۱۰۰)	-۲۵۴(-۱۰۰)	۷
۲۲(۳, ۷), ۲۳(۴, ۸), ۲۴(۵, ۹), ۲۵(۶, ۱۰)	X_8	۰, ۰	۲۵۴(۱۰۰)	۲۵۴(۱۰۰)	۸
		۰, ۰	-۲۵۴(-۱۰۰)	۲۵۴(۱۰۰)	۹
		۰, ۰	-۲۵۴(-۱۰۰)	-۲۵۴(-۱۰۰)	۱۰

جدول ۴. داده‌های طراحی دکل ۲۵ میله‌یی.

متغیرهای طراحی	
$X_1; X_2; X_3; X_4; X_5; X_6; X_7; X_8$	متغیر ابعاد
$x_2 = x_5 = -x_3 = -x_6; x_8 = x_9 = -x_7 = -x_{10};$	متغیر هندسه
$y_2 = y_4 = -y_5 = -y_6; y_7 = y_8 = -y_9 = -y_{10}; z_2 = z_4 = z_5 = z_6$	

قیود طراحی

قیود تنش

$$(\sigma_t)_i \leq 275.8 \text{ Mpa} (40 \text{ ksi}); \quad i = 1, \dots, 25$$

$$|(\sigma_c)_i| \leq 275.8 \text{ Mpa} (40 \text{ ksi}); \quad i = 1, \dots, 25$$

قیود مربوط به جابه‌جایی در تمام جهات

$$|\Delta_i| \leq 0.89 \text{ cm} (0.35 \text{ in}); \quad i = 1, \dots, 6$$

قیود مربوط به متغیرهای هندسه

$$0.8 \text{ cm} (2 \text{ in}) \leq x_2 \leq 152.4 \text{ cm} (6 \text{ in}); \quad 10.16 \text{ cm} (4 \text{ in}) \leq x_8 \leq 203.2 \text{ cm} (8 \text{ in});$$

$$10.16 \text{ cm} (4 \text{ in}) \leq y_2 \leq 203.2 \text{ cm} (8 \text{ in}); \quad 25.4 \text{ cm} (1 \text{ in}) \leq y_8 \leq 355.6 \text{ cm} (14 \text{ in});$$

$$228.6 \text{ cm} (9 \text{ in}) \leq z_2 \leq 330.2 \text{ cm} (13 \text{ in});$$

$$p = 0.254 \text{ cm} (0.1 \text{ in})$$

لیست مقاطع موجود

$$A_i \in S = \{0.645 I (I = 1, \dots, 26), 18.064, 19.355, 20.645, 21.935\} \text{ cm}^2$$

$$A_i \in S = \{0.1 I (I = 1, \dots, 26), 2.18, 3.0, 3.72, 3.74\} \text{ in}^2; \quad i = 1, \dots, 25$$

بارگذاری

$F_x \text{ kN} (kips)$	$F_y \text{ kN} (kips)$	$F_z \text{ kN} (kips)$	گره	حالت
۴, ۴۵۴(۱, ۰)	-۴۴, ۵۳۷(-۱۰, ۰)	-۴۴, ۵۳۷(-۱۰, ۰)	۱	۱
۰, ۰	-۴۴, ۵۳۷(-۱۰, ۰)	-۴۴, ۵۳۷(-۱۰, ۰)	۲	
۲, ۲۲۷(۰, ۵)	۰, ۰	۰, ۰	۳	
۲, ۶۷۲(۰, ۶)	۰, ۰	۰, ۰	۶	

مشخصات مواد

$$E = 6.895 \times 10^4 \text{ Mpa} (1 \times 10^6 \text{ ksi})$$

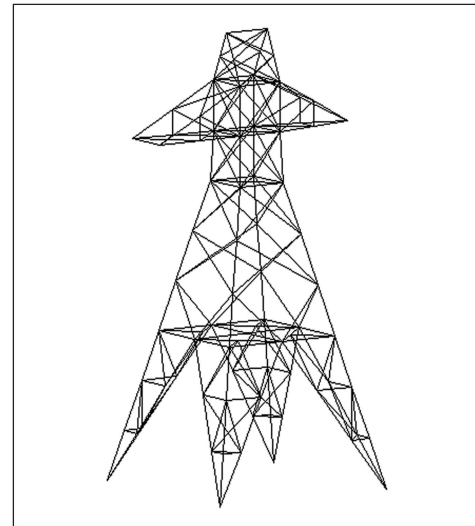
مدول الاستیسیته

$$\rho = 0.272 \text{ N/cm}^3 (0.16 \text{ lb/in}^3)$$

چگالی

جدول ۶. حالات بارگذاری مربوط به دکل فضایی ۲۴۴ میله‌یی.

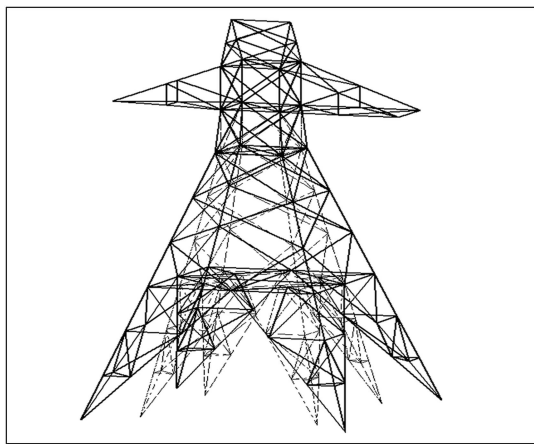
حالت	گره	بارگذاری (Kn)		جابه‌جایی (mm)	
		z	x	z	x
۱	۱	۱۰	۰	۱۵	۴۵
	۲	۱۰	۰	۱۵	۴۵
	۱۷	۳۵	-۹۰	۱۵	۳۰
	۲۴	۱۷۵	-۴۵	۱۵	۳۰
۲	۱	۰	۰	۱۵	۴۵
	۲	۰	۰	۱۵	۴۵
	۱۷	۰	۰	۱۵	۳۰
	۲۴	۰	۰	۱۵	۳۰
۲۵	۱	۰	۰	۱۵	۴۵
	۲	۰	۰	۱۵	۴۵
	۱۷	۰	۰	۱۵	۳۰
	۲۴	۰	۰	۱۵	۳۰



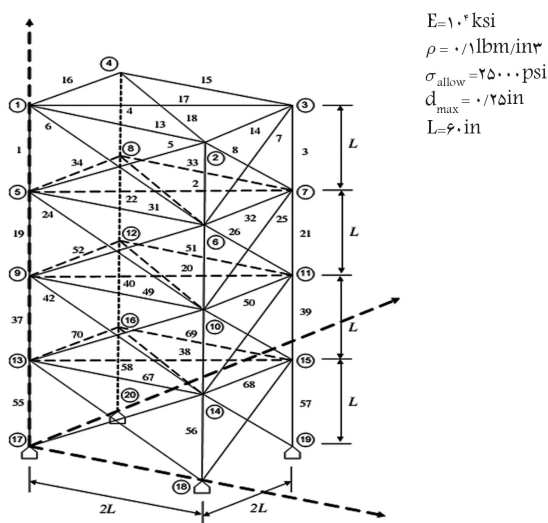
شکل ۴. هندسه‌ی دکل فضایی ۲۴۴ میله‌یی.

جدول ۵. نتایج طراحی بهینه‌ی دکل ۲۵ میله‌یی در مقایسه با سایر مراجع.

متغیرهای طراحی	Wu ^[۱۱]	Wenyan ^[۱۲]	Kaveh ^[۱۳]	روش این نوشتار
A1	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
A2	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
A3	۱٫۱	۱٫۱	۱٫۱	۱٫۱
A4	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
A5	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
A6	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱
A7	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲
A8	۰٫۹	۰٫۷	۱٫۰	۰٫۸
X4	۴۱٫۰۷	۳۵٫۴۷	۳۶٫۲۳	۳۳٫۰۴۸۷
Y4	۵۳٫۴۷	۶۰٫۳۷	۵۸٫۵۶	۵۳٫۵۶۶۳
Z4	۱۲۴٫۶	۱۲۹٫۰۷	۱۱۵٫۵۹	۱۲۹٫۹۰۹۲
X8	۵۰٫۸	۴۵٫۰۶	۴۶٫۴۶	۴۳٫۷۸۲۶
Y8	۱۳۱٫۴۸	۱۳۷٫۰۴	۱۲۷٫۹۵	۱۳۶٫۸۳۸۱
وزن (lb)	۱۳۶٫۲	۱۲۴٫۹۴	۱۲۴٫۰	۱۲۰٫۱۱۴۹
حداکثر تنش	۱۵۵۸۹٫۶۶	۱۸۲۲۸٫۵۹	-	۱۷۱۵۷٫۴
جابه‌جایی	۰٫۳۴۷	۰٫۳۵۰	-	۰٫۳۴۹۹۹۹۹۵



شکل ۵. هندسه تغییر یافته‌ی دکل ۲۴۴ میله‌یی در مقایسه با هندسه‌ی اولیه.



شکل ۶. هندسه‌ی یک دکل فضایی ۷۲ میله‌یی.

تنش کششی مجاز برابر 140 N/mm^2 منظور شده است. در طراحی این دکل کلیه ضوابط مطابق آیین‌نامه‌ی AISC در نظر گرفته شده است. جدول ۶ بارگذاری این دکل را به همراه قیود تغییر مکان ارائه می‌دهد. برای این دکل دو حالت بارگذاری ارائه شده است. در طراحی اعضای آن از نبشی تک

جدول ۷. نتایج طراحی بهینه دکل ۲۴۴ میله‌یی در دو حالت استفاده از شبکه و عدم استفاده از آن.

متغیرهای طراحی	ابعاد و هندسه	
	ابعاد	بدون شبکه
A1	۰/۱۹۹۶	۰/۱۹۲۰
A2	۱/۴۶۹۷	۱/۵۴۱۲
A3	۰/۱۹۳۶	۰/۱۹۲۰
A4	۱/۶۷۳۰	۱/۴۵۱۷
A5	۰/۱۹۹۵	۰/۲۳۶۱
A6	۱/۹۲۸۴	۲/۵۲۹۵
A7	۰/۱۹۴۸	۰/۱۹۲۰
A8	۲/۰۰۴۷	۲/۱۹۹۹
A9	۰/۱۹۴۸	۰/۱۹۲۰
A10	۰/۱۹۲۹	۰/۱۹۲۰
A11	۲/۲۴۴۵	۲/۰۱۹۲
A12	۱/۴۴۳۲	۱/۴۷۶۳
A13	۰/۱۹۴۲	۰/۱۹۲۰
A14	۰/۱۹۴۳	۰/۱۹۲۰
A15	۵/۳۰۵۴	۳/۶۰۹۶
A16	۰/۸۰۴۷	۰/۷۲۱۷
A17	۰/۱۹۴۵	۰/۱۹۲۰
A18	۰/۱۹۹۵	۰/۱۹۲۰
A19	۰/۱۹۳۶	۰/۱۹۲۰
A20	۴/۹۹۶۳	۳/۴۱۰۶
A21	۰/۶۷۵۴	۰/۴۶۱۷
A22	۰/۱۹۳۸	۰/۱۹۲۰
A23	۰/۱۹۷۱	۰/۱۹۲۰
A24	۰/۱۹۵۰	۰/۱۹۲۰
A25	۰/۱۹۷۰	۰/۱۹۲۰
A26	۰/۱۹۵۴	۰/۱۹۲۰
حجم (mm ^۳)	۵/۵۵۴۷e۵	۴/۹۲۷۲e۵

جدول ۸. نسبت مقادیر مربوط به قيود مختلف به مقادیر مجاز آنها.

الف) حالت اول: بهینه‌یابی مقطع.			
حالت بارگذاری	$Max(\sigma_t)/\sigma_a$	$Max(\sigma_c)/\sigma_b$	$Max(Def)/Def_a$
۱	۰/۷۴۴۳	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹
۲	۰/۸۲۴۳	۰/۹۹۸۵	۰/۹۱۲۱
ب) حالت دوم: بهینه‌یابی مقطع و هندسه.			
حالت بارگذاری	$Max(\sigma_t)/\sigma_a$	$Max(\sigma_c)/\sigma_b$	$Max(Def)/Def_a$
۱	۰/۶۱۱۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۲۱
۲	۰/۷۴۲۶	۰/۹۹۸۳	۱/۹۹۸۷

X و Y یکسان، و مختصات آن در حدود ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. همچنین در گره ۷۷ نیز محدود به ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر می‌شود. به منظور حفظ تقارن مسئله گره‌های ۲۶، ۲۷ و ۲۸ نیز با توجه به گره ۲۹ جابه‌جا می‌شوند. همچنین تغییر مکان گره‌های ۷۴، ۷۵ و ۷۶ نسبت به گره ۷۷ به صورت متقارن است. سایر گره‌ها متناسب با موقعیت این گره‌ها جابه‌جا می‌شوند تا فرم کلی دکل مشابه قبل باقی بماند. چنان‌که مثلاً راستای گره‌های ۲۹ تا ۷۷ و گره‌های متناظر بر روی یک خط راست قرار بگیرند.

جدول ۷ نتایج بهینه‌یابی را برای دو حالت فوق ارائه می‌دهد. همچنین در جدول ۸ (در ستون‌های دوم تا چهارم) به ترتیب نسبت بیشینه تنش موجود کششی به میزان مجاز، نسبت بیشترین تنش موجود فشاری به میزان مجاز آن بر مبنای تنش نظیر کماتش، و همچنین نسبت بیشترین تغییر مکان موجود به میزان مجاز (در گره‌های خواسته شده) برای دو حالت فوق ارائه شده است. مشاهده می‌شود که هیچ نسبتی از ۱ فراتر نرفته است. لازم به ذکر است برای حالت دوم (هندسه و مقطع) مختصات گره ۲۹ برابر با $X1 = 1000(mm)$ و مختصات گره ۷۷ برابر $X2 = 3791/8(mm)$ به دست آمده است. شکل ۵ هندسه‌ی تغییر یافته‌ی دکل پس از بهینه‌یابی را نشان می‌دهد.

برای نشان دادن کارایی شبکه، مثلاً در دکل ۲۴۴ میله‌یی با انتخاب ۴ زیرجامعه، که هر یک دارای ۵۰ عضو هستند، پس از ۱۰ نسل، یک شبکه آموزش داده شده است. خروجی‌ها شامل نیرو و تغییر مکان‌ها خواهد بود. در جدول (۷) نتایج مربوط به استفاده از شبکه نیز آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با اینکه تعداد زیرجامعه‌های حالت دوم کمتر است اما از آنجا که در این روش سرعت استفاده از الگوریتم ژنتیک به جهت تسریع محاسبات مربوط به آنالیز بالاتر می‌رود با تعداد نسل‌های ۲ برابر حالت اول اما در مجموع با زمان کمتر، نتیجه مناسب‌تری به دست آمده است.

مثال ۳: این مثال مربوط به خرپای سه بعدی ۷۲ میله‌یی می‌باشد که در شکل ۶ آمده است. داده‌های این مساله در جدول ۹ دیده می‌شود. در اینجا هدف بهینه‌سازی مقاطع می‌باشد. ولی مقایسه در اینجا مساله یکبار به کمک ژنتیک معمولی و بار دیگر با استفاده از ژنتیک چند جمعیتی بررسی شده است. در روش اول یک جمعیت ۲۵۰ انتخاب شده است در حالی که در روش دوم تعداد زیر جمعیت‌ها ۶ و جمعیت هر نسل ۳۰ می‌باشد. محاسبات هر دو برای ۱۰۰ نسل انجام شده است. در نتایج دیده می‌شود که مقادیر وزن هر دو بسیار نزدیک به دست آمده است. به این ترتیب برای تعداد تکرار یکسان (۱۰۰) می‌توان در روش چند جمعیتی با تعداد جمعیت کمتر

با حداقل سطح مقطع اعضا برابر با $192mm^2$ استفاده شده است. در اینجا ۶ زیرجامعه انتخاب شده است که هر یک دارای ۵۰ عضو می‌باشند. همین مسئله در تحقیقات دیگری مجدداً بررسی شده است^[۱۵] اما ضوابط طرح از آئین‌نامه‌ی دیگری انتخاب شده است. در یکی از این تحقیقات مقدار حجم دکل برابر با $5/41e5mm^3$ به دست آمده است.^[۱۱]

در اینجا علاوه بر تغییر مقاطع، فرض می‌شود بخواهیم هندسه‌ی سازه را نیز تغییر دهیم. برای سادگی کار با توجه به فرم مناسب دکل برای اجرا، فرض می‌شود گره ۲۹ قابلیت جابه‌جایی در راستای X و Y را داشته باشد. میزان این جابه‌جایی در راستای

جدول ۹. داده‌های طراحی برای دکل ۷۲ میله‌یی.

شماره گروه مقاطع	اعضای گروه	قیدهای طراحی																																		
		$\Delta_j \leq 0.25in$ $j = 1, \dots, 20$	قید جابه‌جایی در جهات x و y قیود تنش قید سطح مقطع اعضا $-25ksi \leq (\sigma_\alpha)_i \leq 25ksi$ $i = 1, \dots, 72$ $0.1in.^2 \leq A_i, i = 1, \dots, 72$																																	
A1	۱, ۲, ۳, ۴	<p>داده‌های بارگذاری</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>شماره حالت</th> <th>شماره عضو</th> <th>x (kips)</th> <th>y (kips)</th> <th>z (kips)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>۱</td> <td>۱</td> <td>۵</td> <td>۵</td> <td>-۵</td> </tr> <tr> <td>۲</td> <td>۱</td> <td>۰</td> <td>۰</td> <td>-۵</td> </tr> <tr> <td></td> <td>۲</td> <td>۰</td> <td>۰</td> <td>-۵</td> </tr> <tr> <td></td> <td>۳</td> <td>۰</td> <td>۰</td> <td>-۵</td> </tr> <tr> <td></td> <td>۴</td> <td>۰</td> <td>۰</td> <td>-۵</td> </tr> </tbody> </table> <p>مشخصات مصالح</p> <p>مدول گسیختگی $10^4 ksi$ چگالی $0.11p/in.^3$</p>					شماره حالت	شماره عضو	x (kips)	y (kips)	z (kips)	۱	۱	۵	۵	-۵	۲	۱	۰	۰	-۵		۲	۰	۰	-۵		۳	۰	۰	-۵		۴	۰	۰	-۵
شماره حالت	شماره عضو						x (kips)	y (kips)	z (kips)																											
۱	۱						۵	۵	-۵																											
۲	۱						۰	۰	-۵																											
	۲						۰	۰	-۵																											
	۳						۰	۰	-۵																											
	۴						۰	۰	-۵																											
A2	۵, ۶, ۷, ۸, ۹, ۱۰, ۱۱, ۱۲																																			
A3	۱۳, ۱۴, ۱۵, ۱۶																																			
A4	۱۷, ۱۸																																			
A5	۱۹, ۲۰, ۲۱, ۲۲																																			
A6	۲۳, ۲۴, ۲۵, ۲۶, ۲۷, ۲۸, ۲۹, ۳۰																																			
A7	۳۱, ۳۲, ۳۳, ۳۴																																			
A8	۳۵, ۳۶																																			
A9	۳۷, ۳۸, ۳۹, ۴۰																																			
A10	۴۱, ۴۲, ۴۳, ۴۴, ۴۵, ۴۶, ۴۷, ۴۸																																			
A11	۴۹, ۵۰, ۵۱, ۵۲																																			
A12	۵۳, ۵۴																																			
A13	۵۵, ۵۶, ۵۷, ۵۸																																			
A14	۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲, ۶۳, ۶۴, ۶۵, ۶۶																																			
A15	۶۷, ۶۸, ۶۹, ۷۰																																			
A16	۷۱, ۷۲																																			

جدول ۱۰. نتایج طراحی دکل ۷۲ میله‌یی در مقایسه با سایر مراجع.

شماره گروه	Zhou and Rozvany ^[۱۶]	Erbatur et al. ^[۱۷]	روش این نوشتار - ۱	روش این نوشتار - ۲
A1	۱,۰۱	۱,۰۴	۱,۰۱	۱,۰۱
A2	۳,۴۶	۳,۵۱	۳,۴۸	۳,۴۸
A3	۲,۶۴	۲,۴۵	۲,۶۸	۲,۶۶
A4	۳,۶۷	۳,۳۶	۳,۶۸	۳,۶۲
A5	۳,۲۷	۳,۴۵	۳,۳۳	۳,۳۷
A6	۳,۳۵	۳,۴۵	۳,۳۴	۳,۴۰
A7	۰,۶۵	۰,۶۶	۰,۶۵	۰,۶۵
A8	۰,۶۵	۰,۷۲	۰,۶۵	۰,۶۵
A9	۸,۲۶	۸,۴۵	۸,۲۰	۸,۲۴
A10	۳,۳۲	۳,۲۱	۳,۳۴	۳,۲۶
A11	۰,۶۵	۰,۷۱	۰,۶۵	۰,۶۵
A12	۰,۶۵	۰,۶۶	۰,۶۵	۰,۶۵
A13	۱۲,۲۴	۱۲,۳۲	۱۲,۳۱	۱۲,۲۶
A14	۳,۳۳	۳,۳۹	۳,۲۷	۳,۳۰
A15	۰,۶۵	۰,۷۹	۰,۶۵	۰,۶۵
A16	۰,۶۵	۰,۶۶	۰,۶۵	۰,۶۵
وزن	۱۶۹,۰۸۹	۱۷۰,۶,۳	۱۶۸۹,۵۳	۱۶۸۹,۴۴

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی دکل‌های انتقال نیرو با توجه به تعدد کاربرد آنها در انتقال نیروی برق، نقشی تعیین‌کننده در اقتصاد پروژه‌ی مورد نظر خواهد داشت. عملکرد این سازه‌ها درست مشابه خرابا است و باید بارهای اعمالی را که به‌طور کلی شامل ۳ گروه بار قائم، افقی و طولی خواهد بود، تحمل کنند. روش به‌کار گرفته شده در بهینه‌یابی «الگوریتم ژنتیک» است. در اینجا نیز مانند برخی از تحقیقات مکتوب، از روش انرژی و ترکیب آن با روش نرمی به‌منظور کاهش مجهولات طراحی و نیز حذف عملیات معکوس‌سازی استفاده شده است.^[۷] نکته‌ی قابل توجه در دکل‌ها تعدد اعضا آنها است که باعث کندی محاسبات ژنتیک خواهد شد. با استفاده از ایده‌ی شبکه‌های عصبی می‌توان با تعداد نسل‌های بیشتر، اما در مجموع با زمان کمتر نتیجه مناسب‌تری به‌دست آورد. همچنین برای تعداد تکرار یکسان می‌توان در روش ژنتیک چندجمعیتی با تعداد جمعیت کمتر به همان دقت ژنتیک معمولی رسید که این حجم محاسبات را بسیار کاهش می‌دهد. قسمتی از فرایند محاسبات برعهده‌ی شبکه قرار داده شده است. مثال‌های ارائه‌شده کارایی روش به‌کار گرفته شده را به‌خوبی نشان می‌دهد.

پانویس

1. national electric standard committee(NESC)
2. vertical load
3. transversal load
4. longitudinal load
5. feneralized regression neural network

منابع

1. Guide Lines for Electrical Transmission Line Structural loading, ASCE, Task Committee on Structure ASCE, manuals and report on Engineering Practice, No.74, (1991).
2. IEC-826 Standard, loading and strength of Over-

- head Transmission Lines, International Electro-technical Commission, (1998).
3. Swedish State Power Board, National Electrical Safety Code, NESC, (1977).
 4. Task Committee on Tower Design of the Committee on Analysis and Design of Structures, Guide for Design of Steel Transmission Towers. Structural Division (1971).
 5. ASCE STANDARD, American Society of Civil Engineering, Design of Latticed Steel Transmission Structures, 10-97.
 6. TIA/EIA STANDARD, Structural Standard for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures, TIA/EIA-222-F.
 7. Kaveh, A. and Rahami, H. "Non-linear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm", *Computers and Structures*, **84**, pp.770-778, (2006).
 8. MATLAB, The Language of Technical Computing, The Math Works, Inc, (2006).
 9. Mühlenbein, H.; Schomisch, M.; and Born, J. "The parallel genetic algorithm as a function optimizer", *Parallel Computing*, **17**, pp. 619-632, (1991).
 10. Starkweather, T.; Whitley, D.; and Mathias, K. "Optimization using distributed genetic algorithms", *Proc. Parallel Problem Solving From Nature 1*, Lecture Notes in Computer Science, No. 496, Springer-Verlag pp. 176-185, (1990).
 11. Wu, S-J. and Chow, P-T, "Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms", *Computers and Structures*, **55** (4), pp 695-702 (1995).
 12. Tang, W.; Tong, L.; and Gu, Y. "Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables", *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, **62** pp. 1737-1762, (2005).
 13. Kaveh, A. and Kalatjari, V. "Size/geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm", *Z. Angew. Math. Mech.*, **84**(5) pp.347-357, (2004).
 14. Saka, MP. "Optimum design of pin-jointed steel structures with practical applications", *Journal of Structural Engineering*, **116** (10), pp.2599=2620 (1990).
 15. Togan V. and Daloglu A. "Optimization of 3d trusses with adaptive approach in genetic algorithms", *Engineering Structures*, **28** pp. 1019-1027, (2006).
 16. Zhou, M. Rozvany, G. An optimality criteria method for large systems. Part ii: Algorithm. *Struct Multidiscip Optimiz* **6** ,250-62,(1993).
 17. Erbaturo, F., et al., Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms, *Computer and Structures*, **75**, pp.209-224, (2000).