

بهینه سازی برج CRS فشار قوی “700 kV-AC”

بابک گرامی نژاد ، کارشناس ارشد سازه ، شرکت مهندسی صاعدان صنعت ، تهران*
غلامرضا قدرتی امیری ، استادیار دانشکده عمران ، دانشکده علم و صنعت ایران ، تهران
جواد واثقی امیری ، استاد یار دانشکده فنی ، دانشگاه مازندران ، بابل

واژه‌های کلیدی: برج‌های مهاری، خطوط انتقال نیرو، خطوط فشار قوی.

چکیده:

از میان مسایل مطرح در صنعت برق ، انتقال انرژی الکتریکی سهم مهمی را به خود اختصاص داده است. در صورتیکه از خطوط انتقال با ولتاژ بالاتر استفاده شود می‌توان تلفات اهمی انتقال خطوط را به حداقل رسانید و در نتیجه می‌توان انرژی الکتریکی را به نقاط دور دست انتقال داد و امکان مبادله انرژی را با کشورهای همسایه فراهم نمود. با افزایش ولتاژ خطوط انتقال فواصل الکتریکی و از جمله ارتفاع برج افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث افزایش فولاد مصرفی و وزن ساده می‌گردد. استفاده از برجهای مهاری جهت صرفه‌جویی در میزان مصالح مصرفی و کاهش وزن سازه راه‌حل مناسبی به نظر می‌آید از میان فرم‌های هندسی مناسب جهت خطوط انتقال با ولتاژ بالا فرم CRS پیشنهاد میگردد. در این تحقیق از سازه CRS جهت خطوط انتقال انرژی با ولتاژ AC - 700kV

بهره گرفته شده است. سپس توضیح مختصری در مورد نرم‌افزار ANSYS که یک نرم‌افزار تحلیلی بسیار قوی می‌باشد به همراه المانهای بکار رفته در مدلسازی سازه ارائه میگردد و در ادامه با استفاده از قابلیت‌های بهینه‌سازی نرم‌افزار مزبور نسبت به بهینه‌سازی و طراحی همزمان سازه CRS اقدام می‌شود.

مقدمه:

هدف اصلی صنعت برق در کشور، تولید، انتقال و توزیع نیروی برق می‌باشد. از مهمترین قسمتهای این مجموعه سیستم انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاهها به نقاط دور و نزدیک می‌باشد. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال نیرو باعث صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌ها و بالابردن کارایی و قابلیت‌های این مجموعه می‌گردد. یکی از روشهای بهینه‌سازی برای انتقال انرژی الکتریکی

استفاده از ولتاژ بالا و جریان کم می باشد که باعث می شود تلفات اهمی خطوط انتقال به حداقل برسد و بدین ترتیب می توان از یک نیروگاه انرژی الکتریکی را به نقاط دور دست با اتلاف انرژی کم انتقال داد و از ایجاد نیروگاههای متعدد جلوگیری نمود و از طرفی می توان با بکارگیری ولتاژ بالا شبکه های خطوط انتقال نیروی داخل کشور را با کشورهای همسایه ارتباط داد و امکان ایجاد صادرات و واردات انرژی الکتریکی را فراهم نمود. تأسیسات انتقال قدرت EHVAC (فشار قوی در حد بالا) در کشور ایران تاکنون اجرا نشده است در ایران اولین خط انتقال 700 kV-AC بود و سپس با افزایش جمعیت و لزوم گسترش خطوط انتقال به اکثر نقاط کشور ولتاژ خطوط به ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰ و در نهایت به ۴۰۰ kV جریان متناوب رسید. با بالابردن ولتاژ خطوط تجهیزات خطوط انتقال نظیر هادیها، مقره ها تغییر می یابند و ملزومات الکتریکی و حریم خطوط و در نتیجه ارتفاع و وزن دکلها افزایش می یابند یکی دیگر از روشهای بهینه سازی خطوط انتقال استفاده از دکلهای مهاری جهت هر چه بیشتر اقتصادی کردن طرح می باشد بطوریکه در ارتفاع حدود ۵۰ الی ۱۰۰ متر وزن سازه دکل مهاری حدود ۵۰ درصد وزن سازه دکل خودایستای متناظر آن تخمین زده می شود. در ایران استفاده از دکلهای مهاری انتقال نیرو متداول نبوده و گامهای اولیه خود را بر می دارد. در این تحقیق از دکل مهاری و فرم سازه CRS جهت خط انتقال

استفاده از ولتاژ بالا و جریان کم می باشد که باعث می شود تلفات اهمی خطوط انتقال به حداقل برسد و بدین ترتیب می توان از یک نیروگاه انرژی الکتریکی را به نقاط دور دست با اتلاف انرژی کم انتقال داد و از ایجاد نیروگاههای متعدد جلوگیری نمود و از طرفی می توان با بکارگیری ولتاژ بالا شبکه های خطوط انتقال نیروی داخل کشور را با کشورهای همسایه ارتباط داد و امکان ایجاد صادرات و واردات انرژی الکتریکی را فراهم نمود. تأسیسات انتقال قدرت EHVAC (فشار قوی در حد بالا) در کشور ایران تاکنون اجرا نشده است در ایران اولین خط انتقال 700 kV-AC بود و سپس با افزایش جمعیت و لزوم گسترش خطوط انتقال به اکثر نقاط کشور ولتاژ خطوط به ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰ و در نهایت به ۴۰۰ kV جریان متناوب رسید. با بالابردن ولتاژ خطوط تجهیزات خطوط انتقال نظیر هادیها، مقره ها تغییر می یابند و ملزومات الکتریکی و حریم خطوط و در نتیجه ارتفاع و وزن دکلها افزایش می یابند یکی دیگر از روشهای بهینه سازی خطوط انتقال استفاده از دکلهای مهاری جهت هر چه بیشتر اقتصادی کردن طرح می باشد بطوریکه در ارتفاع حدود ۵۰ الی ۱۰۰ متر وزن سازه دکل مهاری حدود ۵۰ درصد وزن سازه دکل خودایستای متناظر آن تخمین زده می شود. در ایران استفاده از دکلهای مهاری انتقال نیرو متداول نبوده و گامهای اولیه خود را بر می دارد. در این تحقیق از دکل مهاری و فرم سازه CRS جهت خط انتقال

تشریح مدل، ملزومات الکتریکی و مدلسازی توسط ANSYS:

همانطوریکه اشاره گردید مدل هندسی CRS جهت خطوط با ولتاژ بالا مناسب می باشد. این سازه از دو تیرک مایل که توسط بازوهای کابلی به یکدیگر و به تکیه گاه متصل هستند تشکیل شده است سیم های فاز از میان دو تیرک و بوسیله و مقره ها به بازوهای کابلی متصل هستند سیم های زمین در منتهی الیه فوقانی تیرکها نصب می شوند. فاصله بین تیرکها و همچنین ارتفاع سازه تابعی از ولتاژ خطوط می باشد در مدل مورد مطالعه فاصله عرضی بین تیرکها برابر ۳۶ متر و ارتفاع تیرکها ۵۴ متر می باشد (مطابق شکل ۱). زاویه حفاظت خطوط در این حالت بدلیل قرارگیری سیم های فاز در بین دو تیرک مناسب می باشد. در این سیستم هر فاز شامل ۴ هادی فرعی می باشد که در ۴ رأس یک مربع به ابعاد ۱۸ اینچ قرار گرفته اند همچنین مقره های بکار رفته برای هر سیستم هادی در هر فاز از ۲ رشته مقره آویز به ابعاد ۱۱×۶/۷۵ اینچ مربع تشکیل می شود که هر رشته شامل ۲۸ عدد مقره مجزا می باشد. مشخصات هادیهای فرعی و سیم های زمین که برای انتقال 700 kV-AC در این تحقیق در نظر گرفته شده است به شرح جداول زیر می باشند. [۲]

جدول ۱- مشخصات سیم هادی

نام سیم	قطر هر رشته (mm) × تعداد		قطر خارجی (mm)	سطح مقطع (mm ²)		وزن (Kg/Km)	حد گسیختگی (Kg)
	آلومینیوم	فولاد		آلومینیوم	کل		
Curlew	۵۴ × ۳/۵۱۵	۷ × ۳/۵۱۵	۳۱/۶۵	۵۲۳/۷	۵۹۱/۲	۱۹۸۰	۱۶۸۴۳

جدول ۲- مشخصات سیم محافظ زمین

نام سیم	قطر هر رشته (mm) × تعداد	قطر خارجی (mm)	سطح مقطع (mm ²)	وزن (Kg/Km)	حد گسیختگی (Kg)
مغزی کرلو	۷ × ۳/۵۱۵	۱۰/۵۳	۶۷/۸۷	۵۲۹/۵	۸۸۱۰

انجام تحلیلها در این تحقیق از نرم افزارها ANSYS بهره گرفته شده است در این نرم افزار برای مدل کردن المانهای قاب از المان Beam3D و برای المانهای خرابایی از المان LINK8 و برای المانهای کابل از المان Link10 استفاده گردیده است. جهت بارگذاری هادیها از برنامه Sag Tension استفاده گردیده است و همچنین برای بارگذاری باد بر برج آئین نامه EIA/TIA استفاده شده است و در نهایت طراحی سازه مطابق آئین نامه ASCE 52 صورت پذیرفته است. [۳]

قابلیت های ANSYS، طراحی و بهینه سازی همزمان سازه CRS:

نرم افزار ANSYS یک برنامه بسیار قدرتمند در زمینه آنالیز سازه ها می باشد که قابلیت تحلیل خطی، غیر خطی هندسی و غیر خطی مصالح سازه را دارا می باشد و همچنین در تحلیل سازه ها از سرعت بالایی برخوردار است.

نرم افزار ANSYS فقط جهت آنالیز سازه ها استفاده می گردد و قابلیت، طراحی سازه ها را ندارد همچنین برای هر بار آنالیز فقط می توان یک ترکیب بارگذاری به آن اعمال نمود و برای بارگذاری بعدی باید پس از حذف بارگذاری های قبلی بارهای جدید را اعمال نمود و آنالیز را صورت داد که این امر در مورد دکلهای انتقال نیرو که شامل چندین

طراحی سازه برای دهانه معادل طراحی ۵۰۰ متر صورت پذیرفته است همچنین محدودیتها و فواصل الکتریکی که باید در طراحی مد نظر قرار گیرد به شرح زیر می باشند:

۱- فاصله فاز تا برج ۱۷/۱ فوت

۲- فاصله فاز تا زمین ۴۵ فوت

۳- فاصله فاز تا فاز ۳۹/۴ فوت

جهت مدل کردن دکل مهاری CRS اعضای پایه تیرک به صورت عناصر قابی، دارای قابلیت تحمل ممان حول سه جهت محورهای مختصات و اعضای قطری تیرک به صورت عناصر خرابایی دارایی قابلیت تحمل نیروی محوری فشار و یا کشش و همچنین اعضاء کابلی نیز به صورت عناصر خرابایی دارای قابلیت تحمل کشش تنها مدل گردیده اند. شایان ذکر است اعضاء قطری تیرک باید قابلیت تحمل بار متمرکز 100Kg را در وسط دهانه که شامل وزن فرد بعلاوه تجهیزات می باشد را داشته باشند همچنین میزان پیش تنیدگی کابلها حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد حداکثر ظرفیت کششی آنها در نظر گرفته شده است.

بدلیل حضور عناصر کابلی در دکلهای مهاری انجام تحلیل غیر خطی هندسی در سازه اجتناب ناپذیر می باشد زیرا تغییرات وضعیت آنی کابل از حالت سفت به شل و یا بلعکس باعث تغییر سختی ناگهانی کابلها و در نهایت کل سازه می گردد که لزوم انجام تحلیل غیر خطی هندسی را مشخص می سازد. جهت

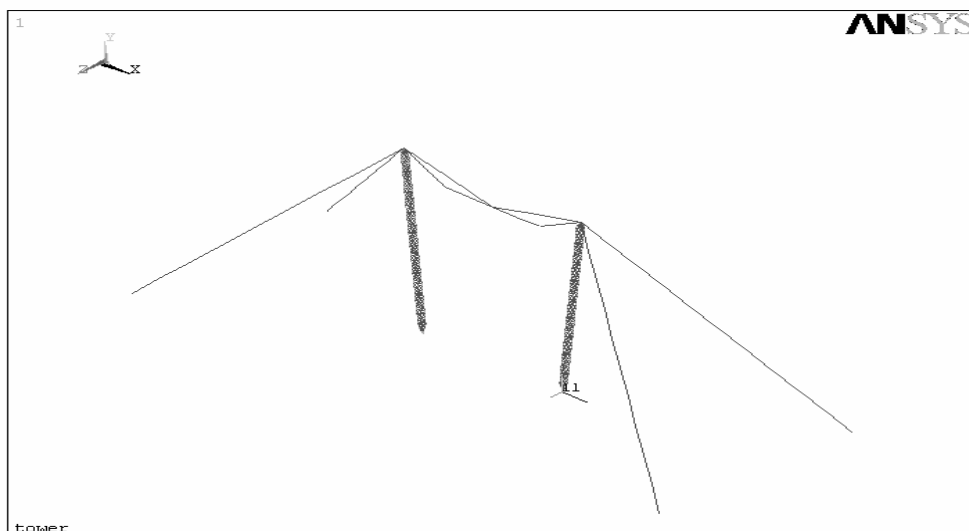
کمیتی را بعنوان پارامتر هدف (Objective) برای ANSYS معرفی نماید که وظیفه ANSYS تغییر در پارامترهای طراحی به نحوی است که پارامترهای وضعیت در محدوده مشخص قرار گیرند و از سوی دیگر پارامتر هدف کمینه گردد. موارد فوق الذکر توسط یک ماکرو دیگر جهت انجام عملیات بهینه سازی در طرح سازه CRS صورت پذیرفته است. در این ماکرو ابعاد و زاویه انحراف تیرک به عنوان پارامترهای طراحی و تنش مجاز فشاری به عنوان پارامتر وضعیت و وزن سازه نیز به عنوان پارامتر هدف تعیین گشته اند به این ترتیب ANSYS ابعاد و زاویه انحراف تیرک را به نحوی تغییر می دهد که تنش اعضاء از تنش مجاز کمتر بوده و وزن سازه نیز کمینه گردد و در نهایت فرم بهینه سازه CRS حاصل می آید.

نکته جالب توجهی که در ماکروهای مذکور قابل ذکر است قابلیت تصحیح بارباد بر برج بر مبنای تغییرات عرض تیرک و زاویه انحراف آن می باشد به عبارت دیگر با تغییر ابعاد و زاویه انحراف تیرک حین پروسه بهینه سازی میزان بارباد بر برج مطابق آئین نامه EIA/TIA تصحیح شده سپس بر سازه اعمال می گردد.

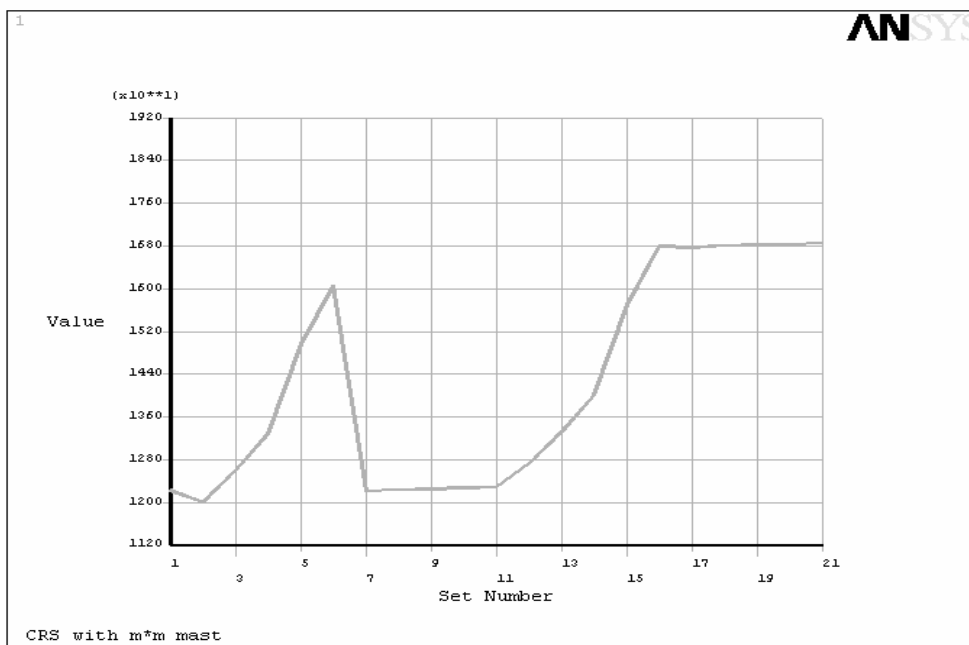
نتایج پروسه بهینه سازی در اشکال ۲ الی ۵ آورده شده است و منحنی های تغییر شکل عرضی و تنش فشاری حداکثر برای حالت بارگذاری بحرانی به همراه جدول نتایج در ادامه آورده شده است. شایان ذکر است بعد تیرک و زاویه انحراف آن پس از بهینه سازی به ترتیب معادل ۱/۵۵ متر و ۱۰ درجه و وزن کل سازه معادل ۱۴۰۲۰ کیلوگرم حاصل آمد. [۴]، [۵]

ترکیب بارگذاری می باشند در ابتدا مشکل به نظر می رسد همچنین از نظر طراحی لازم است همه ترکیبات بارگذاری کنترل شده و سپس نیروی حاکم بر عضو بدست آید و طراحی عنصر براساس آن نیرو صورت پذیرد ولی از سوی دیگر این نرم افزار قابلیت دیگری در اختیار کاربرد قرار می دهد که آن امکان نوشتن برنامه در محیط ANSYS می باشد که به ماکرو موسوم است در این تحقیق با استفاده از یک ماکرو کلیه نقاط ضعف برنامه که در بالا ذکر شد مرتفع می گردد به عبارت دیگر این ماکرو از کاربر ابعاد و زاویه انحراف تیرک را پرسیده سپس به عملیات مدل سازی می پردازد در مرحله بعد کلیه حالات بارگذاری را به صورت مجزا به سازه اعمال نموده و سازه را آنالیز می نماید و نتایج تنش ها را در یک آرایه ذخیره کرده و بحرانی ترین حالت تنش را در اختیار کاربر قرار می دهد سپس مهندس طراح می تواند بر مبنای حداکثر تنش بحرانی اقدام به طراحی اعضاء نماید.

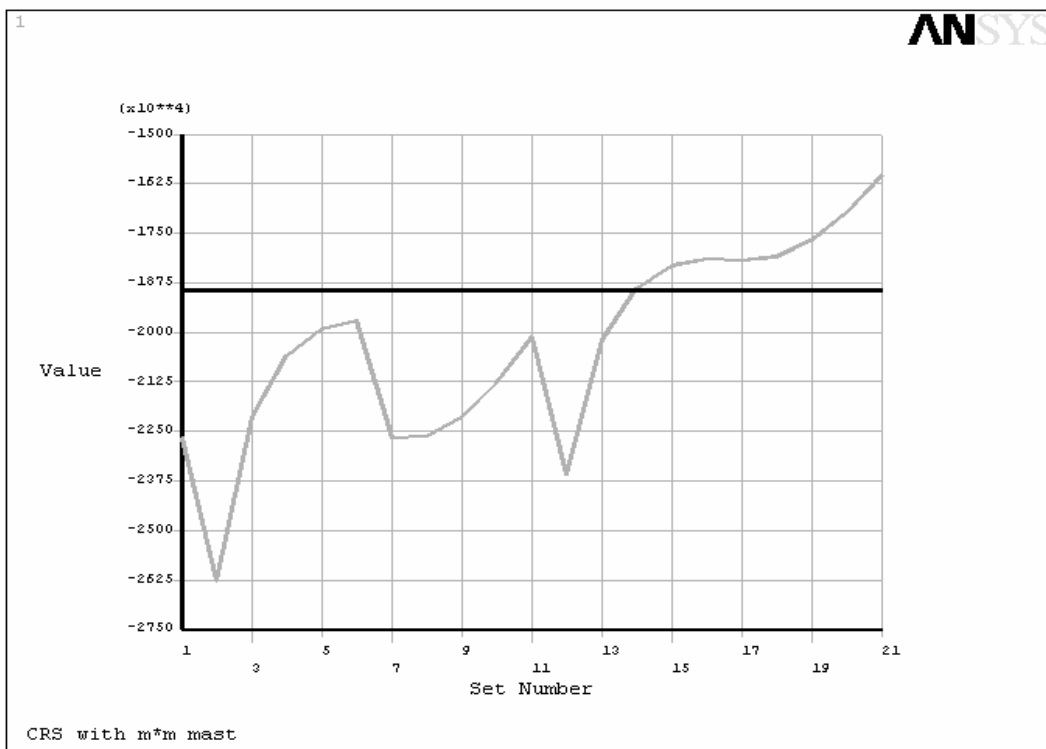
نرم افزار ANSYS دارای ویژگی دیگری نیز می باشد که آن قابلیت بهینه سازی سازه یا طراحی بهینه می باشد. به این ترتیب که کاربر می باید یکسری پارامتر را بعنوان پارامترهای طراحی (Design Variable) به ANSYS معرفی نماید این پارامترها در حین انجام عملیات تکرار پروسه بهینه سازی دائماً تغییر می یابند از سوی دیگر به ازاء هر مقدار از پارامترهای طراحی یکسری خروجی پس از تحلیل در ANSYS بوجود می آید که از بین آنها کاربر باید پارامتری را بعنوان پارامتر وضعیت (State Variable) به ANSYS معرفی نماید که در حقیقت شروط کاربر جهت انجام عملیات بهینه سازی می باشند و در نهایت کاربر می باید



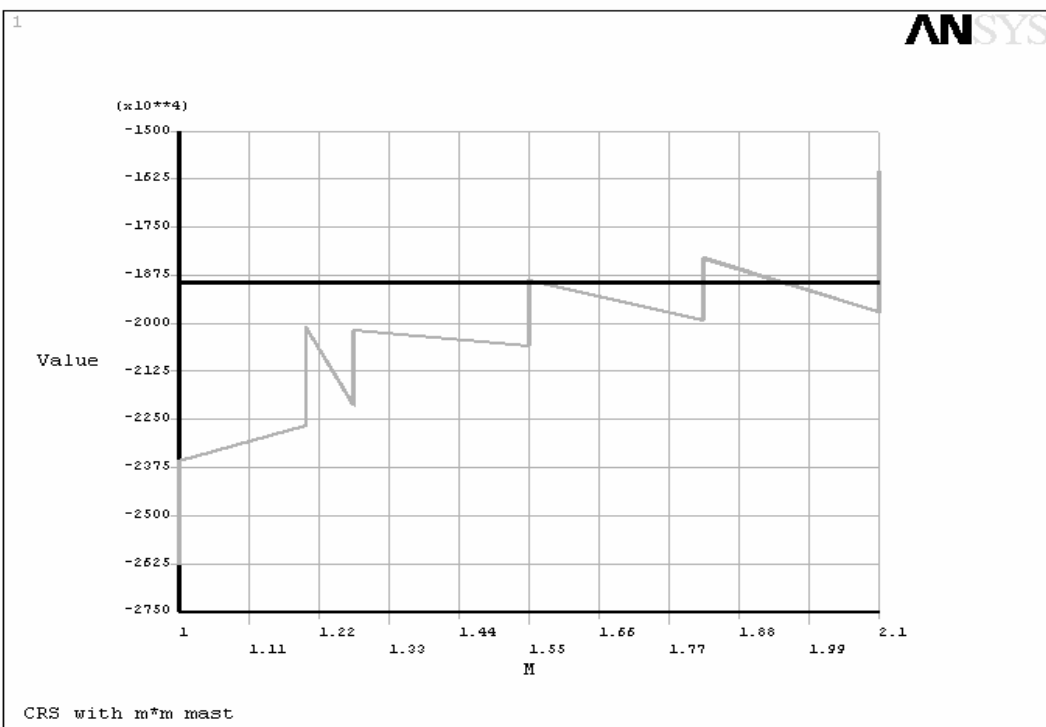
شکل-۱- سازه CRS



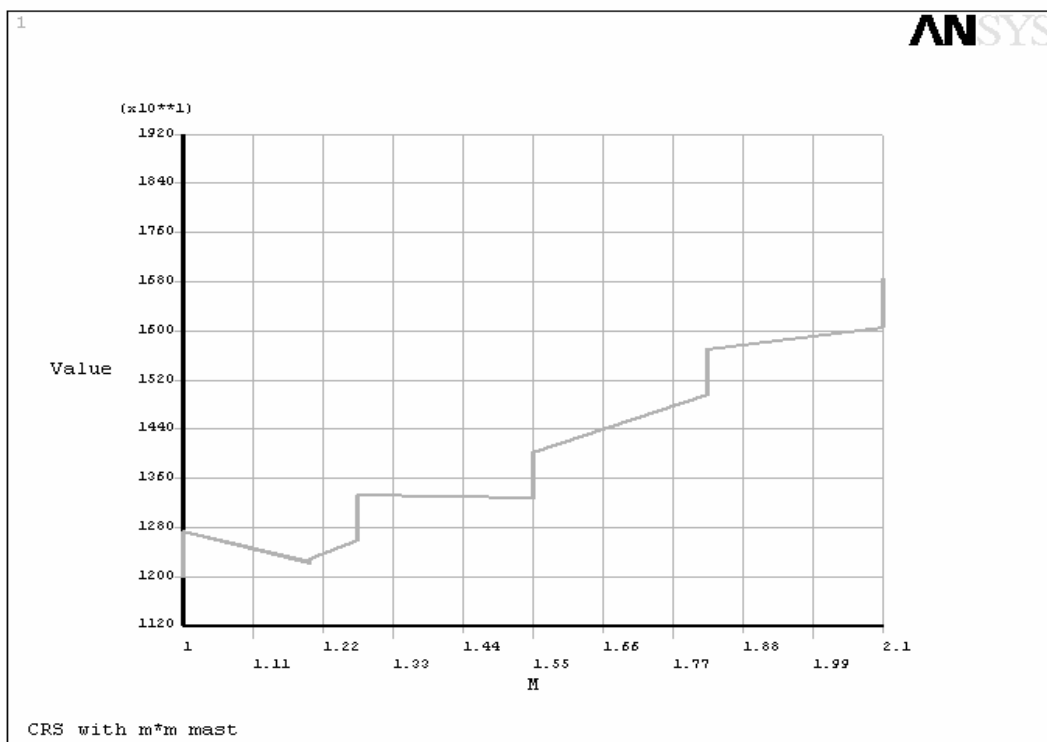
شکل-۲- منحنی تغییرات وزن حین پروسه بهینه سازی



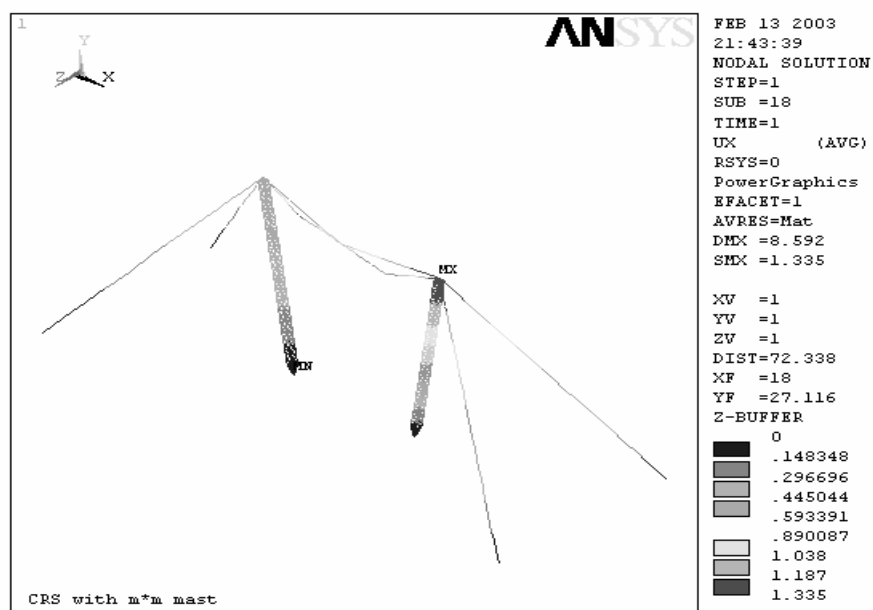
شکل ۳- منحنی تغییرات تنش حداکثر فشاری حین پروسه بهینه سازی



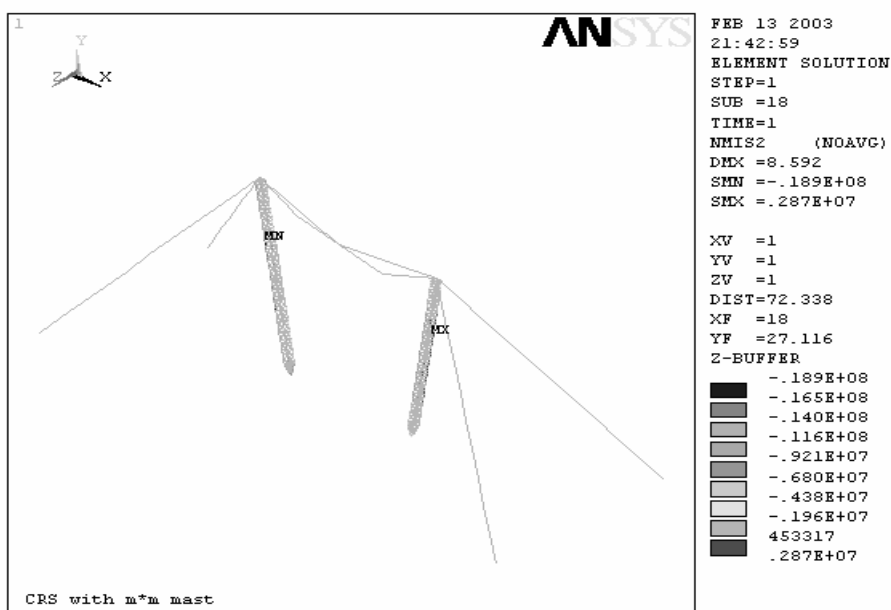
شکل ۴- منحنی تغییرات تنش حداکثر فشاری با ابعاد تیرک



شکل-۵- منحنی تغییرات وزن با ابعاد تیرک



شکل-۶- تغییر شکل عرضی تحت حالت بارگذاری بحرانی در سازه بهینه



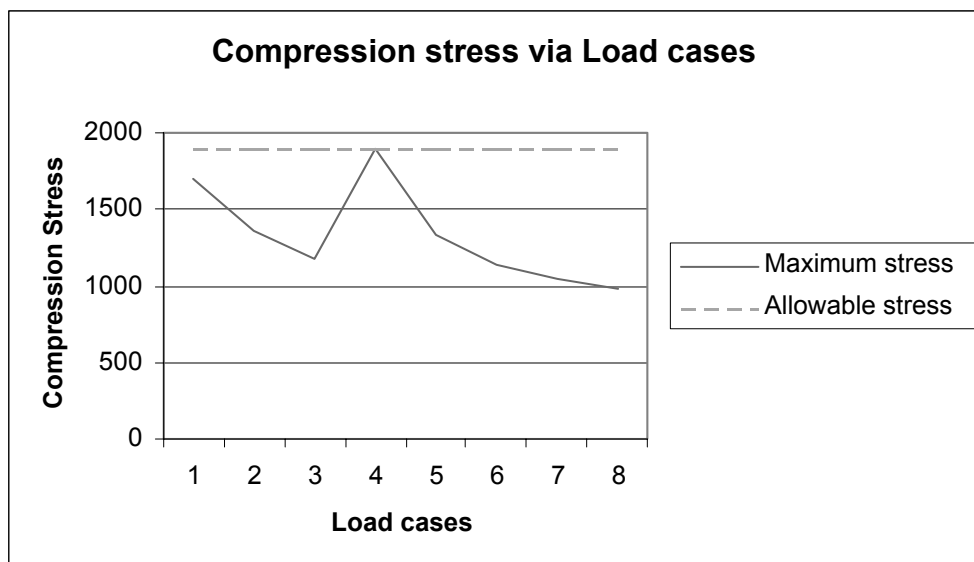
شکل ۷- تغییرات تنش محوری، خمشی تحت حالت بارگذاری بحرانی در سازه بهینه

جدول ۳- مشخصات اعضای سازه بهینه شده CRS

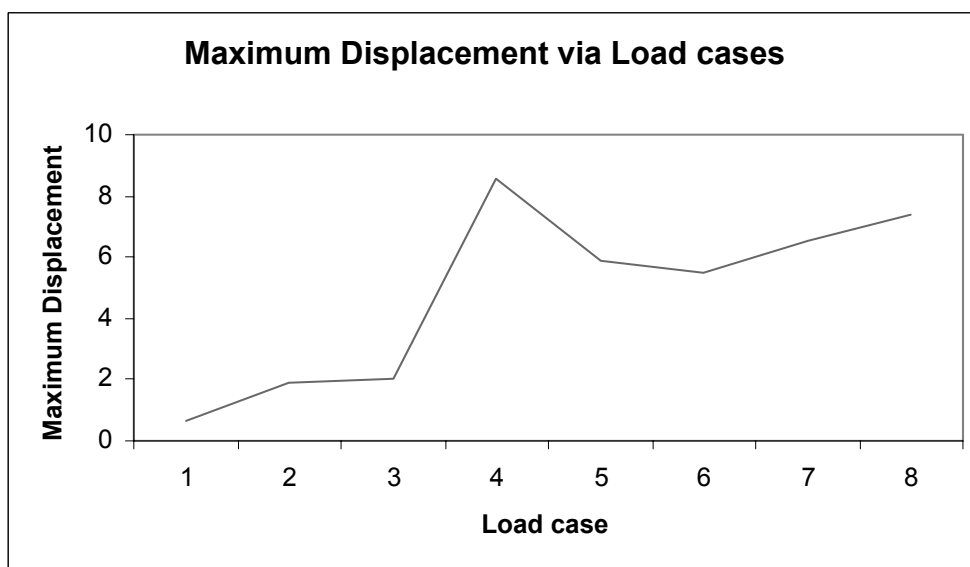
تنش نهایی (Kg/cm^2)	تنش مجاز (Kg/cm^2)	شماره مقطع	نوع المان	اعضای سازه
---	1894	L120 × 12	Beam 4	اعضای پایه
---	570	L50 × 4	Link8	اعضای قطری
17700	---	Φ32	Link 10	اعضای کابلی

جدول ۴- خلاصه نتایج تنش و تغییر شکل در سازه بهینه CRS

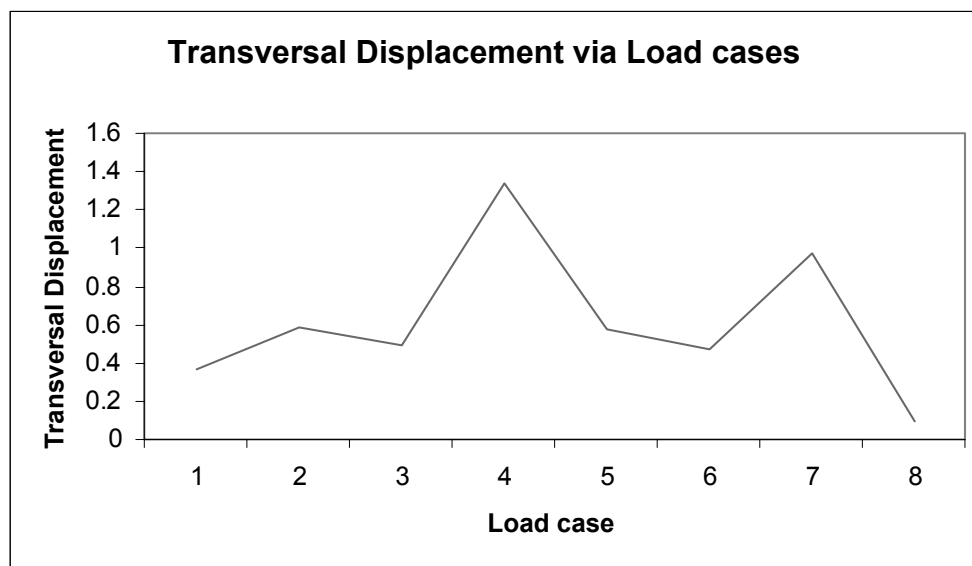
تغییر شکل عرضی حداکثر (m)	تغییر شکل حداکثر (m)	تنش حداکثر (Kg/cm^2)	حالات بارگذاری
0.366533	0.668585	-1700	حالت یک
0.58539	1.883	-1360	حالت دو
0.48744	2.02	-1180	حالت سه
1.335	8.592	-1890	حالت چهار
0.575491	5.854	-1330	حالت پنج
0.474317	5.472	-1140	حالت شش
0.967837	6.556	-1050	حالت هفت
0.091532	7.354	-975	حالت هشت



شکل ۸- منحنی تغییرات تنش حداکثر با حالات بارگذاری در مدل بهینه



شکل ۹- منحنی تغییرات تغییر شکل حداکثر با حالات بارگذاری در مدل بهینه



شکل ۱۰- منحنی تغییرات تغییر شکل عرضی با حالات بارگذاری در مدل بهینه

برای سازه‌های مهاری نرم‌افزار ANSYS مناسب تشخیص داده می‌شود زیرا این نرم‌افزار قابلیت بسیار بالایی در آنالیز سازه‌ها دارد. با کمک از یک ماکرو می‌توان عملیات طراحی و بهینه‌سازی را برای حالات بارگذاری متعدد در سازه‌ها انتقال نیرو صورت داد.

مراجع و منابع:

- [1] United States Department of Interior Bureau of Reclamation, "Transmission structures: design supplement No.10", 1951.
- [2] Kravitz, R.A. and Samuelson, J., "Tower design for AEP 765 kv-Ac," *Journal of the Power Divisions*, Vol. 95, No. po2, 1969, pp.305-319.
- [3] Ghannoum, E. (senior member of IEEE), "Hydro-Quebec's experience with the design and construction of 1500 km of 735 chainette transmission lines," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985, pp.2832-2843.
- [4] ASCE manuals and reports on engineering practice No. 52, "Guide for design of steel transmission towers", second edition, American Society of the Civil Engineers, 1988.
- [5] TIA/EIA Standard, "Structural standards for steel antenna towers and antenna supporting structures", ANSI/TIA/EIA-222F, 1996.

نتیجه گیری:

در این تحقیق سازه دکل CRS جهت خط انتقال AC - 700 kV مورد بررسی قرار گرفت و نسبت به بهینه سازی آن اقدام گردید. از جمله نتایج حاصله عبارتند از:

- ۱- از آنجائیکه اعضاء تیرک در دکل مهاری CRS تحت خمش و فشار توام قرار دارند و یک عضو خمشی فشاری محسوب می‌گردند ابعاد تیرک می‌تواند در حصول به فرم بهینه نقش تعیین کننده‌ای دارا باشد.
- ۲- زاویه انحراف تیرک نسبت به امتداد قائم می‌تواند در بهینه‌سازی دکل موثر باشد بدین ترتیب که با تغییر زاویه انحراف تیرک میزان بار باد بر سازه دکل تغییر می‌کند که سبب تغییر تنش‌های درونی اعضاء می‌شود.
- ۳- اعضاء قطری تیرک عموماً بر مبنای قابلیت تحمل بار متمرکز ۱۰۰ کیلوگرم در وسط دهانه که شامل وزن فرد بعلاوه تجهیزات بوده و حداکثر ضریب لاغری مجاز طراحی می‌شوند. بدیهی است پس از تحلیل مقادیر تنش اعضاء مزبور با تنش مجاز باید کنترل شوند.
- ۴- با توجه به لزوم انجام تحلیل غیر خطی هندسی