

## طراحی و ساخت برجهای خنک کن با استفاده از شبکه‌های کابلی

شهرام اردبیلی  
پژوهشگاه نیرو - گروه پژوهشی سازه

آزاده طاهری مقدم  
شرکت متن - بخش سازه های صنعتی

واژه های کلیدی: برجهای خنک کن - شبکه‌های کابلی

### مقدمه

سازه‌های کابلی گروهی از سازه‌های کششی هستند که در آنها اعضای اصلی باربر، بارهای وارده را به شکل تنش محوری کششی به تکیه‌گاه انتقال می‌دهند. سازه‌های کابلی خود به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

- کابل‌های منفرد
- خرپاهای کابلی
- تورهای کابلی
- شبکه‌های کابلی

برج خنک کن کابلی در دسته چهارم قرار می‌گیرد که در آن اعضا کابلی به شکل شبکه‌ای از کابل بوده و مولفه‌های نیرو متناظر با درجات آزادی فعال حضور دارند.

سازه‌های کششی در مقایسه با سازه‌های اسکلتی معمولی به سبب سختی کمتر خود در مقابل نیروهای وارده تغییر شکلهای بزرگتری را متحمل می‌شوند. پاسخ هر سازه کششی به نیروهای پیش‌تندگی همواره غیرخطی است زیرا اعضا کابلی که جزئی از این سازه هستند در قبال این نیروها رفتار

### چکیده

برجهای خنک‌کن در نیروگاههای حرارتی وظیفه دفع حرارت زائد تولید شده بطور مناسب به محیط اطراف را بعهده دارند. از نظر نحوه عملکرد برجهای خنک‌کن به دو دسته برجهای تر و برجهای خشک تقسیم‌بندی می‌شوند. برجهای خنک‌کن خشک معمولاً گرانتر از برجهای تر هستند با اینحال در کشورهایی که مصرف آب بدلیل محدودیت آن باید براساس یک مدیریت دقیق انجام گیرد و همچنین در مناطقی که آب لازم برای فرآیند سردکردن در دسترس نیست از برجهای خشک استفاده می‌شود.

برجهای خنک کن خشک بطور معمول به شکل پوسته‌های بتنی جدار نازک و یا اسکلت مشبک فولادی ساخته می‌شوند. در این مقاله نوع دیگری از برجهای خنک‌کن که بصورت شبکه کابلی مهار شده می‌باشد معرفی شده و شیوه تحلیل و طراحی سازه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین مقایسه‌ای بین یک برج خنک‌کن فلزی موجود و برج کابلی طراحی شده با ابعاد هندسی مشابه انجام شده است.

موثر بر سازه برج خنک‌کن کابلی و ترکیبات بارگذاری مربوطه مدنظر بوده است.

بار باد بر هر یک از سطوح داخلی و خارجی پوشش برج خنک‌کن وارد می‌شود که اثر هر یک جداگانه در نظر گرفته می‌شود. توزیع فشار باد در ارتفاع براساس مدارک محاسباتی برج خنک‌کن موجود که برج فولادی نیروگاه شهید رجایی می‌باشد مطابق جدول زیر است.

| ارتفاع از سطح زمین<br>(m) | سرعت باد<br>m/s | فشار مبنا<br>kg/m <sup>2</sup> |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| ۰ تا ۱۰                   | ۳۴/۷            | ۷۵                             |
| ۱۰ تا ۲۰                  | ۴۱/۱            | ۱۰۰                            |
| ۲۰ تا ۱۰۰                 | ۴۶/۳            | ۱۳۵                            |

در ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر بازای هر ۳۰ متر، ۱۲/۵ کیلوگرم بر متر مربع به فشار مبنا افزوده می‌شود.

### ۱-۲- بار باد خارجی

توزیع افقی بار باد به سطح خارجی برج خنک‌کن مطابق روش پیشنهادی پروفیسور زرنا انجام گرفته است در این روش بار باد خارجی بصورت متمرکز روی گره‌ها وارد می‌شود و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_i = A_i \cdot P_i \cdot C_k$$

که در آن:

$P_i$ : نیروی وارد به گره  $i$

$A_i$ : مساحت بادگیر متناظر با گره  $i$

$P_i$ : فشار باد مبنا در ارتفاع نظیر گره  $i$

$C_k$ : ضریب اثر شعاعی متناظر با موقعیت گره  $i$  در پلان

### ۲-۲- بار باد داخلی

بار باد داخلی در زمستان و بدلیل بسته بودن کرکرها در سطح داخلی برج و بصورت مکش بوجود می‌آید. مقدار این مکش در هر نقطه مستقل از موقعیت آن در پلان و ارتفاع است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

غیرخطی دارند. پاسخ سازه‌های کششی به بارهای سرویس بسته به جهت و اندازه نیروهای وارده و نسبت به حالت تنش و آرایش سازه پیش‌تنیده می‌تواند غیرخطی یا شبه خطی باشد. این پاسخ بطور دقیق خطی نیست و بنابراین اصل اجتماع آثار قوا بطور کامل برقرار نیست. بطور معمول تنها در نظرگیری رفتار خطی مواد برای سازه‌های کششی کافی است.

### ۱- اجزاء سازه‌ای تشکیل دهنده برج

برج خنک‌کن کابلی از یک ستون میانی از جنس بتن آرمه و یک شبکه کابلی هذلولی مدور پیش‌تنیده تشکیل شده است. شبکه کابلی در بالا از طریق یک حلقه فولادی و تعدادی کابل از راس ستون بتنی آویزان بوده و در پایین به یک پی حلقوی بسته شده است.

به منظور تامین سختی لازم در مقابل بارهای جانبی دو حلقه فولادی در ترازهای میانی شبکه کابلی تعبیه شده است. این حلقه‌ها بوسیله تعدادی کابل بصورت شعاعی به یک رینگ داخلی که حول ستون بتنی قرار گرفته ولی با آن تماس ندارد متصل شده است.



شکل ۱-۱- شمای کلی برج خنک‌کن کابلی

### ۲- بارگذاری

با توجه به اینکه هدف از این مطالعه مقایسه یک برج خنک‌کن فولادی با نمونه کابلی آن است بارگذاری برج مطابق بارگذاری برج خنک‌کن فولادی موجود در نظر گرفته شده است. مهمترین بار وارد بر سازه برج خنک‌کن فولادی بار باد است. لذا در این بررسی صرفاً بار باد بعنوان عمده‌ترین بار

ضریب پواسون بتن مسلح :

$$V_c = 0.15$$

مدول ارتجاعی اعضای کابلی :

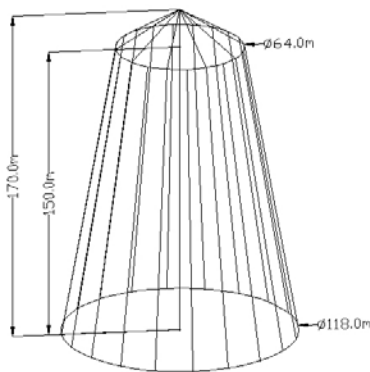
$$E_{CL} = 1.67 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$$

وزن مخصوص اعضای کابلی :

$$D_{CL} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

### ۱-۳- ابعاد هندسی برج خنک کن کابلی

مطابق شکل ارتفاع ستون بتنی ۱۷۰ متر و قطر شبکه کابلی در ترازهای ۰ متر و ۱۵۰ متر به ترتیب برابر ۱۱۸ متر و ۶۴ متر انتخاب شده است.



شکل ۱-۳-۱- ابعاد هندسی برج خنک کن کابلی

برای مدل نمودن سازه از طرحهای متعددی در مدلسازی استفاده شده و در هر مرحله ضمن توجه به استعدادهای طرح موجود سعی شده تا نیازهای آن در طرح بعدی تامین گردد.

### ۲-۳- مدل اول

مطابق شکل شبکه کابلی در ارتفاع و پلان به ترتیب از ۱۵ و ۲۰ قسمت تشکیل شده است.

$$P_i = A_i \cdot P_f \cdot C_b$$

که در آن :

$P_i$ : نیروی باد داخلی بر روی گره  $i$

$A_i$ : سطح متناظر با گره  $i$

$P_f$ : فشار باد مبنا در ارتفاع انتهای فوقانی برج خنک

کن ( $\text{kg/cm}^2$ )

$C_b$ : ضریب ثابت برابر ۰.۴

### ۲-۳- ترکیب بارگذاری

ترکیب بارها مطابق با بارگذاری برج خنک کن نیروگاه

شهید رجایی به شرح زیر در نظر گرفته شده است :

الف) بار مرده + بار باد خارجی

ب) بار مرده + بار باد خارجی + بار باد داخلی

بار مرده برای پوشش بدنه برج خنک کن که ورق آلومینیمی

موج دار می باشد ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

با توجه به هندسه پیچیده دکل و تعداد زیاد گره ها، برای

تهیه داده های بارگذاری از نرم افزاری که به همین منظور

توسعه یافته، استفاده شده است.

### ۳- تحلیل برج خنک کن کابلی

برای تحلیل برج خنک کن کابلی از نرم افزار Ansys 5.4

استفاده شده است. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای

برج خنک کن کابلی به شرح زیر می باشد:

مدول ارتجاعی اعضای فولادی :

$$E_s = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$$

وزن مخصوص مصالح فولادی :

$$D_s = 7850 \text{ kg/m}^3$$

ضریب پواسون مصالح فولادی :

$$V_s = 0.3$$

مدول ارتجاعی اعضای بتن مسلح :

$$E_c = 2.5 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

وزن مخصوص مصالح بتن مسلح :

$$D_c = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 40\text{cm}^2$$

$$ISTRN = 0.001$$

د) کابلهای افقی

$$A = 20\text{cm}^2$$

$$ISTRN = 0.001$$

هـ) کابلهای قطری

$$A = 10\text{cm}^2$$

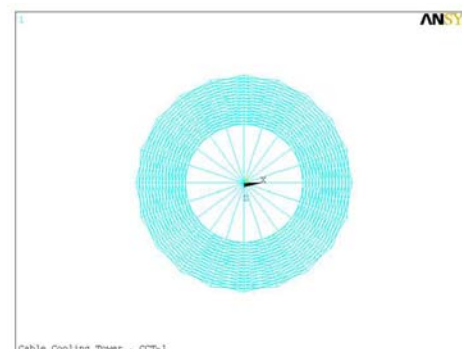
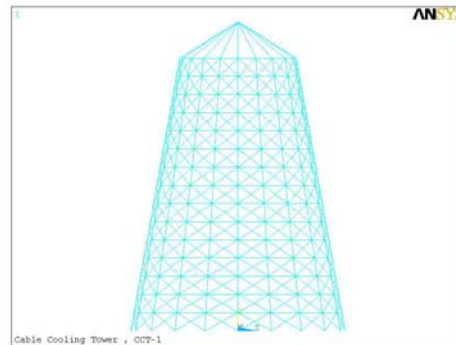
$$ISTRN = 0.001$$

و) کابلهای چتری

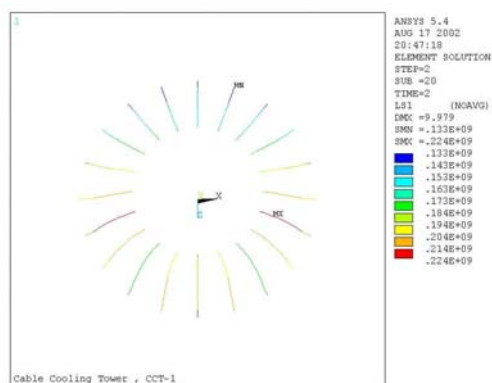
$$A = 20\text{cm}^2$$

$$ISTRN = 0.00001$$

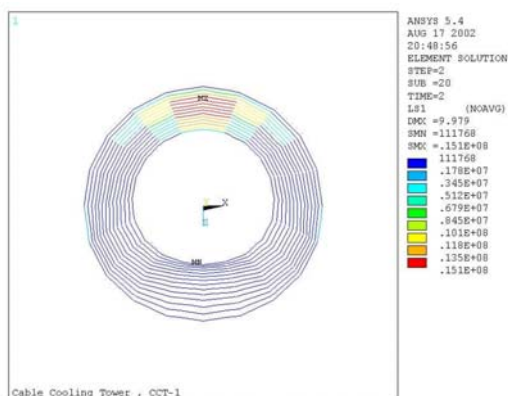
در شکلهای ۲-۲-۳ تا ۷-۲-۳ نتایج توزیع تنش در اجزای مختلف سازه برج در مقابل بارگذاری اعمال شده نشان داده شده است.



شکل ۱-۲-۳-۱- نمای قائم و افقی مدل اول



شکل ۲-۲-۳-۲- تنش در کابلهای قائم



شکل ۲-۲-۳-۳- تنش در کابلهای افقی

در این مدل محل برخورد قطرها بعنوان گره تعریف شده اما بار باد خارجی صرفاً به گره‌هایی که در محل تلاقی اعضای افقی، قائم و قطری قرار گرفته‌اند اعمال شده است.

مشخصات اعضا بکار رفته به شرح زیر می‌باشد:

الف) ستون بتن مسلح (لوله‌ای به قطر ۶ متر و ضخامت ۳۰ سانتیمتر)

$$A = 5.65\text{m}^2$$

$$I_x = I_y = 25.511\text{m}^4$$

$$t_x = t_y = 6\text{m}$$

$$I_z = 51.02\text{m}^4$$

ب) حلقه فولادی بالایی (لوله‌ای به قطر ۱/۵ متر و

ضخامت ۳ سانتیمتر)

$$A = 0.14137\text{m}^2$$

$$I_x = I_y = 0.03978\text{m}^4$$

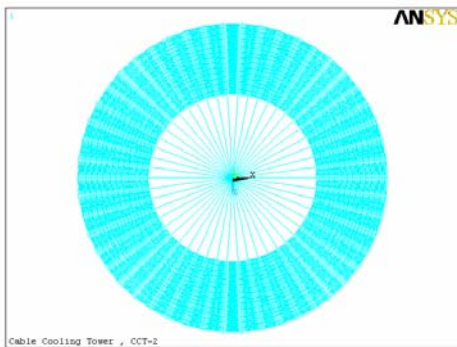
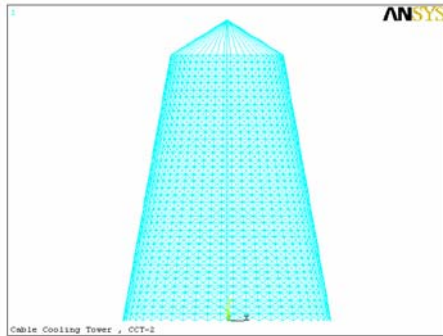
$$t_x = t_y = 1.5\text{m}$$

$$I_z = 0.07955\text{m}^4$$

ج) کابلهای قائم

۳-۳- مدل دوم

مطابق شکل شبکه کابلی در ارتفاع و پلان به ترتیب به ۳۸ و ۵۰ قسمت تقسیم شده است.



شکل ۳-۳-۱- نمای قائم و افقی مدل دوم

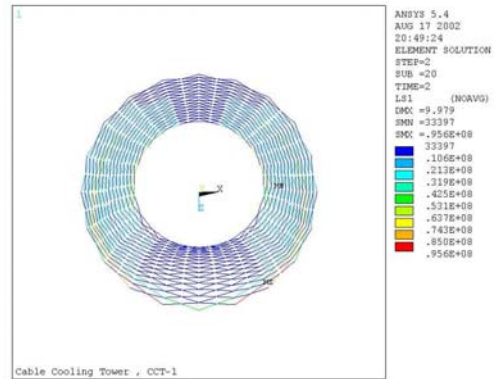
در این مدل محل تقاطع کابل‌های قطری جزو گره‌های سازه‌ای منظور نشده است. کابل‌های چتری فوقانی هر یک از ۵ المان کابلی تشکیل شده‌اند.

حلقه فوقانی با ۵۰ و ستون میانی با ۴۳ المان تیر - ستون مدل شده‌اند. مشخصات اعضا بکار رفته در این مدل به غیر از کابل‌های قطری مشابه مدل اول بوده و برای کابل‌های قطری:

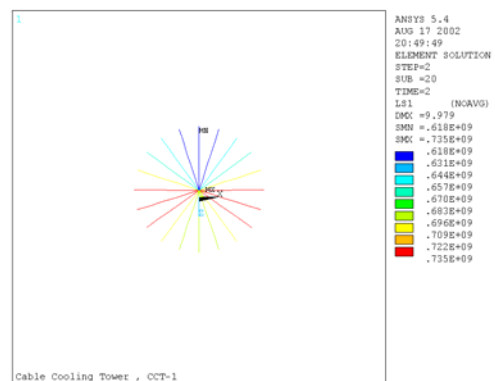
$$A = 10\text{cm}^2$$

$$ISTRN = 0.01$$

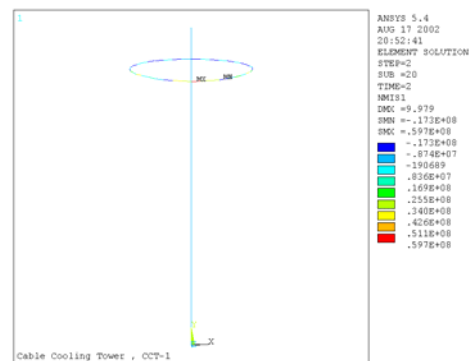
شکل‌های ۳-۳-۲ تا ۳-۳-۷ نشان دهنده وضعیت تنش در قسمتهای مختلف سازه مدل دوم می‌باشند.



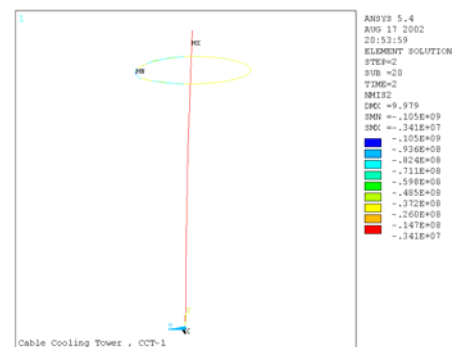
۳-۲-۴- تنش در کابل‌های قطری



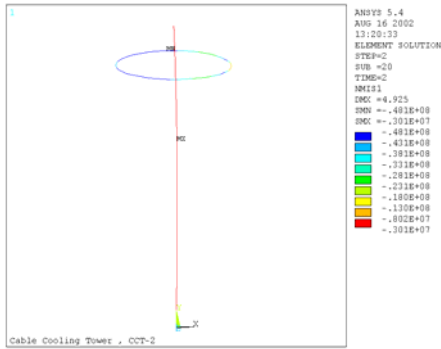
شکل ۳-۲-۵- تنش در کابل‌های چتری



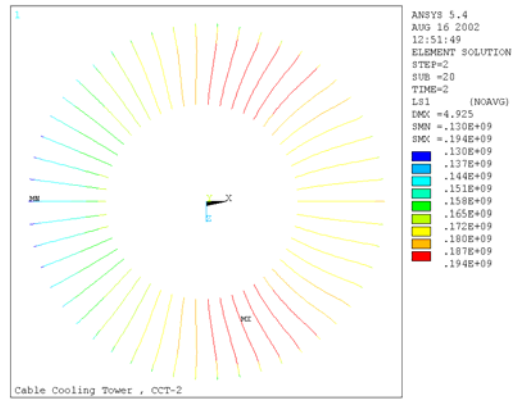
شکل ۳-۲-۶- تنش حداکثر در ستون بتنی و حلقه فلزی



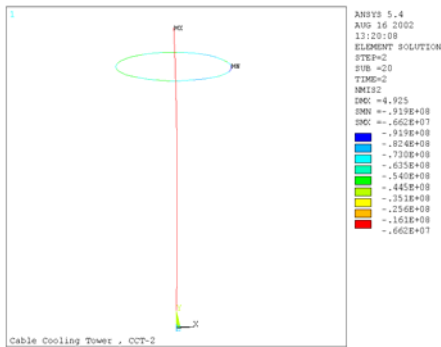
شکل ۳-۲-۷- تنش حداقل در ستون بتنی و حلقه فلزی



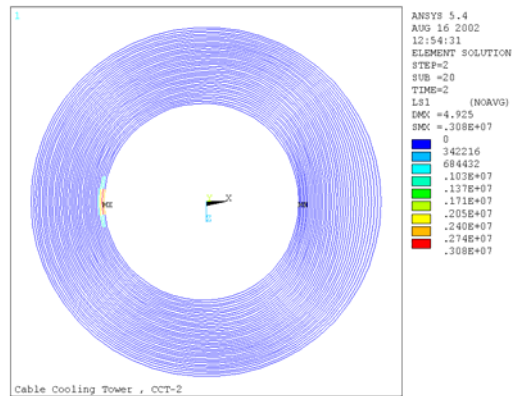
شکل ۳-۳-۶- تنش حداکثر در ستون بتنی و حلقه فلزی



شکل ۳-۳-۲- تنش در کابلهای قائم



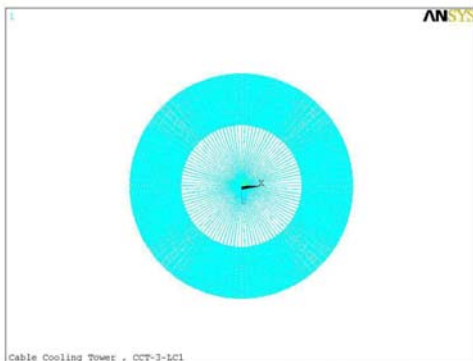
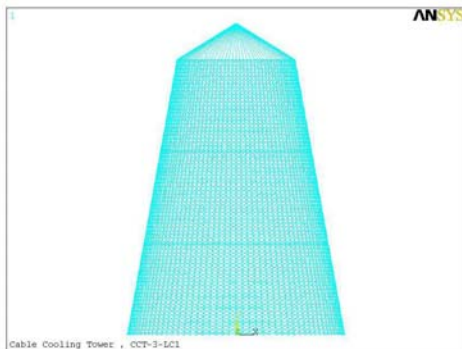
شکل ۳-۳-۷- تنش حداقل در ستون بتنی و حلقه فلزی



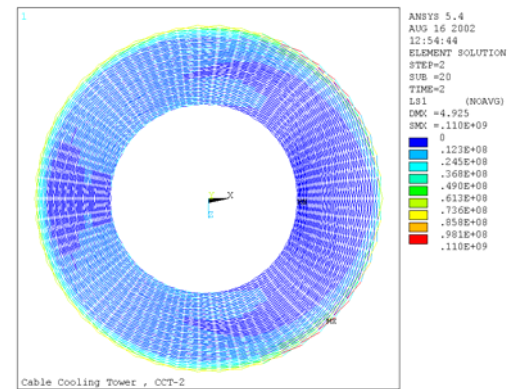
شکل ۳-۳-۳- تنش در کابلهای افقی

۴-۳- مدل سوم

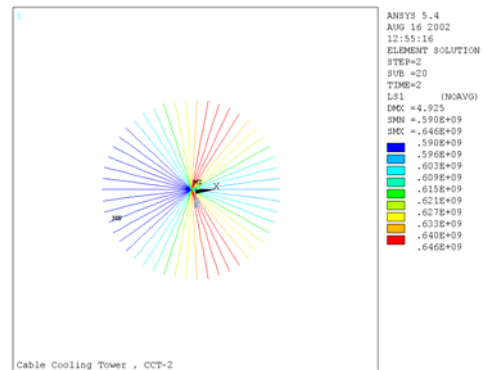
مطابق شکل در این مدل شبکه کابلی در ارتفاع و پلان به ترتیب به ۷۵ و ۱۰۰ قسمت تقسیم شده است.



شکل ۳-۴-۱- نمای قائم و افقی مدل سوم



شکل ۳-۳-۴- تنش در کابلهای قطری



شکل ۳-۳-۵- تنش در کابلهای چتری



هـ) کابل‌های قطری :

$$A = 10Cm^2$$

$$ISTRN = 0.01$$

و) کابل‌های چتری فوقانی :

$$A = 20Cm^2$$

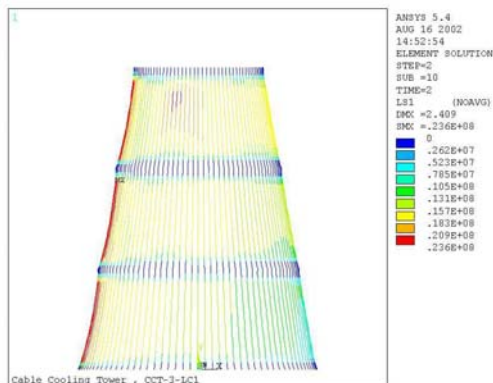
$$ISTRN = 0.00001$$

ز) کابل‌های شعاعی (پره‌های میانی):

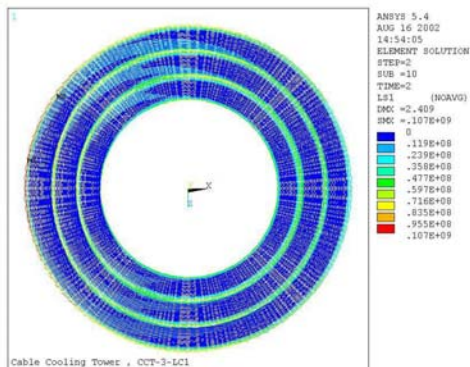
$$A = 5Cm^2$$

$$ISTRN = 0.001$$

مقادیر تنش در اعضای سازه‌ای در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۴-۲- تنش در کابل‌های قائم



شکل ۳-۴-۳- تنش در کابل‌های قطری

در هر چشمه از این شبکه کابلی هر یک از اعضا قائم و قطری از یک المان کابلی تشکیل شده‌اند در این مدل کابل‌های افقی حذف شده‌اند و کابل‌های چتری نیز هر یک از یک المان تشکیل شده‌اند. حلقه فلزی فوقانی با ۱۰۰ المان و ستون میانی با ۸۵ المان مدل شده است. در این مدل به منظور تامین سختی جانبی لازم، از دو حلقه در ترازهای ۵۰ متر و ۱۰۰ متر استفاده شده است. هر یک از این حلقه‌ها با ۱۰۰ المان تیر - ستون مدلسازی شده و توسط ۱۰۰ پره شعاعی کابلی به ستون میانی بسته شده‌اند. هر یک از این پره‌ها خود با یک المان کابلی مدل شده است.

مشخصات اعضای بکار رفته در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

الف) ستون بتن مسلح :

$$A = 5.65m^2$$

$$I_x = I_y = 25.511m^4$$

$$t_x = t_y = 6.0m$$

$$I_z = 51.02m^4$$

ب) حلقه فلزی فوقانی : (لوله‌ای به قطر ۱/۵ متر و ضخامت ۴ سانتیمتر)

$$A = 0.1885m^2$$

$$I_x = I_y = 0.05305m^4$$

$$t_x = t_y = 1.5m$$

$$I_z = 0.1061m^4$$

ج) حلقه‌های فشاری میانی (که در ترازهای ۵۰+ و ۱۰۰+ قرار گرفته‌اند).

(لوله‌ای به قطر ۰/۸ متر و ضخامت ۳ سانتیمتر)

$$A = 0.075m^2$$

$$I_x = I_y = 0.0060403m^4$$

$$t_x = t_y = 0.8m$$

$$I_z = 0.01208m^4$$

د) کابل‌های قائم :

$$A = 40Cm^2$$

$$ISTRN = 0.001$$

### ۳-۵- مقایسه نتایج تحلیل مدلها

با توجه به نتایج تغییر مکانهای بدست آمده از تحلیل مدل اول، این مدل از سختی جانبی کافی برخوردار نیست. علت این امر چشمه‌های بزرگ شبکه کابلی و ترکیب پیش‌تندگی کابل‌های قائم و قطری می‌باشد.

بعلاوه مقادیر تنشها به حدی بالاست که طراحی این مدل با مصالح متعارف موجود امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در مدل دوم ضمن استفاده از چشمه‌های کوچکتر شبکه کابلی، پیش‌تندگی کابل‌های قطری نیز افزایش یافته است. با توجه به تغییر مکانهای گره‌ها در نتایج تحلیل ملاحظه می‌شود که سختی سیستم افزایش یافته است. اما علیرغم بهبود وضعیت تنشها، همچنان مقادیر تنش در اغلب اعضا بسیار زیاد است.

با توجه به مقادیر تنش در کابل‌های افقی امکان حذف آنها از مدل شبکه کابلی وجود دارد و لذا در مدل سوم این کابلها حذف شده‌اند.

در مدل سوم علاوه بر تنظیم چشمه‌های شبکه کابلی، انتخاب مقاطع مناسب‌تر و تغییر پیش‌تندگی شبکه کابلی، کابل‌های افقی حذف و دو حلقه میانی که با کمک پرده‌های کابلی به ستون میانی متصل‌اند اضافه شده است.

نتایج تغییر مکانها نشان می‌دهد که سختی لازم در شبکه کابلی ایجاد شده و از طرف دیگر تنشهای موجود در اعضا تا حد قابل توجهی کاهش یافته‌اند.

بنابراین در صورت استفاده از مصالح مناسب طراحی چنین سازه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

### ۳-۶- مقایسه تقریبی برج فلزی شهیدر جایی و برج کابلی

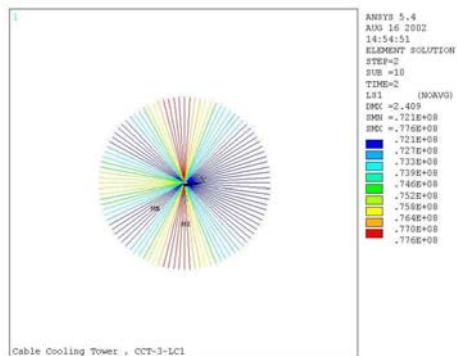
با توجه به طراحی اولیه انجام شده برای برج خنک‌کن کابلی مقادیر مصالح مصرفی بطور تقریبی برآورد شده که به شرح زیر می‌باشد:

وزن کابل‌های مصرفی ۹۸۴/۴ Ton

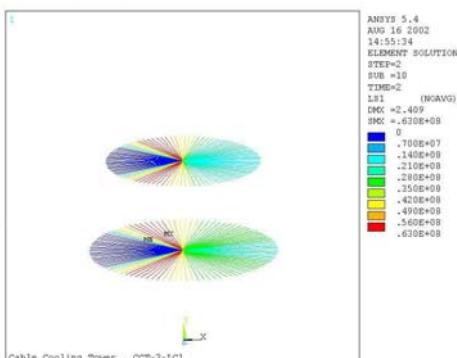
وزن حلقه‌های فولادی ۳۳۱/۲ Ton

جمع کل مصالح فولادی ۱۳۱۵/۶ Ton

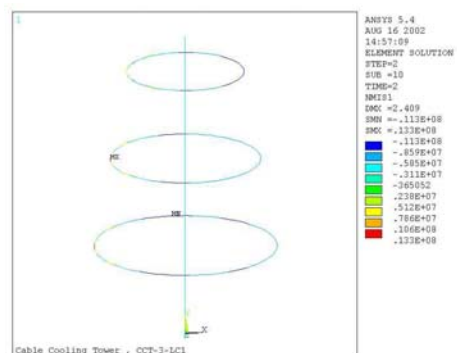
حجم بتن مصرفی برای ستون ۹۶۰/۵ m<sup>3</sup>



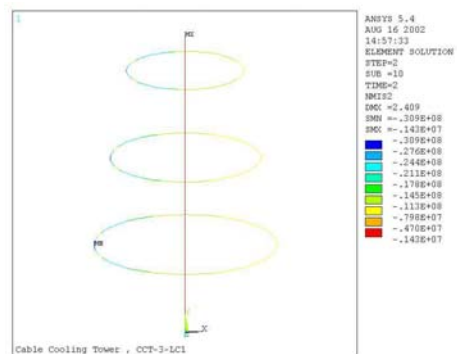
شکل ۳-۴- تنش در کابل‌های چتری



شکل ۳-۴-۵- تنش در کابل‌های شعاعی



شکل ۳-۴-۶- تنش حداکثر در ستون بتنی و حلقه فلزی



شکل ۳-۴-۷- تنش حداقل در ستون بتنی و حلقه فلزی



انجام شده در این مطالعه نشان داد که هزینه ساخت برج کابلی به میزان قابل توجهی کمتر از برج فولادی مشابه است و این موضوع زمینه مناسبی برای بررسی‌های بیشتر در این مورد را فراهم می‌سازد.

#### ۸- مراجع

- [1] "Henning Herbert, "current status and development of cooling tower design and conscruction", BALCKE-DURR Technische Mitteilwngen 10/1985
- [2] Kollar, "Large reticulated steel cooling towers", Engineering structures, Vol 7, October, 1985, PP263-267
- [3] "Suspended net of cables forms nuclear plant's cooling tower", ENR, October 30, 1975, PP.16-17
- [4] AH.Peyrot and A.M. Gouldies, "Analysis of cable structures". Int.J. Computers & Structures Vol.10, PP.805-813, (1979)
- [5] J.W.Leonard, "Tension Structure: behavior and analysis", McGrow Hill, (1988)

برآورد مصالح برج خنک‌کن شهید رجایی براساس اطلاعات جمع‌آوری شده به شرح زیر است:

وزن اسکلت فلزی Ton ۲۱۷۰

میزان کار انجام شده به نفرساعت ۴۶۶۴۷۲

برای برآورد تقریبی قیمت چنین سازه‌هایی می‌توان فرض نمود که هزینه اجرای این سازه‌ها بازا هر کیلو مصالح فولادی ۱۰۰۰۰۰ ریال و بازا هر متر مکعب بتن ۴۰۰۰۰۰ ریال می‌باشد.

بر این اساس خواهیم داشت :

قیمت تقریبی برج خنک‌کن کابلی

$$۱۳۱۵/۶ \times ۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰۰۰ + ۹۶۰/۵ \times ۴۰۰۰۰۰ =$$

ریال  $۱۳۱/۹۴ \times ۱۰^۹$

قیمت تقریبی برج خنک‌کن اسکلت فولادی

$$۲۱۷۰ \times ۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰۰۰ = ۲۱۷ \times ۱۰^۹$$

بدین ترتیب هزینه برج خنک‌کن کابلی حدود ۴۰٪ کمتر بوده و بعلاوه بنظر می‌رسد با درنظر گرفتن حجم فونداسیون بتوان به کاهش هزینه بیشتری دست پیدا کرد.

#### ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برج‌های خنک‌کن کابلی یکی از انواع سازه‌های شبکه‌ای کابلی می‌باشند.

از آنجایی که در سازه‌های کابلی المان اصلی صرفاً در کشش کار می‌کنند و کشش خالص موثرترین روش در استفاده از یک عضو سازه‌ای لاغر است این نوع سازه‌ها عمدتاً در مقایسه با سازه‌های معمولی سبکتر و از نظر اقتصادی قابل بررسی می‌باشند. هرچه ابعاد سازه بزرگتر باشد این کاهش وزن بیشتر نمود پیدا می‌کند.

سبکتر بودن این نوع برج‌ها نسبت به برج‌های خنک‌کن فولادی یا بتنی موجب می‌شود تا برای نواحی زلزله‌خیز مناسب باشند.

در این مطالعه روش تحلیل برج‌های خنک‌کن کابلی با توجه به پیچیدگی‌های موجود در سازه آن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و در یک روش گام به گام مدل اولیه به سمت یک مدل قابل طراحی تکمیل گردید. همچنین بررسی‌های