

روند ترک خوردگی در بار ثقلی و حرارتی و باد در برجهای خنک کننده بدون اعوجاج و با اعوجاج

سعید صبوری و سید رامین اسعد سجادی

چکیده: در صورت عدم دقت کافی در ساخت برجهای خنک کننده بتنی پوسته دچار اعوجاج می‌گردد. وجود اعوجاج شدید ممکن است باعث خرابی برج بخصوص تحت اثر وزش باد شود. هدف از این تحقیق مطالعه روند گسترش ترک در برجهای خنک کننده بتنی متعارف، با پوسته بدون اعوجاج و یا با اعوجاج تحت ترکیبهای بارگذاری ثقلی و ثقلی-حرارتی و ثقلی-باد و ثقلی-باد می‌باشد. در این تحقیق بارگذاری تا حد نهایی برج صورت گرفته است. در این بررسی از المان بتنی مکعبی که می‌تواند در هر یک از هشت نقطه انتگرالگیری به طور مستقل سه ترک بخورد به همراه آرماتوری که دارای خاصیت غیر خطی است استفاده شده است. در تحقیق حاضر، بررسی بعمل آمده بر روی یک برج بتنی با ابعاد و اعوجاجهای معمول نشان می‌دهد که پوسته بدون اعوجاج و پوسته با اعوجاج واقعی و اعوجاجهای بزرگنمایی شده، در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی، بصورت موجی تغییر شکل می‌دهد بطوری که تغییر شکلهای مذکور کاملاً با هم متفاوت و مستقل از هم می‌باشند. در این شرایط روند ترک خوردگی پوسته قابل پیش بینی نمی‌باشد. ولی آنچه در همه موارد مشابه است این است که در پایان بار ثقلی و حرارتی در پوسته بدون اعوجاج کل بیرون پوسته دچار ترک قائم و آن قسمتی از پوسته که دارای ضخامت حداقل است دچار ترک خوردگی متناوب افقی می‌شود، در حالیکه در برج اعوجاج یافته بیرون پوسته دچار ترک خوردگی قائم و افقی متناوب می‌شود. این در حالیکه است که پس از وارد شدن بار باد مناطقی که دچار ترک خوردگی می‌شوند در هر حالت مشابه و قابل پیش بینی است.

واژه‌های کلیدی: برج خنک کننده، انحراف شعاعی و ضخامتی، اعوجاج، تحلیل غیرخطی، روند ترک خوردگی

۱. مقدمه

برج خنک کننده بتنی سازه‌ای هذلولی است که برای خنک کردن آب در گردش تأسیسات حرارت‌زا بکار می‌رود به علت مشکلات اجرایی و بکارگیری قالبهای لغزنده شعاع و ضخامت پوسته اجرا شده با پوسته طراحی شده تفاوت دارد. تأثیر این تفاوت به قدری مهم است که می‌تواند باعث خراب شدن برج تحت بارگذاری‌های متناوب از جمله باد شود که نمونه آن برج آردیر می‌باشد [1]. نکته ای که در این حادثه باعث جلب توجه کارشناسان شد زوال این برج در اثر وزش بادی با سرعتی کمتر از باد طراحی بود. یکی از مسائل مهم در این برج وجود و رشد ترکهای قابل توجه نصف النهاری در آن بود

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۴/۲۸ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۶/۲۵ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سعید صبوری، استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. sabouri@kntu.ac.ir
سید رامین اسعد سجادی، کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. rasajadi@yahoo.com

که قبل از فروریختگی برج مشاهده و ثبت شده بود. این ترکها در هنگام فروریختن برج به ناحیه‌ای که در نزدیکی منطقه‌ای با اعوجاج زیاد بود، رسیده بود. پس از خراب شدن این برج تحقیقات زیادی بر روی اعوجاج و نحوه گسترش ترک در برجهای خنک کننده انجام شد. در این تحقیقات اعوجاج یا بصورت یک حلقه [2, 3, 4] و یا بصورت یک تورفتگی یا بیرون آمدگی [2, 5] مدل شده است و تحت بار ثقلی و باد قرار گرفته است که مسلماً این نوع اعوجاجها نمی‌تواند بیانگر رفتار واقعی برجهای باشد. در این تحقیق یک برج خنک کننده تحت بار ثقلی و حرارتی و باد قرار گرفته است که تعیین کننده‌ترین ترکیب بارگذاری برای پوسته برج خنک کننده می‌باشد. برج مورد مطالعه یکی از برجهای طرح توسعه نیروگاه شهید رجایی می‌باشد که در هنگام ساخت آن در هر مقطع انحرافهای شعاعی و ضخامتی آن برداشت شده است. در بررسی برج خنک کننده مذکور با در نظر گرفتن انحرافهای شعاعی و ضخامتی آن برج مدل شده است و روند ترک خوردگی در برج اعوجاج یافته با برج بدون اعوجاج مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق

۴. نحوه مدل کردن اعوجاجها

برای ساخت برج از قالب لغزنده استفاده شده است. این قالب در جهت مداری از ۸۴ قطعه تشکیل شده است و در جهت نصف‌النهاری در هر مرحله از ساخت برج از یک قطعه که اضلاع آن قطعه کاملاً خطی است. که در هر مقطع از ساخت برج ۴۲ قطعه از مقطع پوسته مورد نقشه‌برداری قرار گرفته است. مقادیر انحراف شعاعی اندازه‌گیری شده در این برج کمتر از ۵ سانتیمتر می باشد که مورد قبول آیین نامه ACI می باشد. برای مدل کردن اعوجاجها از آنجا که در المانهای مکعبی لازم است تا بزرگترین ضلع المان نسبت به کوچکترین ضلع المان از ۱۰ تجاوز نکند لذا شعاع واقعی داخلی و خارجی پوسته در مقاطع مدل شده از انتقال شعاع واقعی داخلی و خارجی پوسته در مقاطع برداشت شده بدست آمده است. این انتقال در جهت نصف‌النهاری بصورت خطی و در جهت مداری بصورت گذراندن یک منحنی نرم بصورتی که از هر ۴۲ نقطه بگذرد انجام شده است. با مقایسه نمودارهای انحرافهای شعاعی داخلی و خارجی پوسته در نقاط برداشت شده و مدل شده این نتیجه بدست می آید که پوسته مدل شده با روش فوق الذکر تطابق مناسبی با مدل پوسته واقعی دارد. در مدل‌سازی هم انحرافهای شعاعی و هم ضخامتی در نظر گرفته شده است ولی هرگاه اعوجاج بزرگنمایی گردیده است مقدار بزرگنمایی فقط در انحراف شعاعی تأثیر داده شده است.

۵. نرم‌افزار مورد استفاده

در این بررسی از نرم‌افزار المان محدود ANSYS54 استفاده شده است. المان Solid 65 این نرم افزار که در شکل ۳ آمده است قادر است تا موارد زیر را مدل نماید [6]:

۱- ترک خوردگی در سه جهت عمود بر هم در هریک از هشت نقطه انتگرالگیری بصورت پخش شده^۱ (تغییر در ماتریس سختی المان) قابل ایجاد است و رفتار بتن همگن فرض می شود. همچنین قابلیت بسته شدن ترک نیز وجود دارد. خرد شدن بتن در هر نقطه انتگرالگیری بصورت پخش شده با کاهش مدول الاستیسیته بتن قابل ایجاد است که معیار ترک خوردگی یا خرد شدگی بتن از مدل ویلیام [6] استفاده شده است که در شکل ۴ آمده است.

۲- در المان آرماتور در سه جهت دلخواه که در هر جهت رفتار خطی و غیرخطی مستقل خود را دارد قابل مدل کردن است. رفتار آرماتور در این بررسی به صورت دوخطی کینماتیک مدل شده است. آرماتورها در جهات مداری و نصف‌النهاری مدل شده‌اند. ماتریس مصالح المان به طور کل به صورت زیر تشکیل می شود.

$$[D] = \left[1 - \sum_{i=1}^{N_c} V_i^R \right] [D_c] - \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R [D_r] \quad (3)$$

روند ترک خوردگی برج خنک کننده تحت ترکیبهای بارگذاری ثقلی-حرارتی و ثقلی-حرارتی-باد و ثقلی-باد مورد بررسی قرار گرفته است که بارگذاری در هر ترکیب بار تا حد نهایی برج (باری که موجب خرابی می شود) صورت گرفته است. مناطق ترک خورده در شکلها شامل آرماتورهای جاری شده و نشده در مقاطع ترک خورده می باشد و چون بار تا حد نهایی وارد شده است مناطق ایجاد شکست (مقاطع ترک خورده ای که آرماتور آنها در حالت جاری-شدگی دچار تغییر شکل زیاد شده است) در همین مناطق مشخص شده، ایجاد می‌شوند. مناطق مشخص شده مناطق مستعد آغاز خرابی می باشند که هدف این تحقیق مشخص نمودن چنین مناطقی برای آگاهی طراحان می باشد.

۲. مشخصات سازه

برج مورد مطالعه یکی از برجهای نیروگاه شهید رجایی با پوسته هذلولی با معادله زیر می‌باشد.

$$R = 25439.44 \left[1 + \left(\frac{H-80}{2636.118} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 25414.94 \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \left(\frac{2636.118}{25439.44} \right)^2 \left(\frac{R + 25414.94}{80 - H} \right) \quad (2)$$

که در این روابط R شعاع در یک مقطع افقی تا وسط پوسته و H ارتفاع از سطح زمین و Φ زاویه مماسی پوسته می باشد در شکل ۱ شمایی از برج خنک کننده آمده است. سازه دارای ۳۰ ستون ضربدری با مقطع $1/0.5 \times 0.7$ متر و پی‌نواری به عرض ۴ متر و عمق ۱ متر می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات مصالح برج خنک کننده آورده شده است.

۳. نحوه مدل کردن سازه

تمام برج با المانهای مکعبی مدل شده است که پوسته از ارتفاع ۲۱ تا ۱۰۲ متری به همراه رینگ سخت کننده آن با المانهای غیرخطی با خاصیت بتنی مدل شده است و پی و ستونها با المانهای خطی مدل شده است. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود برای از بین بردن تمرکز تنش، المانهای ناحیه اتصال پوسته به ستون ریزتر شده‌اند و گره‌هایی که به وسط المانهای بالاتر برخورد کرده‌اند با معادلات حرکتی به گره‌های اطرافشان بسته شده‌اند که این ناحیه بصورت الاستیک مدل شده است. برای مقایسه رفتار برج خنک کننده‌ای که با المانهای مکعبی مدل شده است و برج خنک کننده‌ای که با المانهای پوسته‌ای مدل گردیده است بین ۲۰ فرکانس اول هر دو مدل و تغییر مکانها و تنشهای دو مدل مقایسه‌ای انجام شد و دیده شد که اختلاف دو مدل در حدود ۵ درصد است. برج خنک کننده در مقطع مداری به ۱۰۶ قسمت و در مقطع نصف‌النهاری به ۵۶ قسمت تقسیم شده است. همچنین در زیر پی برای اندرکنش خاک و سازه فنرهای معادلی قرار داده شده است.

¹ Smeared crack

$$q_0(z) = 1.05 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.22} \quad (۶)$$

در این روابط Z ارتفاع از سطح زمین، c_p ضریب توزیع بار باد در جهت مداری، θ زاویه نسبی در جهت مداری، $q_0(z)$ فشار مبنای استاتیکی، $q_E(z)$ توزیع عمودی فشار و ϕ ضریب تشدید دینامیکی می باشد. مکش درونی طبق آیین نامه VGB به صورت ثابت در کل ارتفاع پوسته بدون تأثیر فاکتور دینامیکی ϕ در نظر گرفته می شود و مقدار آن از ضرب $c_p = -0.5$ در فشار مبنای استاتیکی در بالای برج ($Z=102$ m) بدست می آید.

۴-۷. ترکیب بارگذاری برج خنک کننده

ترکیب بارگذاری زیر یکی از ترکیبهای بارگذاری مورد استفاده می باشد که در طراحی برج فوق الذکر بکار گرفته شده است و برای پوسته برج خنک کننده تعیین کننده می باشد.

$$0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W + 1.4 \times 0.7T) \quad (۷)$$

در این رابطه T,W,L,D بار مرده، زنده، برف و حرارت می باشد. هرگاه این رابطه مرتب شود و از بار زنده برف نیز صرف نظر گردد رابطه فوق بصورت زیر خواهد بود

$$1.05D + 1.275W + 0.735T \quad (۸)$$

در رابطه ۸ دیده می شود که بار حرارتی با ضریب 0.735 وارد ترکیب شده است. در این بررسی ابتدا بار ثقلی و بار حرارتی با ضریب واحد بر روی برج قرار داده می شود و پس از تغییر شکل برج و ترک خوردگی، بار باد آنقدر بر روی برج اضافه می شود تا برج به حد نهایی خود برسد. بار حرارتی با ضریب واحد از آن جهت اعمال شده تا رفتار واقعی برج بدست آید. به عبارتی هدف پیروی از آیین نامه نبوده است.

۸. نحوه بارگذاری بر روی برج

در ترکیب بار ثقلی - حرارتی - باد ابتدا بار ثقلی و حرارتی بر روی سازه قرار داده می شود و سپس در پایان بار ثقلی و حرارتی در حالیکه این بارها بر روی سازه قرار دارند بار باد بر روی سازه وارد می شود و مقدار آن آنقدر زیاد می شود تا سازه به حد نهایی برسد. حد نهایی، بار بادی است که برج در آن بار فرو میریزد. اینکار بر روی برج خنک بدون اعوجاج، با اعوجاج واقعی و اعوجاجهای ۳، ۴، ۵ و ۶ برابر شده اعوجاج واقعی انجام شده است. در ترکیب بار ثقلی - باد که بر روی برج بدون اعوجاج صورت گرفته است ابتدا بار ثقلی بر روی برج قرار داده شده سپس بار باد آنقدر بر روی برج اضافه می شود تا برج خراب شود.

روند ترک خوردگی در بار ثقلی و حرارتی و باد در برجهای خنک کننده

که $[D]$ ماتریس مصالح کل، $[D_c]$ ماتریس مصالح بتن، $[D_r]$ ماتریس مصالح آرماتور، V_i^r نسبت حجم آرماتور به حجم المان و N_r تعداد جهت های آرماتور در المان می باشد.

۶. روش حل غیر خطی

برای آنالیز غیرخطی از روش نیوتن رافسون استفاده شده است که در شکل ۵ آمده است که در آن F^a بردار نیروی گرهی در پله بارگذاری و F_{i+1}^{nr} بردار نیروی گرهی المانها در تکرار $i+1$ می باشد. معیارهای همگرایی هم بصورت نیرو و هم بصورت تغییر مکانی اعمال شده است که همگرایی تحلیل عددی از نظر نیرویی بحرانی تر است. بطوریکه همگرا نشدن تحلیل عددی از نظر نیرویی معیاری برای حد نهایی در نظر گرفته شده است (حد نهایی باری است که در آن بار، برج خنک کننده فرو می ریزد) و در حد نهایی و بعد از آن مقدار نرم نیرو (ریشه دوم جمع نیروهای به توان دوم کلیه گره های سازه) تقریباً ثابت و همواره بالای 200 کیلوگرم بوده است برای بارگذاری ثقلی و حرارتی معیار همگرایی نیرو $\| \{F^a\} - \{F_{i+1}^{nr}\} \| \leq 0.1 (kg)$ و برای بارگذاری بار باد مقدار آن $\| \{F^a\} - \{F_{i+1}^{nr}\} \| \leq 1 (kg)$ بوده است. مقدار همگرایی تغییر مکانی نیز متغیر و مقدار آن همواره کمتر از یک میلیمتر بوده است و همواره همگرا شده است.

۷. بارگذاری بر روی برج خنک کننده

۱-۷. بار مرده وزن

وزن مخصوص بتن مسلح 24 ton/m³ می باشد که در طراحی بکار رفته است.

۲-۷. بار حرارتی

محاسبات نشان می دهند که پیروید حرارتی در زمستان یعنی دمای داخل 30 و دمای بیرون 25 - درجه سانتی گراد بیشترین تأثیر را بر روی برج دارد.

۳-۷. بار باد و بار مکش درونی

بار باد مطابق آیین نامه VGB [۷] بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$W(z, \theta) = c_p(\theta) q_E(z) \quad q_E(z) = \phi q_0(z) \quad (۴)$$

$$c_p(\theta) = 1 - 2 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2.267} \quad 0 \leq \theta \leq 70 \quad (۵)$$

$$c_p(\theta) = -1 + 0.5 \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2.395} \quad 70 \leq \theta \leq 91$$

$$c_p(\theta) = -0.5 \quad 91 < \theta \leq 180$$

محور افقی زاویه نسبی می باشد. در این شکل مشاهده می گردد که تغییر مکان شعاعی در هر مقطع نشان داده شده در ضریب بار $0/57$ تقریباً ثابت است. شکل ۹ تغییر شکل برج را در ضریب بار یک یعنی در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی نشان می دهد. چنانچه دیده می شود، رفتار سازه به کلی عوض می گردد، پوسته ای که تغییر شکل آن بصورت افزایش تغییر مکان شعاعی به سمت بیرون پوسته بود در این حالت تغییر شکل موجی از خود نشان می دهد. در شکل ۱۰ تغییر شکل شعاعی پوسته از تراز $5/52$ تا $5/82$ متری در پایان بارثقلی و حرارتی آمده است و در شکل ۱۱ تغییر شکل مقطعی از پوسته در تراز $5/70$ متری آمده است که نشان دهنده تغییر شکل موجی پوسته می باشد. در شکل ۱۲ نمودار ترکهای قائم مجدداً در بیرون پوسته نشان داده شده است. ترک قائم در تمام جدار بیرون پوسته مشاهده می گردد نواحی ترک نخورده در پایین پوسته به علت ضخامت زیاد و در بالای پوسته به علت رینگ سخت کننده قرار دارد. در شکل ۱۳ نمودار ترکهای افقی بیرون پوسته نشان داده شده است. دیده می شود که در ابتدای پوسته یعنی از ارتفاع 27 تا 30 متری یک سری ترکهای افقی سرتاسری در جهت مداری وجود دارد. از ارتفاع $5/58$ تا 84 متری یک سری ترکهای متناوب افقی در جهت مداری دیده میشود. از ارتفاع 84 تا 87 متری، از ارتفاع 90 تا $94/5$ متری و از ارتفاع $97/5$ تا 99 متری نیز یک سری ترکهای افقی سرتاسری در جهت مداری وجود دارد. در شکل ۱۴ نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته نشان داده شده است. یک سری از ترکهای قائم از 27 تا $31/5$ متری و بقیه در بالای پوسته از ارتفاع 90 تا $94/5$ متری می باشد. همچنین در درون پوسته هیچ ترک افقی به وجود نیامده است. در شکل ۷ مقطع نصف النهاری تغییر مکان شعاعی در پایان بار حرارتی و ثقلی با ضریب بار برابر واحد نشان داده شده است، در حالیکه در ضریب بار $0/57$ که برج به طور یکنواخت به سمت بیرون تغییر شکل می دهد، در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی با ضریب بار واحد، سازه دارای موجهای نصف النهاری و مداری شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می گردد در پایین پوسته یک موج با حداکثر تغییر مکان شعاعی $9/8$ میلیمتر در جهت بیرون در ارتفاع $28/5$ متری قرار دارد. این ناحیه در ارتفاعی است که حوالی پایان ضخیم شدگی تدریجی پوسته می باشد. تغییر ضخامت باعث شده است تا پوسته در این محل ناگهان ضعیف شده و باعث به وجود آمدن این تغییر مکان شعاعی زیاد گردد. ضمناً لازم به ذکر است که تغییر مکان مذکور در بارهای ثقلی و حرارتی با ضریب بار $0/57$ نیز به وجود آمده است که افزایش بار باعث تشدید آن شده است. در این منطقه مطابق شکل ۱۳ از ارتفاع 27 تا 30 متری ترکهای افقی سرتاسری در بیرون پوسته ایجاد شده است. از ارتفاع 33 تا $52/5$ متری هیچ نوع موج مداری و یا نصف النهاری به وجود نیامده است. در این ناحیه صرفاً شعاع مقاطع مختلف پوسته به طور یکنواخت بزرگتر شده است. علت به

۹. روند ترک خوردگی در پوسته بدون اعوجاج تحت اثر ترکیب بار ثقلی و حرارتی و باد

۹-۱. بار ثقلی و حرارتی

پس از بارگذاری ثقلی و حرارتی، برج به آرامی شروع به تغییر مکان شعاعی به سمت بیرون برج می نماید. در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر $0/428$ هیچ ترک مشاهده نمی شود. در این حالت به جز در پایان ضخیم شدگی تدریجی در ارتفاعی حدود 27 تا $33/6$ متری و نواحی رینگ سخت کننده بالا یعنی ارتفاعی در حدود 93 تا 96 متری و لبه بالای پوسته تنش مداری تار خنثی پوسته در دیگر نواحی فشاری است. همچنین تنش نصف النهاری نیز در همه قسمتهای پوسته در تار وسط مقطع به صورت فشاری است. در این حالت در تمام پوسته تنش نقاط داخلی پوسته فشاری و تنش نقاط بیرونی پوسته کششی است. در ضریب بار $0/75$ بار ثقلی و حرارتی، اولین ترک خوردگی روی می دهد. در این حالت از ارتفاع $25/5$ تا 69 متری در بیرون پوسته ترکهای قائم مشاهده می شود که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل رنگ سیاه نشانه ترک خوردگی می باشد، محور افقی زاویه محیطی پوسته بر حسب درجه و محور قائم ارتفاع پوسته بر حسب متر می باشد. همچنین در بیرون پوسته ترک افقی دیده نمی شود و در درون پوسته هیچ ترک مشاهده نمی گردد. نکته قابل توجه این است که اولین ترک که مشاهده می شود، ترک قائم است به طوریکه سرعت رشد ترک قائم پوسته بسیار سریعتر از دیگر ترکها می باشد، در شکل ۷ منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت نصف النهاری در بار ثقلی و حرارتی آورده شده است. در این شکل علامت منفی نشانه حرکت پوسته به سمت بیرون است. مشاهده می گردد که در ضریب بار $0/57$ ثقلی و حرارتی کلیه نقاط پوسته در حال حرکت به سمت بیرون پوسته می باشد. به عبارتی شعاع هر مقطع برج در حال افزایش است. دیده می شود که تغییر شکل شعاعی در پایان ضخیم شدگی تدریجی یعنی ارتفاعی در حدود $28/5$ تا 33 متری به علت اینکه پوسته از حالت ضخیم شدگی به حالت نازک تبدیل گردیده، باعث شده است تا در این نقاط یک تغییر مکان شعاعی زیاد روی دهد. از ارتفاع $34/5$ تا 69 متری نیز تغییر مکان شعاعی تقریباً یکنواخت ولی نسبت به نواحی بالاتر از رشد قابل توجهی برخوردار است که علت آن وجود ترکهای قائم در بیرون پوسته می باشد که باعث کاهش سختی پوسته و در نتیجه رشد تغییر مکان شعاعی شده است. از ارتفاع 69 متری به بالا در پوسته هیچ ترک مشاهده نمی شود و تغییر مکان شعاعی نسبت به دیگر نواحی برج کمتر است، اغتشاشی که از ارتفاع $97/5$ متری تا 102 متری دیده می شود به علت رینگ سخت کننده بالا می باشد. در شکل ۸ منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت مداری در تراز $70/5$ متری آورده شده است که محور قائم آن نشانه تغییر مکان شعاعی است که علامت منفی به معنای تغییر مکان شعاعی به سمت بیرون برج است و

وجود نیامدن موج مداری یا نصف النهاری در این قسمت زیاد بودن ضخامت پوسته می باشد. لازم به ذکر است که ضخامت پوسته در ارتفاع ۳۳ تا ۵۲/۵ متری از ۲۱/۷ تا ۱۸/۱۹ سانتیمتر تغییر می کند، لذا همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده گردید در این منطقه ترک افقی در بیرون پوسته ایجاد نشده است، در حالیکه ضخامت پوسته در نواحی به وجود آمدن موجهای مداری و نصف النهاری حدود ۱۷ سانتیمتر بوده و مطابق شکل ۱۳ دارای ترکهای افقی متناوب می باشد. در شکل ۷ دیده می شود که از ارتفاع ۵۲/۵ تا ۸۴ متری یکسری موجهای نصف النهاری به وجود آمده است. دامنه این موجهای نصف النهاری نسبت به موجهای نصف النهاری بالاتر از ۸۴ متری کوچکتر است که مطابق شکل ۱۳ باعث ایجاد موجهای متناوب گشته است. در شکل ۱۰ تغییر شکل شعاعی برج از ارتفاع ۵۲/۵ تا ۸۲/۵ متری آورده شده است. دامنه موجهای بالاتر از ۸۴ متری بیشتر است و مطابق شکل ۱۳ باعث ایجاد ترکهای افقی سرتاسری می شود. در شکل ۱۱ تغییر شکل شعاعی در تراز ۷۰/۵ متری آورده شده است. چنانچه مشاهده می گردد در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی پوسته در این تراز بصورت موجی تغییر شکل داده است. شاید تصور شود قسمتهایی از موج که به طرف بیرون پوسته حرکت کرده است، باعث ترک خوردگی قائم و قسمتهایی از موج که به طرف درون پوسته حرکت کرده است باعث جلوگیری از ترک خوردگی قائم در بیرون پوسته می شود، ولی مطابق شکل ۱۲ دیده می شود که کلیه قسمتهای بیرون پوسته ترک قائم خورده است. علت این امر کوچک بودن دامنه موج مداری است که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می گردد. علت تغییر شکل های موجی به خاطر کاهش سختی پوسته به علت ترک خوردگی افقی وقائم و نیروی فشاری در تار وسط در جهت مداری و نصف النهاری می باشد. نکته قابل توجه این است که به علت فشاری بودن تنش های نصف النهاری در طرف داخل پوسته موجهای نصف النهاری و مداری باعث ایجاد ترکهای افقی و قائم در درون پوسته نشده اند. در حالی که تنش نصف النهاری در بیرون پوسته کششی است و این تنش کششی باعث ترک خوردگی شده است. همچنین تنش مداری در داخل پوسته فشاری است به جز در ترازهای ۲۷ تا ۳۳ متری و ۹۰ تا ۹۴/۵ متری که باعث ایجاد ترکهای قائم در درون پوسته مطابق شکل ۱۴ می شود.

۹-۲. بار باد

در این حالت پس از پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی همراه با آنها بار باد بر روی برج قرار داده شده و مقدار آن انقدر افزایش پیدا می کند تا برج به بار حد نهایی خود برسد. در پوسته بدون اعوجاج ضریب حد نهایی بار باد ۱/۴ بدست می آید. در این حالت تغییر شکل شعاعی برج برای بار نهایی در شکل ۱۵ آورده شده است. در شکل ۱۶ نیز تغییر شکل شعاعی برج در تراز ۷۵ متری دیده می شود. بار

۱۰. روند ترک خوردگی در پوسته با اعوجاج واقعی تحت

اثر ترکیب بار ثقلی و حرارتی و باد

در این بخش به بررسی برج خنک کننده با اعوجاج واقعی می-پردازیم. اعوجاج شامل انحراف شعاعی و ضخامت از مقدار طراحی می باشد که در زمان ساخت برج خنک کننده در نقاط مشخصی

اندازه گیری شده اند. این اعوجاجهای شعاعی و ضخامتی مطابق آنچه در بخش ۴ بیان شد مدل شده است و سپس تحت بارگذاری ثقلی، حرارتی و باد قرار گرفته است.

۱۰-۱. بار ثقلی و حرارتی

در شکل ۲۴ تغییر شکل پوسته در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی در پوسته با اعوجاج واقعی آمده است. همچنین در شکل ۲۵ تغییر شکل مقطعی از پوسته در تراز ۷۰/۵ متری نشان داده شده است با مقایسه آن با شکل ۱۱ دیده می شود دامنه موجهای بوجود آمده افزایش یافته است. در شکل ۲۶ منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت مداری در پوسته بدون اعوجاج و با اعوجاج واقعی در تراز ۷۰/۵ متری آمده است همانطور که مشاهده می شود، دامنه موجهای مداری در حالت اعوجاج یافته نسبت به حالت بدون اعوجاج افزایش زیادی یافته است. این موجها با دامنه زیاد باعث شده است در بیرون پوسته نقاطی که به طرف داخل حرکت کرده اند ترک قائم در آنها ایجاد نشود و در عوض در بیرون پوسته نقاطی که به طرف بیرون حرکت کرده اند ترک قائم ایجاد شود. نمودار ترکهای قائم بیرون پوسته در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی در شکل ۲۸ آورده شده است. در شکل مذکور، متناوب ترک خوردن قائم پوسته به علت وجود موجهای مداری با دامنه زیاد است که علت آن قبلاً توضیح داده شد، این در حالی است که مطابق شکل ۱۲ در حالت بدون اعوجاج کل بیرون پوسته ترک خورده است هرچند مطابق شکل ۲۶ در حالت بدون اعوجاج نیز موجهای مداری ایجاد شده است اما به علت کمی دامنه این موجها وضعیتی شبیه به حالت پوسته با اعوجاج ایجاد نشده است و تقریباً کل بیرون پوسته ترک خورده است در شکل ۲۷ تغییر شکل پوسته در راستای یک نصف النهار در حالت بدون اعوجاج و با اعوجاج نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود دامنه موجهای بوجود آمده در حالت اعوجاج یافته بسیار شدیدتر از حالت بدون اعوجاج است. در شکل ۲۹ نمودار ترکهای افقی بیرون پوسته نشان داده شده است. با مقایسه آن با شکل ۱۳ دیده می شود که در پوسته بدون اعوجاج در ناحیه ۳۰ تا ۵۴ متری ترکی وجود ندارد، در حالیکه در پوسته اعوجاج یافته در سرتاسر پوسته ترک افقی ایجاد شده است. علت آن را می توان در شکل ۲۷ مشاهده نمود. در شکل مذکور که مربوط به پوسته بدون اعوجاج می باشد در تراز ۳۳ و ۵۲/۵ متری به علت وجود نداشتن هیچ موج نصف النهاری ترک افقی وجود ندارد و در بقیه مناطق به علت وجود موج نصف النهاری ترکهای افقی دیده می شود ولی در پوسته با اعوجاج موجهای نصف النهاری در سرتاسر ارتفاع برج به وجود آمده اند که این باعث شده است تا ترکهای افقی در تمام ارتفاع برج بوجود آید. شکل ۳۰ نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته را در پایان بارگذاری حرارتی و ثقلی نشان می دهد. همانطور که دیده می شود ترکهای اصلی در ارتفاع ۲۷ تا ۳۱/۵

۱۰-۲. بار باد

در این حالت پس از بارگذاری ثقلی و حرارتی بار باد بر روی سازه وارد می شود و آنقدر ادامه می یابد تا سازه به حد نهایی خود برسد حد نهایی بار باد برای سازه اعوجاج یافته برابر ۱/۴ می باشد که نظیر بار حد نهایی در پوسته بدون اعوجاج می باشد. هر چند در این حالت اعوجاج بر روی فاکتور بار نهایی تاثیر نگذاشته است اما حداکثر تغییر مکان پوسته در حالت اعوجاج یافته حدود ۴/۷ درصد رشد داشته است. شکل ۳۱ نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته را برای بار باد با ضریب یک نشان می دهد. بار باد توانسته است تعدادی از المانها را دچار ترک قائم نماید ولی هنوز قسمت فشاری باد نتوانسته است تا ترک قائم باز المانهای زیر قسمت فشاری را ببندد. شکل ۳۲ نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته را برای بار باد با ضریب یک نشان می دهد. با مقایسه آن با شکل ۲۹ مشاهده می گردد که بر اثر بار باد ترک خوردگیهای کمی در پایین پوسته ایجاد شده است. همچنین در زاویه نسبی ۶۴/۵ درجه نسبت به محور بار باد، ترکهای افقی شروع به بسته شدن می نماید. شکل ۳۳ نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته را برای بار باد با ضریب یک نشان می دهد. با مقایسه آن با شکل ۳۰ در می یابیم که از تعداد المانهای ترک خورده قائم کاسته شده است و در نصف النهار رو به وزش باد در بالای پوسته المانهایی با ترک قائم ایجاد شده اند. شکل ۳۴ نمودار ترک قائم باز بیرون پوسته را برای بار باد با ضریب ۱/۴ (حد نهایی) نشان می دهد. با مقایسه آن با شکل ۳۱ دیده می شود که در زیر ناحیه فشاری بار باد، المانهایی که قبلاً دارای ترک قائم باز بوده اند اکنون بر اثر فشار بار باد ترک آنها بسته شده است. شکل ۳۵ نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته را برای بار باد با ضریب ۱/۴ نشان می دهد. چنانچه مشاهده می گردد در ناحیه رو به وزش باد در زیر ارتفاع ۵۸/۵ متر ترک خوردگی افقی رشد کرده است و در زاویه نسبی ۶۴/۵ و در زیر ارتفاع ۶۳ متری ترکهای افقی بسته شده اند. شکل ۳۶ نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته را برای بار باد با ضریب ۱/۴ نشان می دهد. با مقایسه آن با شکل ۳۳ دیده می شود که ترکهای قائم در ناحیه رو به وزش باد در بالای پوسته رشد

۲-۱۱. تحت بار باد

ضریب حد نهایی بدست آمده برای بار باد برای پوسته بدون اعوجاج، با اعوجاج واقعی و اعوجاج بزرگنمایی شده تا ۴ برابر، برابر ۱/۴ میباشد این ضریب برای اعوجاج ۵ و ۶ برابر شده برابر ۱/۲ محاسبه شده است. مطابق رابطه ۸ حداقل ضریب بار باد طراحی ۱/۲۷۵ می باشد بنابراین این چون ضریب بار باد در پوسته ها با بزرگنمایی اعوجاج ۵ برابر شده کمتر از این مقدار حداقل می باشد لذا بزرگنمایی بیشتر از ۵ برابر دیگر قابل قبول نمی باشد. نمودار ترکهای باز قائم و افقی در بیرون و درون پوسته برای بار باد ضریب ۱ و ۱/۴ برای اعوجاج ۴ برابر در شکلهای ۴۸ تا ۵۵ و در شکلهای ۵۶ تا ۶۳ برای بار باد با ضریب ۱ و ۱/۲ برای اعوجاج ۶ برابر آورده شده است. که با مقایسه شکلهای ترک در حالت بدون اعوجاج و با اعوجاج می توان روند مشابهی را در بار باد بین آنها مشاهده نمود.

۱۲. روند ترک خوردگی در پوسته بدون اعوجاج تحت

اثر ترکیب بار ثقلی و باد

ترکیب بار ثقلی و باد ترکیب بار موثر در طراحی برج نمی باشد لذا بررسی آن از اهمیت کمتری برخوردار است در این حالت هرگاه فقط بار ثقلی موجود باشد ترکیب در پوسته مشاهده نمی شود سپس در حالیکه بار ثقلی موجود است بار باد بر روی سازه قرار می گیرد و مقدار آن انقدر افزایش می یابد تا برج فرو ریزد. مقدار ضریب بار باد در لحظه خرابی ۲/۵ می باشد این در حالی است که ضریب بار باد در ترکیب بار ثقلی و حرارتی و باد برابر ۱/۴ می باشد که تاثیر زیاد بار حرارتی کاملاً آشکار می شود. نمودار ترک قائم و افقی بیرون پوسته در شکلهای ۶۴ و ۶۵ آورده شده است که با مقایسه آن با شکلهای ۲۰ و ۲۱ تاثیر بار حرارتی به خوبی آشکار می شود. اگر همین ترکیب بار بر پوسته های با اعوجاجهای بزرگنمایی شده قرار بگیرد مشاهده می شود که روند ترک خوردگی نیز مشابه این حالت می باشد (که از آوردن شکلهای آن صرف نظر شده است).

۱۳. نتیجه گیری

هدف از این مقاله بررسی روند ترک خوردگی می باشد که به طراحان و محققان این امکان را می دهد تا رفتار واقعی (از دیدگاه عددی) برج را مشاهده نموده و اهمیت بار حرارتی و تاثیر اعوجاج بر روی آنرا مشاهده نموده و مناطق ترک خورده برج را که مستعد آغاز شکست می باشد را مشاهده نمایند.

۱-۱۳. روند ترک خوردگی تحت اثر بار ثقلی و حرارتی

با مقایسه نمودار ترکهای هم نوع برای نمونه ترکهای قائم بیرون پوسته بین پوسته با اعوجاج واقعی و اعوجاجهای بزرگنمایی شده، مشاهده می شود، روند مشابهی برای ترک خوردگی وجود ندارد. به عبارت دیگر زیاده تر شدن اعوجاج موجب افزایش یا کاهش ترک

پیدا کرده اند در حالیکه ترکهای قائمی که در ناحیه پایین پوسته در ناحیه رو به وزش باد بوده اند، بسته شده اند. شکل ۳۷ نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته را برای بار باد با ضریب ۱/۴ نشان می دهد. دیده می شود که ترکهای افقی از ارتفاع ۲۸/۵ تا ۵۸/۵ متری رشد پیدا کرده اند. با توجه به بحثی که در مقایسه اثر بار ثقلی، حرارتی و بار باد بر روی سازه با اعوجاج و سازه بدون اعوجاج به عمل آمد، می توان به این نتیجه کلی دست یافت که بار ثقلی و حرارتی در سازه با اعوجاج اثراتی کاملاً متفاوت نسبت به حالت بدون اعوجاج دارند ولی اثرات بار باد روندی مشابه با روند بار باد در برج بدون اعوجاج دارد.

۱۱. روند ترک خوردگی در پوسته با اعوجاجهای

بزرگنمایی شده تحت اثر ترکیب بار ثقلی و حرارتی و

باد

اعوجاج در برج خنک کننده به صورت انحراف شعاعی و انحراف ضخامتی می باشد، برای بزرگ کردن اعوجاجها، کافی است ضرایب بزرگنمایی در مقدار انحراف شعاعی ضرب گردد. در این تحقیق انحرافهای ضخامتی بزرگنمایی نشده اند. علت آن این است که در صورت ضرب اعداد بزرگنمایی در انحراف ضخامتی، ضخامت نسبت به ضخامت طراحی بسیار کوچک و یا بسیار بزرگ می شود که در شرایط واقعی عملاً امکان پذیر نمی باشد. برای مثال در ضرایب بزرگنمایی بالا در صورت ضرب این اعداد در انحراف ضخامتی، ممکن است ضخامت در بعضی قسمتهای آن نزدیک به صفر گردد.

۱-۱۱. بار ثقلی و حرارتی

در شکل ۳۸ منحنی تغییر شکل شعاعی برج تحت اثر بارهای ثقلی و حرارتی در جهت مداری برای اعوجاج با بزرگنمایی های مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳۹ منحنی تغییر شکل شعاعی برج با همان بارگذاریها در جهت نصف النهاری برای اعوجاج با بزرگنمایی های مختلف آورده شده است چنانچه مشاهده می گردد ایجاد موجهای مداری و نصف النهاری در اعوجاجهای مختلف مستقل از یکدیگر و منحصر به همان ضریب بزرگنمایی اعوجاج می باشد. به همین دلیل نحوه ترک خوردن پوسته در ضرایب مختلف بزرگنمایی اعوجاج بصورت مستقل از همدیگر می باشد ولی به طور کلی در بیرون پوسته ترکهای قائم و افقی متناوب ایجاد می شود که علت آن تغییر شکل موجی پوسته است و در درون پوسته در پایان نواحی ضخیم شدگی تدریجی پوسته ترک قائم ایجاد می گردد. نمودار ترکهای قائم در بیرون پوسته در شکلهای ۴۰ و ۴۴ و نمودار ترکهای افقی در بیرون پوسته در شکلهای ۴۱ و ۴۵ و نمودار ترکهای قائم در درون پوسته در شکلهای ۴۲ و ۴۶ و نمودار ترکهای افقی در درون پوسته در شکلهای ۴۳ و ۴۷ برای اعوجاجهای ۴ و ۶ برابر در پایان بار ثقلی و حرارتی نشان داده شده است.

۲-۱۳. ترکهای افقی باز بیرون پوسته

برای بار باد با ضریب یک در اعوجاج واقعی، ترکهای افقی باز در زاویه نسبی $64/5$ درجه شروع به بسته شدن می نماید و در اعوجاجهای بزرگنمایی شده با اعداد چهار، پنج و شش علاوه بر بسته شدن ترکهای افقی باز در زاویه نسبی $64/5$ درجه، ترکهای افقی در نواحی پایین پوسته در قسمت فشاری بار باد شروع به باز شدن می نماید. برای بار باد با ضریب $1/2$ و $1/4$ در زاویه نسبی $64/5$ درجه در هر دو طرف محور بارگذاری ترکهای افقی شروع به بسته شدن می نماید و ترکهای افقی بین این دو زاویه نسبی $64/5$ و $64/5$ - درجه شروع به بازتر شدن می نمایند. این تغییرات معمولاً در زیر ارتفاع $58/5$ متری اتفاق می افتد.

۳-۲-۱۳. ترکهای قائم باز درون پوسته

برای بار باد با ضریب یک دیده می شود که از تعداد المانهای ترک خورده کاسته می شود اما برای بار باد با ضرایب $1/2$ و $1/4$ بر مقدار المانهایی با ترک قائم اضافه شده است. علت آن ترک خوردن ناحیه رو به وزش باد در بالای پوسته و در زیر ناحیه فشاری باد است. ولی در نواحی پایین پوسته در قسمت فشاری بار باد ترکها شروع به بسته شدن می نماید.

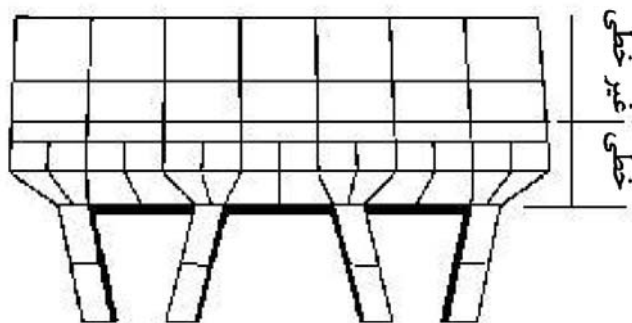
۴-۲-۱۳. ترکهای افقی باز درون پوسته

برای بار باد با ضریب یک ترکهای افقی در زیر ناحیه فشاری باد در پایین پوسته رشد پیدا می کند و برای بار باد با ضریب $1/2$ و $1/4$ ترکهای افقی در نواحی پایین پوسته در ناحیه فشاری باد و در زیر ارتفاع 57 متری شدیداً شروع به رشد می نمایند.

۳-۱۳. روند ترک خوردگی تحت اثر بار باد پس از بار

ثقلی

روند ترک خوردگی بار باد پس از بار ثقلی مشابه بخش ۲-۱۳ می- باشد به عبارتی روند و مناطق ترک خوردگی در پوسته بدون اعوجاج و با اعوجاجهای مختلف مشابه و در مناطق مشابهی قرار دارد.



شکل ۲. نحوه المان بندی ناحیه ستون ها به پوسته برای از بین بردن تمرکز تنش

خوردگی در مناطق مشخصی نمی شود. علت این امر در به وجود آمدن موجهای مداری و نصف النهاری است که در اثر بارهای وارده به گونه ای شکل می گیرند که در هر ضریب بزرگنمایی اعوجاج، ترکیب این موجهای مداری و نصف النهاری متفاوت و منحصر به همان بزرگنمایی اعوجاج است. ولی به طور کل در پوسته بدون اعوجاج کل بیرون پوسته دچار ترک قائم و ان قسمتی از پوسته که دارای ضخامت حداقل است دچار ترک خوردگی متناوب افقی می- شود در حالیکه در برج اعوجاج یافته بیرون پوسته ترکهای متناوب قائم و افقی ایجاد می شود. در درون پوسته ترک قائم در انتهای ضخیم شدگی تدریجی پوسته ایجاد می گردد و ترک افقی در درون پوسته بصورت پراکنده تشکیل می شود.

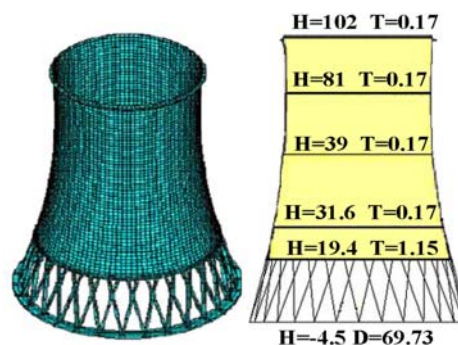
۲-۱۳. روند ترک خوردگی تحت اثر بار باد پس از بار

ثقلی و حرارتی

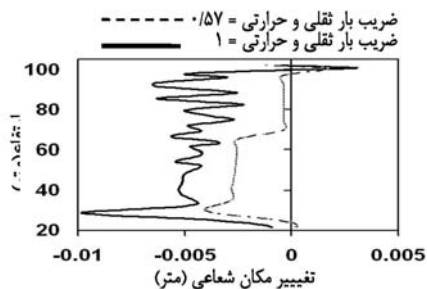
برخلاف بار ثقلی و حرارتی که در هر بزرگنمایی اعوجاج سازه از خود رفتار خاصی را نشان می دهد، رفتار پوسته برجهای خنک کننده بتنی تحت اثر بار باد به طور کلی قابل پیش بینی است و برای برج مورد مطالعه که یکی از برجهای متعارف می باشد به صورت زیر است:

۱-۲-۱۳. ترکهای قائم باز بیرون پوسته

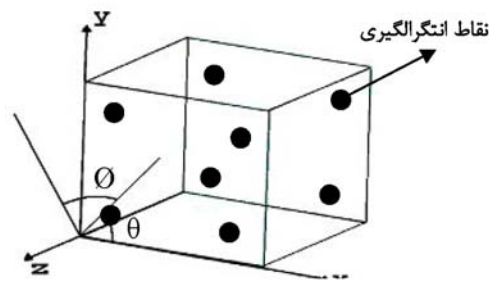
برای بار باد با ضریب ۱ در اعوجاج واقعی، بار باد بر تعداد ترکهای قائم باز افزوده است ولی نتوانسته تا در قسمت فشاری بار باد ترکهای قائم باز قبلی را ببندد. در حالی که در اعوجاجهای بزرگنمایی شده با اعداد ۴، ۵ و ۶، بار باد در قسمت های مکشی باعث گردیده است تا در تعداد بیشتری از المانها ترک قائم ایجاد گردد. همچنین بار باد نتوانسته تا در قسمت فشاری خود تعدادی از المانها را که قبلاً دارای ترک قائم باز بودند ترک قائم آنها را ببندد. برای بار باد با ضریب $1/2$ و $1/4$ بار باد در قسمت های فشاری خود نتوانسته است تعداد زیادی از المانهایی که دارای ترک قائم باز بودند، ترک آنها را ببندد.



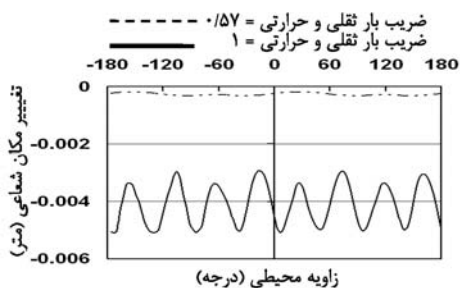
شکل ۱. مدل برج خنک کننده (H,T,D) به ترتیب به معنای ارتفاع، ضخامت و قطر بر حسب متر هستند)



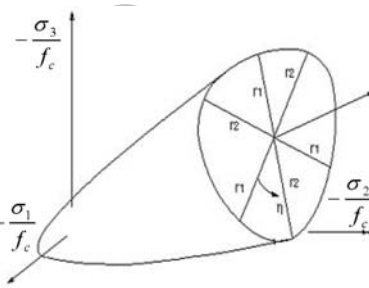
شکل ۷. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت نصف النهاری صفر درجه در بارگذاری ثقلی و حرارتی (علامت منفی نشانه حرکت شعاعی به سمت بیرون برج است)



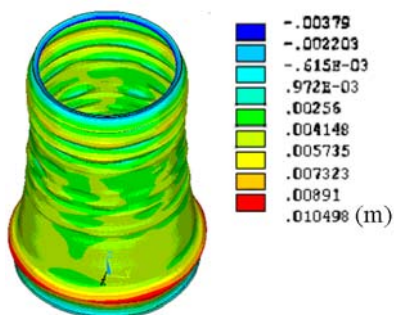
شکل ۳. محورهای مختصات محلی المان



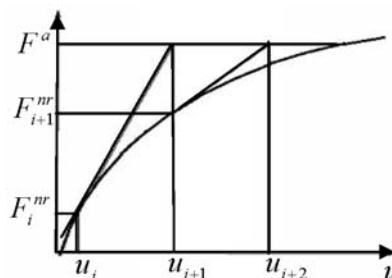
شکل ۸. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت مداری در تراز ۷۰/۵ متری در بارگذاری ثقلی و حرارتی



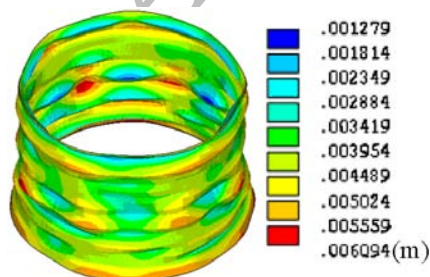
شکل ۴. صفحه شکست سه بعدی در فضای تنشهای اصلی



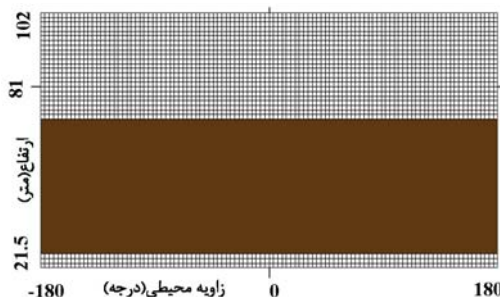
شکل ۹. تغییر شکل برج خنک کننده در بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج بدون اعوجاج



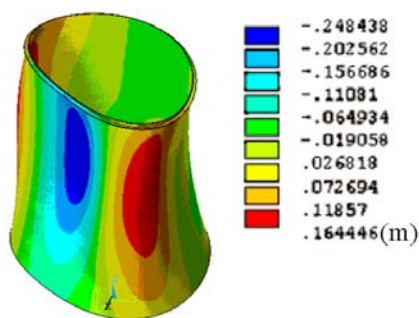
شکل ۵. روش حل نیوتن رافسون در آنالیز غیر خطی



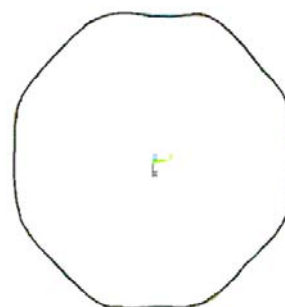
شکل ۱۰. تغییر شکل برج خنک کننده در بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج بدون اعوجاج از ارتفاع ۵۲/۵ تا ۸۲/۵ متری



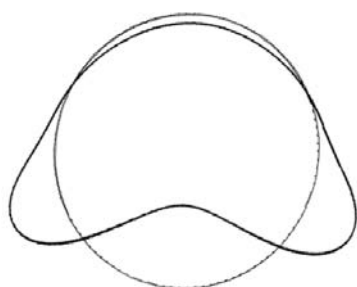
شکل ۶. نمودار ترکهای قائم بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۰/۵۷۱



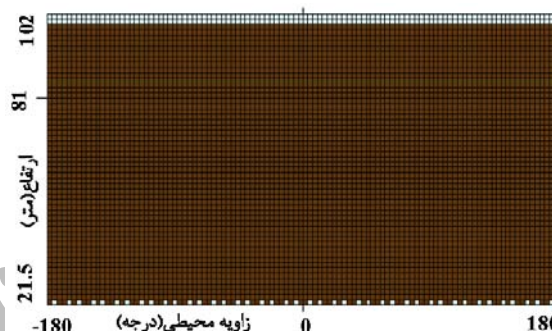
شکل ۱۵. تغییر شکل شعاعی در حالت حد نهایی بار باد در برج خنک کننده بدون اعوجاج واقعی



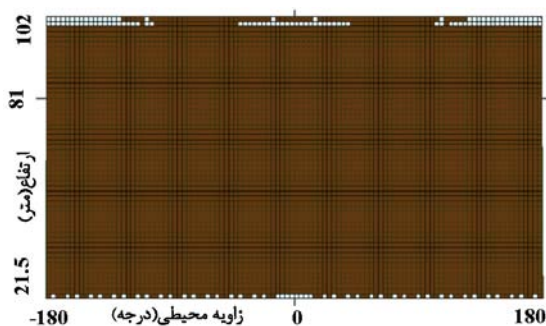
شکل ۱۱. تغییر شکل برج خنک کننده در بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج بدون اعوجاج در تراز ۷۰/۵ متری



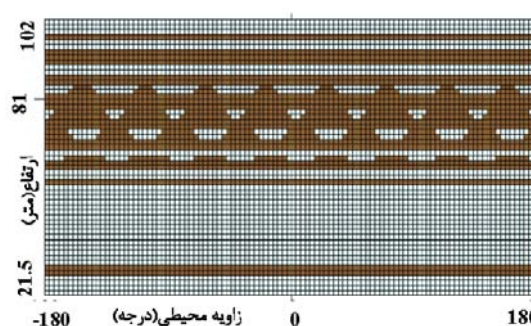
شکل ۱۶. تغییر شکل شعاعی در حالت حد نهایی بار باد در برج خنک کننده بدون اعوجاج واقعی در تراز ۷۵ متری



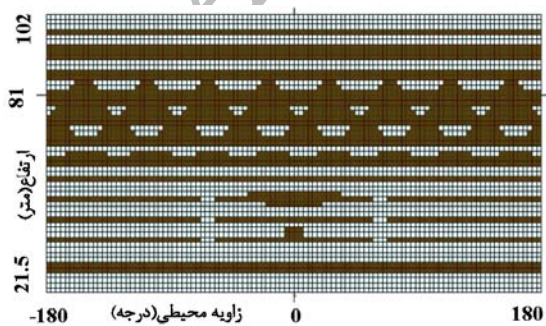
شکل ۱۲. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



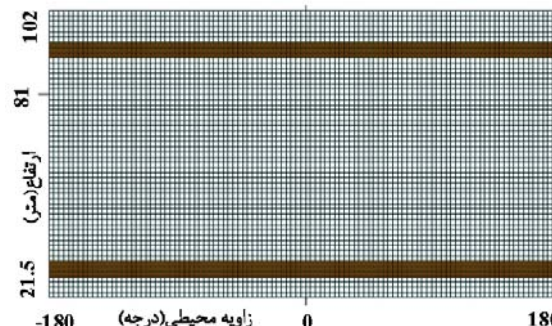
شکل ۱۷. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱



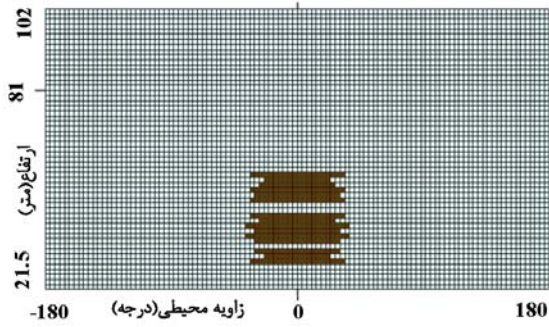
شکل ۱۳. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



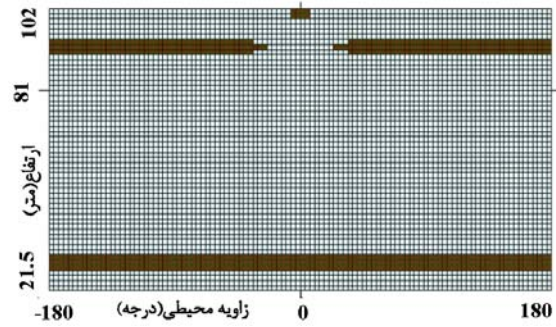
شکل ۱۸. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱



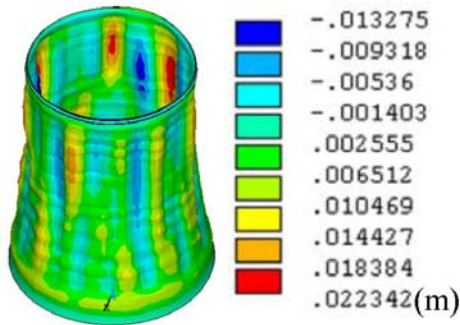
شکل ۱۴. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



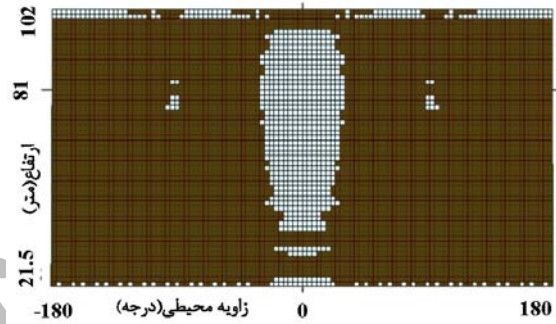
شکل ۲۳. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱/۴



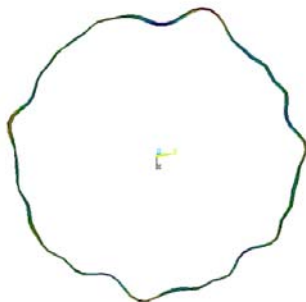
شکل ۱۹. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱



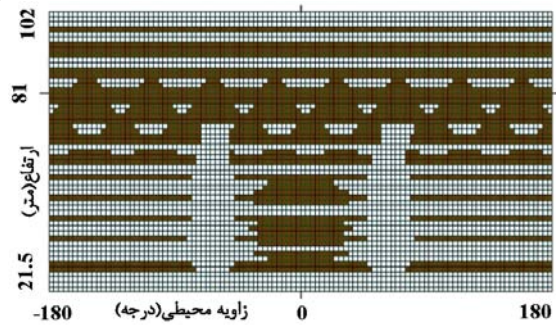
شکل ۲۴. تغییر شکل برج خنک کننده در بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج با اعوجاج واقعی



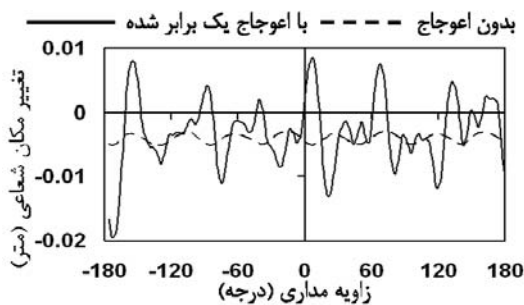
شکل ۲۰. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱/۴



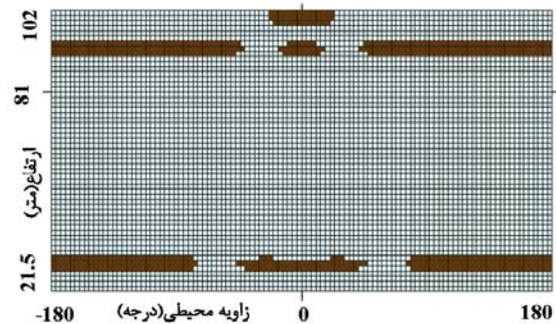
شکل ۲۵. تغییر شکل برج خنک کننده در بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج با اعوجاج واقعی در تراز ۷۰/۵ متری



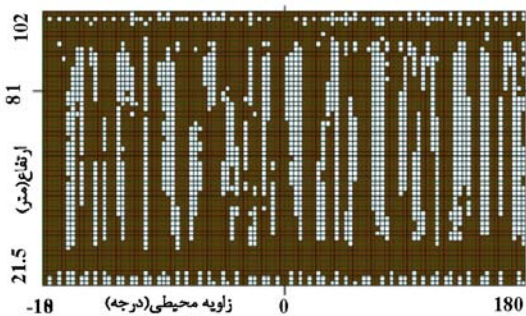
شکل ۲۱. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱/۴



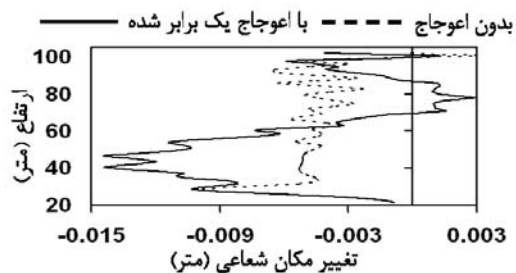
شکل ۲۶. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت مداری در پایان بار ثقلی و حرارتی در تراز ۷۰/۵ در حالت بدون اعوجاج و با اعوجاج (علامت منفی نشانه حرکت رو به بیرون برج است)



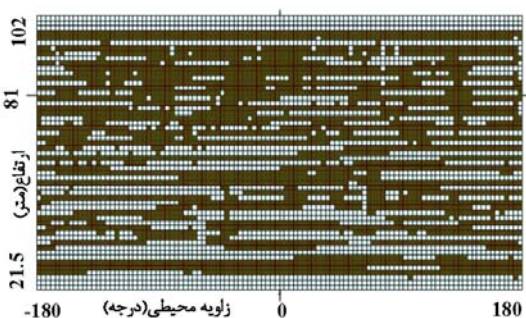
شکل ۲۲. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت بدون اعوجاج در ضریب بار باد برابر ۱/۴



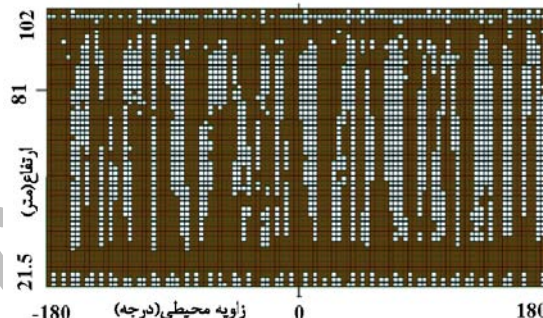
شکل ۳۱. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱



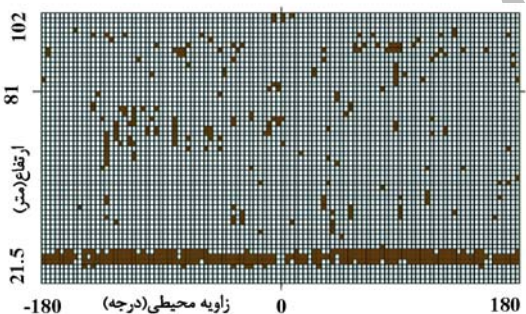
شکل ۲۷. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت نصف النهاری در پایان بار ثقلی و حرارتی برای برج بدون اعوجاج و با اعوجاج (علامت منفی نشانه حرکت رو به بیرون برج است)



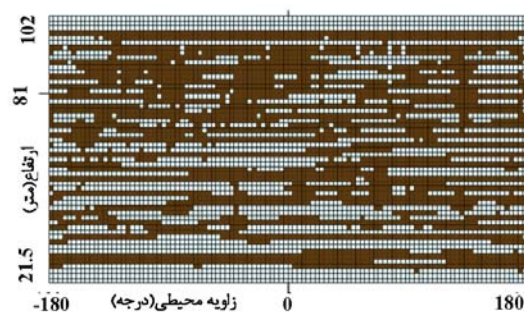
شکل ۳۲. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱



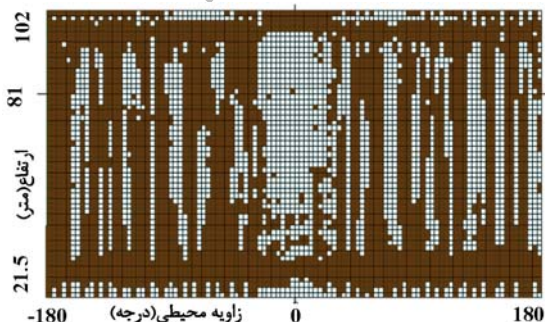
شکل ۲۸. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



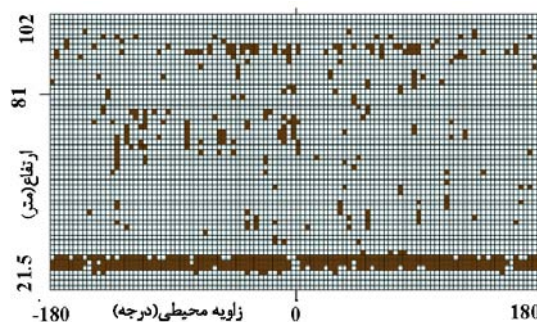
شکل ۳۳. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱



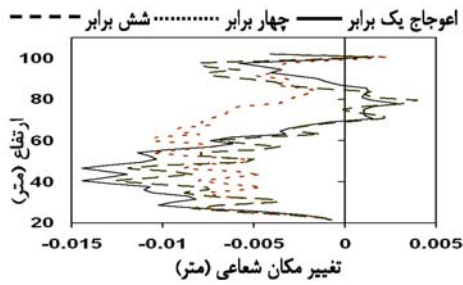
شکل ۲۹. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



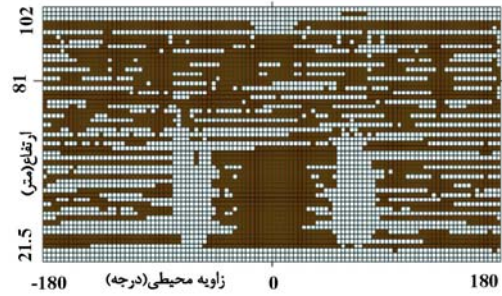
شکل ۳۴. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱/۴



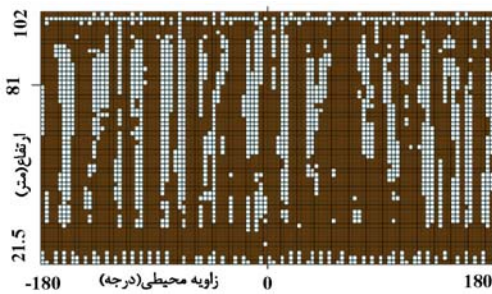
شکل ۳۰. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



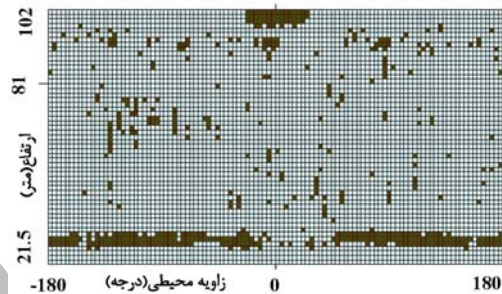
شکل ۳۹. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت نصف النهاری در پایان بار ثقلی و حرارتی و در زاویه نسبی صفر درجه برای برج با اعوجاجهای ۱ و ۴ و ۶ برابر شده (علامت منفی نشانه حرکت شعاعی به سمت بیرون برج است)



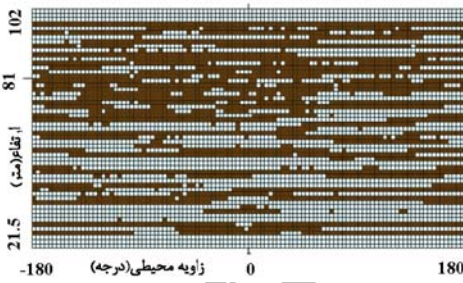
شکل ۳۵. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱/۴



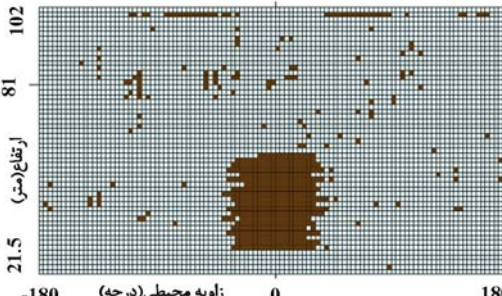
شکل ۴۰. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



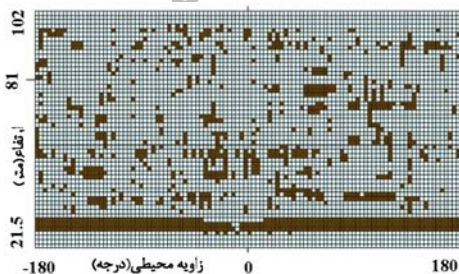
شکل ۳۶. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱/۴



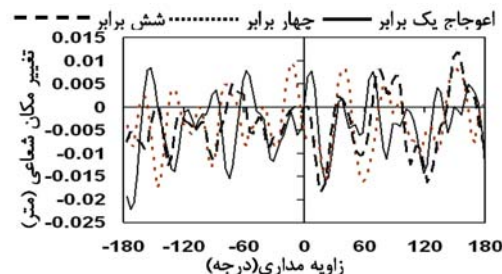
شکل ۴۱. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



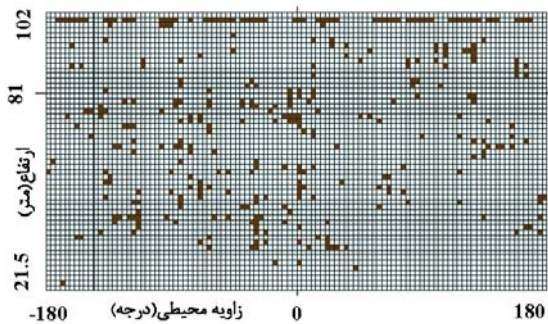
شکل ۳۷. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت با اعوجاج واقعی در ضریب بار باد برابر ۱/۴



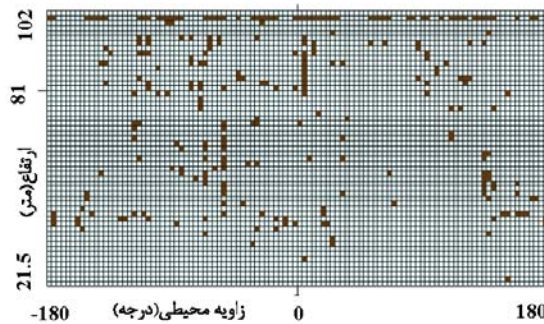
شکل ۴۲. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



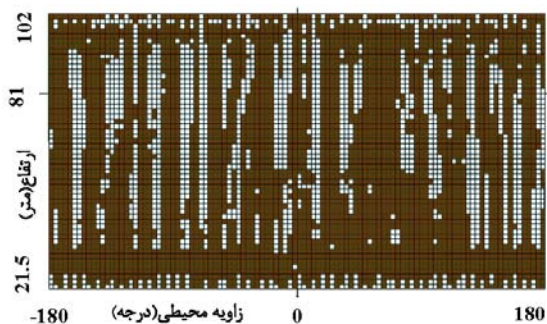
شکل ۳۸. منحنی تغییر شکل شعاعی در جهت مداری در تراز ۷۵ متری در پایان بار ثقلی و حرارتی برای اعوجاجهای ۱ و ۴ و ۶ برابر شده (علامت مثبت نشانه حرکت شعاعی به سمت درون برج است)



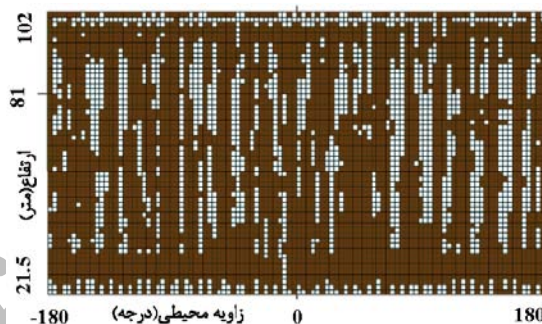
شکل ۴۷. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



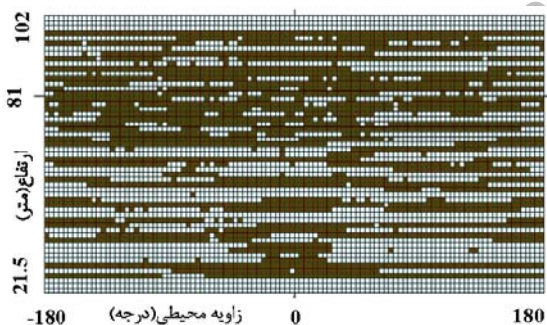
شکل ۴۳. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



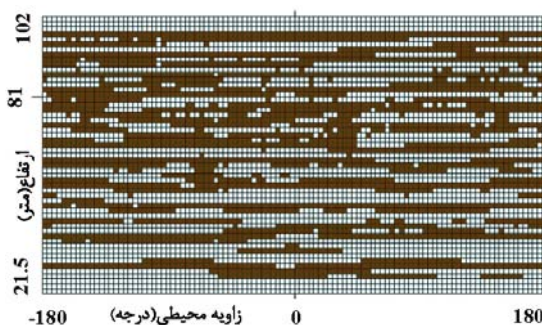
شکل ۴۸. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



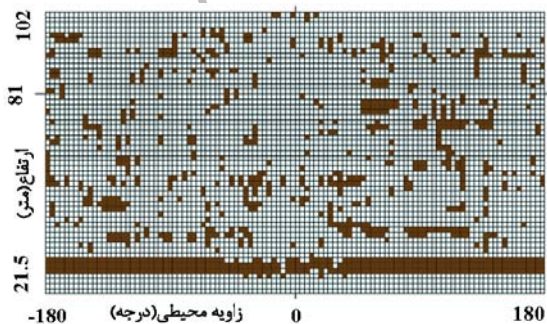
شکل ۴۴. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



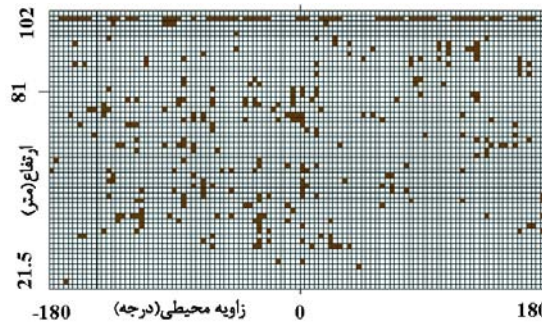
شکل ۴۹. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



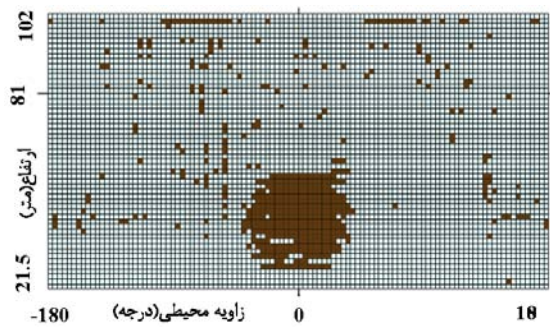
شکل ۴۵. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



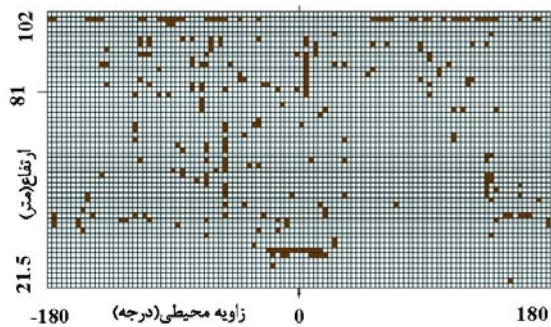
شکل ۵۰. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



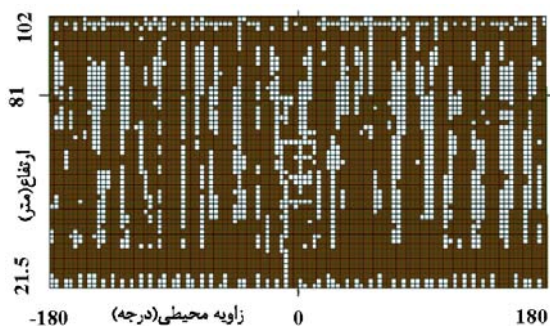
شکل ۴۶. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر ۱



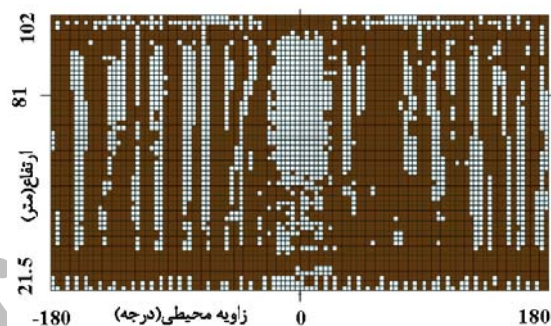
شکل ۵۵. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۴



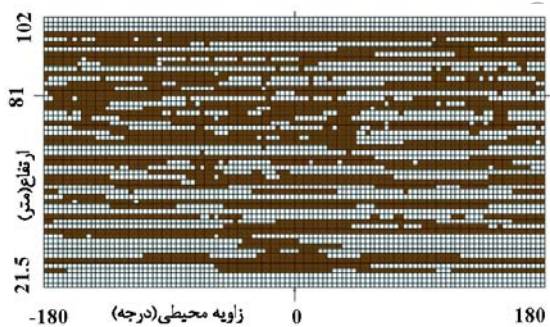
شکل ۵۱. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



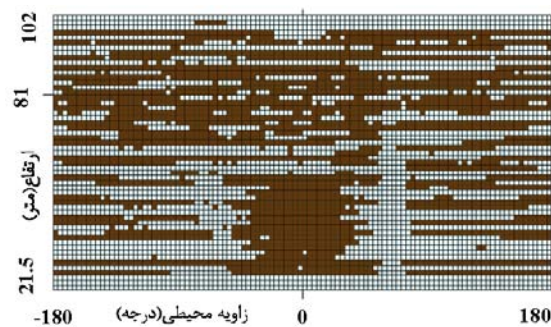
شکل ۵۶. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



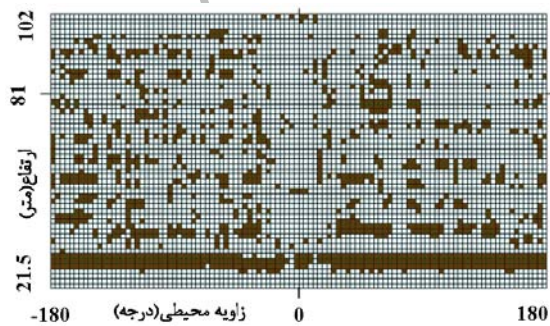
شکل ۵۲. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۴



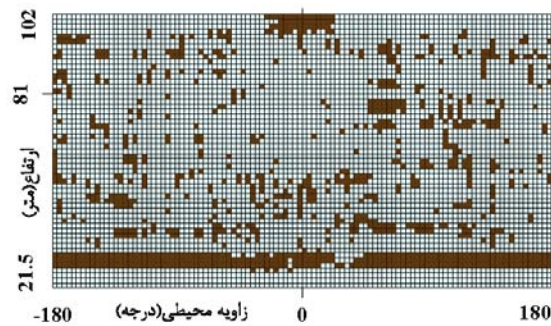
شکل ۵۷. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



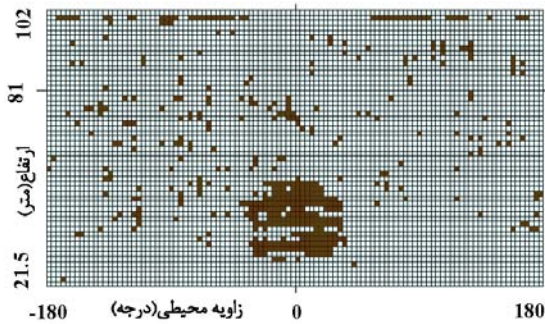
شکل ۵۳. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۴



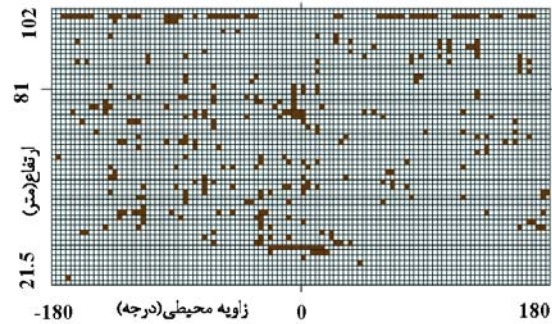
شکل ۵۸. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



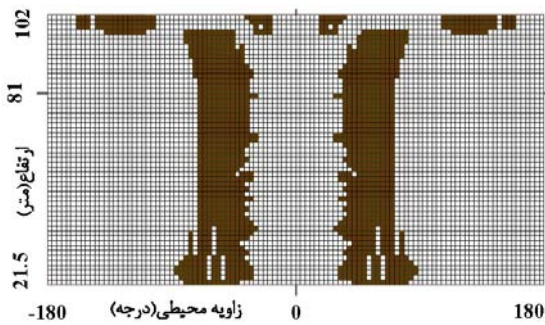
شکل ۵۴. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۴ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۴



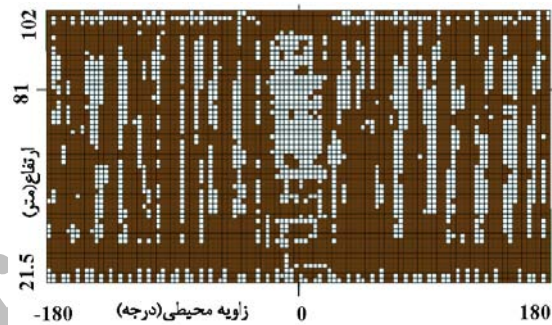
شکل ۶۳. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۲



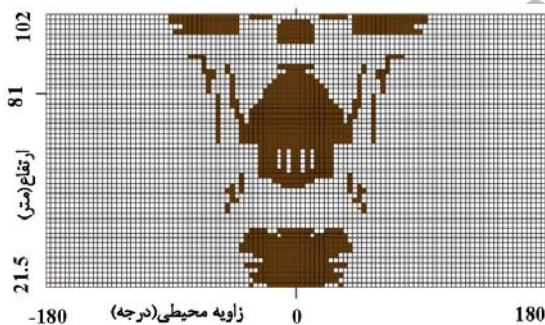
شکل ۵۹. نمودار ترکهای افقی باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱



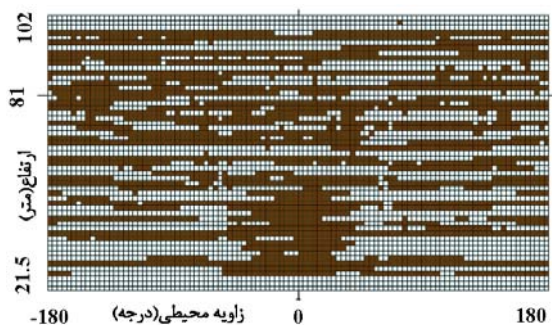
شکل ۶۴. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت بار ثقلی و باد در ضریب بار باد برابر ۲/۵



شکل ۶۰. نمودار ترکهای قائم باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۲



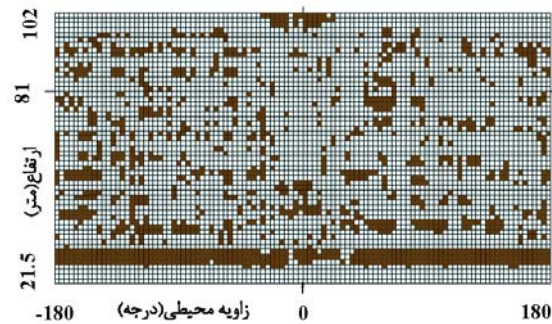
شکل ۶۵. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت بار ثقلی و باد در ضریب بار باد برابر ۲/۵



شکل ۶۱. نمودار ترکهای افقی باز بیرون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۲

جدول ۱. مشخصات مصالح برج خنک کننده

جنس	مشخصات	مقدار	واحد
سنگ	جرم حجمی	۲۴۰۰	$Kg \ m^3$
	مدول الاستیسیته	$۲/۵E1۰$	$N \ m^2$
	تنش فشاری	۲۸	Mpa
	نسبت پواسون	۰/۲	
سنگ	جرم حجمی	۷۸۵۵	$Kg \ m^3$
	مدول الاستیسیته	$۲E1۱$	$N \ m^2$
	تنش جاری شدگی	۴۰۰۰	$Kg \ m^2$
	نسبت پواسون	۰/۳	



شکل ۶۲. نمودار ترکهای قائم باز درون پوسته در حالت اعوجاج ۶ برابر در ضریب بار باد برابر ۱/۲

[4] Gopalakrishnan S. & Ramanjaneyulu K. & AppaRao T.V.S.R., “*Studies on in elastic behavior of Perfect and imperfect cooling tower shells*”, Natural draught cooling tower, wittek & Kratzig, 1996, pp.173.

[5] Viladkar M.N. & Godbole P.N. & Tankha A., “*Analysis of cooling towers with bulge imperfections*” - Natural draught cooling tower, wittek & kratzig , 1996, pp.233.

[6] *Ansys 54* – Software – Theory manual scetion 4-7 and 14-65 and Element manual section 4-65.

[7] *Structural desing of cooling towers*, VGB- R610 ve - Edition 1990.

[8] *Reinforced concrete cooling tower shells practice and commentary*, ACI 334.2R – 91.

مراجع

[1] Kemp K.O. & Croll J.G.A., “*The role of geometric imperfections in the collagseof a cooling tower*”, The Structural Engineer, January 1976, No.1 , Volume 54.

[2] Hara T. & Kato S. & Gould P.L., “*Ultimate strength of R/C cooling tower shell with various reinforcing ratios*”- Journal of the international association for shell and spatial structures (IASS), Vol. 37, (1996) n.122.

[3] Choi C.K. & Noh H.C., “*Analysis of geometrically imperfect cooling tower shell considering the effect of tension stiffening of concrete*”, Natural draught cooling tower, Wittek & Kratzig, 1996 , pp. 141.

Archive of SID