

ترکهای ضخامتی در برج خنک کننده بتنی

سید رامین اسعد سجادی
کارشناسی ارشد

سعید صبوری
استادیار

دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

برج خنک کننده بتنی سازه‌ای هذلولی است که در صورت عدم دقت کافی در هنگام اجرای آن شعاع و ضخامت پوسته اجرا شده با شعاع و ضخامت پوسته طراحی شده تفاوت خواهد داشت. این اختلاف در صورتیکه شدید باشد باعث بروز رفتار نامناسبی در حین بهره‌برداری از برج می‌شود که در حین طراحی در نظر گرفته نمی‌شود. استفاده از مدل سه بعدی شکست بتن و استفاده از المانهایی که قدرت ترک خوردگی در سه جهت دلخواه را دارند، به همراه تاثیر اعوجاجها در مدل سازی برج نشان می‌دهد که در پوسته اعوجاج یافته در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی ترکهای ضخامتی ایجاد می‌شود که باعث جدا شدن درون و بیرون پوسته می‌شود. تعداد این ترکها با افزایش اعوجاج افزایش می‌یابد. این افزایش بخصوص زمانی تشدید می‌گردد که تجمع اعوجاجها در یک منطقه از برج به گونه‌ای باشد که یک انحراف شعاعی حداکثر بصورت تورفتگی و بیرون آمدگی پشت سر هم ایجاد شود. از آنجا که هیچ آرماتوری برای مقابله با این ترکها وجود ندارد لذا می‌بایست از بروز آنها جلوگیری بعمل آید که اینکار با توجه به میزان دقت ساخت برجها با اصلاح ترکیب بارگذاری و افزایش ضریب بار حرارتی در حین طراحی برج امکان پذیر می‌باشد.

کلمات کلیدی

برج خنک کننده، انحراف شعاعی و ضخامتی، اعوجاج، تحلیل غیر خطی، ترک ضخامتی

Thickness Cracks in R.C. Hyperbolic Cooling Towers

S. Sabouri
Assistant Professr

Ramin Sajadi
MS.c

Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University

Abstract

Imprecise construction work might cause imperfection in the shell of RC. hyperbolic cooling towers. By considering the three directions concrete fracture model and by using elements in Finite Element analysis which could crack in three directions, it could be shown that in imperfect shell, the thickness cracks occur at the end of the weight and thermal loads. In the other words, the inside and outside of the concrete shell separate. The number of such cracks rises up by increasing the imperfection in the cooling tower shell. This increase in number of cracks could multiple when two concavity and convexity imperfections happen consecutively. Since there is not any reinforce bar for preventing of such cracks, so it must be avoided by precise construction work and by modifying the participating thermal load factor in combining loads.

Key words

cooling tower, imperfection, nonlinear Finite Element analysis, reinforce concrete, thickness crack.

برج خنک کننده بتنی سازه‌ای هذلولی است که برای خنک کردن آب در گردش تأسیسات حرارت‌زا بکار می‌رود به علت مشکلات اجرایی 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 شود که نمونه آن برج آردیر^۱ می‌باشد [۱] که به علت انحراف شعاعی زیاد با وزش باد خراب گردید. یکی از مسائل مهم در این برج وجود و رشد ترکهای قابل توجه در آن بود که قبل از فروریختگی برج مشاهده و ثبت شده بود. علت پدید آمدن چنین ترکهایی بارگذاریهای متناوب حرارتی و باد قبل از فروریختگی آن بود. پس از خراب شدن این برج تحقیقات زیادی بر روی اعوجاج و نحوه گسترش ترک انجام شد در این تحقیقات اعوجاج یا بصورت یک حلقه [۲ و ۳ و ۴] و یا بصورت یک توررفتگی یا بیرون رفتگی [۲ و ۵] مدل شده است که مسلماً این نوع اعوجاجها نمی‌تواند بیانگر رفتار واقعی برج باشد. نکته دیگر در این مطالعات این است که فقط اثر بار ثقلی و باد در نظر گرفته شده است در حالیکه برج تحت بارهای مختلفی از جمله حرارت قرار دارد که برای پوسته ترکیب بارگذاری ثقلی، حرارتی و باد تعیین کننده است. همچنین در این مطالعات از المانهای پوسته‌ای که فقط قادر است تا ترک خوردگی در صفحه المان را که عموماً ترک افقی و قائم است مدل نماید [۱ و ۲ و ۳] ولی استفاده از مدل سه بعدی بتن و استفاده از المانهایی که قادر به ترک خوردگی در سه جهت دلخواه هستند نشان می‌دهد که در پایان بار ثقلی و حرارتی در برج اعوجاج یافته، ترکهای ضخامتی روی می‌دهد این نوع ترک باعث می‌شود تا بیرون و درون پوسته از یکدیگر جدا شوند. برج مورد مطالعه در این مقاله یکی از برجهای طرح توسعه نیروگاه شهید رجایی می‌باشد که در هنگام ساخت آن در هر مقطع انحرافهای شعاعی و ضخامتی آن در هر مرحله از ساخت بوسیله ابزارهای اندازه‌گیری برداشت شده است. در بررسی برج خنک کننده مذکور با در نظر گرفتن انحرافهای شعاعی و ضخامتی، برج مدل شده است.

۱- مشخصات سازه

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

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

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

که در این روابط R شعاع در یک مقطع افقی بر حسب مترو H ارتفاع از سطح زمین بر حسب مترو و Φ زاویه مماسی پوسته می‌باشد در شکل (۱) شمایی از برج خنک کننده نشان داده شده است. سازه دارای ۳۰ ستون ضربدری با مقطع $۱/۰۵ \times ۰/۷$ متر و پی‌نواری به عرض ۴ متر و عمق ۱ متر می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات مصالح برج خنک کننده آورده شده است.

۲- نرم افزار مورد استفاده

در این بررسی از نرم افزار المان محدود ANSYS54 استفاده شده است. المان Solid 65 این نرم افزار که در شکل (۲) آمده است قادر است تا موارد زیر را مدل نماید [۶]:

۱- ترک خوردگی در سه جهت عمود بر هم در هریک از هشت نقطه انتگرالگیری بصورت پخش شده (تغییر در ماتریس سختی المان) قابل ایجاد است و رفتار بتن همگن فرض می‌شود. 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 [۶] استفاده شده است که در شکل (۳) 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 می‌شود.

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

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 جهت‌های آرماتور در المان می‌باشد.

۲- روش حل غیرخطی

برای آنالیز غیرخطی از روش نیوتن رافسون استفاده شده است که در شکل (۴) آمده است که در آن F^a بردار نیروی گرهی در پله بارگذاری و F_{i+1}^{nr} بردار نیروی گرهی المانها در تکرار $i+1$ می‌باشد. معیارهای همگرایی هم بصورت نیرو و هم بصورت تغییرمکانی اعمال شده است که همگرایی تحلیل عددی از نظر نیرویی بحرانی‌تر 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 خنک‌کننده فرو می‌ریزد) و در حد نهایی و بعد از آن مقدار نرم نیرو (ریشه دوم جمع نیروهای به توان دوم کلیه گره‌های سازه) تقریباً ثابت و همواره بالای ۲۰۰ 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 تغییرمکانی نیز متغیر و مقدار آن همواره کمتر از یک میلی‌متر بوده است و همواره همگرا شده است.

۳- نحوه مدل کردن سازه

تمام برج با المانهای مکعبی سه بعدی^۲ مدل شده است که پوسته از ارتفاع ۲۱ تا ۱۰۲ متری به همراه رینگ سخت‌کننده آن با المانهای غیرخطی با خاصیت بتنی مدل شده است و پی و ستونها با المانهای خطی مدل شده است. همانطور که در شکل (۵) 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 خنک‌کننده‌ای که با المانهای مکعبی مدل شده است و برج خنک‌کننده‌ای که با المانهای پوسته‌ای^۳ 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 خنک‌کننده 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.

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 از یک قطعه که اضلاع آن قطعه کاملاً خطی است. که در هر مقطع از ساخت برج ۴۲ نقطه از پوسته مورد نقشه‌برداری قرار گرفته است و میزان انحراف شعاعی و ضخامتی پوسته نسبت به حالت طراحی بدست آمده است 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 نقاط بیشتری مورد نیاز بوده است که این نقاط از برازش مناسبی از داده‌های موجود بدست آمده‌اند بدین صورت که 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 نمودار انحرافهای شعاعی داخلی و خارجی پوسته در نقاط

برداشت شده و مدل شده، دیده شد که شباهت خوبی بین آنها وجود دارد.

۵- بارگذاری بر روی برج خنک کننده

۱-۵- بار مرده وزن

وزن مخصوص بتن مسلح $2/4 \text{ ton/m}^3$ می باشد که در طراحی بکار رفته است.

۲-۵- بار حرارتی

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

۳-۵- بار باد و بار مکش درونی

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

$$q_E(z) = \phi q_0(z) \quad W(z, \theta) = c_p(\theta) q_E(z) \quad (4)$$

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

$$c_p(\theta) = -1 + 0.5 \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2.395} \quad 70 < \theta \leq 91 \quad (5)$$

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

$$q_0(z) = 1.05 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.22} \quad (6)$$

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 ($Z=102 \text{ m}$) بدست می آید.

۹- نحوه بارگذاری بر روی برج

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 می ریزد. اینکار بر روی برج خنک بدون اعوجاج، با اعوجاج واقعی و اعوجاجهای 3 ، 4 ، 5 و 6 برابر شده اعوجاج واقعی انجام شده است.

۱۰- 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.

$$0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W + 1.4 \times 0.7T) \quad (7)$$

هر گاه این رابطه مرتب شود و از بار زنده برف نیز صرف نظر گردد رابطه فوق بصورت زیر خواهد بود

$$1.05D + 1.275W + 0.735T$$

(۸)

در رابطه (۸) دیده می‌شود که بار حرارتی با ضریب $0.735T$ وارد ترکیب شده است. در این بررسی ابتدا بار ثقلی و بار حرارتی با ضریب واحد بر روی برج قرار داده می‌شود و پس از تعیین شکل برج و ترک خوردگی، بار باد آنقدر بر روی برج اضافه می‌شود 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 این نامه نبوده است هر چند در ادامه با ضرایب این نامه نیز تحلیلهایی انجام شده است.

۱۱- علل بوجود آمدن ترکهای ضخامتی

استفاده از المانهای پوسته‌ای باعث می‌شود که المان فقط قدرت ترک خوردگی در دو جهت آنهم در صفحه المان را داشته باشد لذا نمی‌تواند وقوع ترک ضخامتی را پیش‌بینی نماید. در این بررسی از مدل سه بعدی بتن استفاده شده است. همچنین از المان مکعبی استفاده گردیده است که قادر است تا در هر هشت نقطه انتگرالگیری در سه جهت ترک بخورد لذا با این مدلسازی وقوع این ترکها قابل پیش‌بینی است که نمونه‌هایی از ترک ضخامتی در شکل (۶) نشان داده شده است. ترک ضخامتی ترکی است که درون و بیرون پوسته را از هم جدا می‌کند بدون اینکه ارماتوری در برابر آن مقاومت کند. همچنین ارماتورها در جهت مداری و نصف النهاری مدل شده‌اند که در هر جهت رفتار مستقل دو خطی کینماتیک دارند و ارماتورها بصورت پخش شده در ضخامت المان هستند.

محاسبات نشان می‌دهد که در برج بدون اعوجاج در بار ثقلی و حرارتی هیچگونه ترک ضخامتی روی نداده است. همچنین در این حالت ضریب حد نهایی بار باد $1/4$ می‌باشد که در زمان وقوع بار باد نیز هیچگونه ترک ضخامتی روی نداده است. در اعوجاجهای واقعی (ضریب بزرگنمایی برابر یک) و اعوجاجهای ۳ و ۴ برابر شده، مطالعات نشان می‌دهد که در پایان بار ثقلی و حرارتی ترکهای ضخامتی بوجود آمده‌اند. در شکل (۷) و (۸) نمودار ترکهای ضخامتی در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج خنک کننده با اعوجاج واقعی و اعوجاج ۴ برابر شده آورده شده است. در اعوجاج واقعی و اعوجاج با ضریب بزرگنمایی ۳ و ۴ برابر شده پس از وارد شدن بار ثقلی و حرارتی، بار باد تا ضریب $1/4$ وارد می‌شود و برج به مقاومت حد نهایی خود میرسد. مطالعات نشان می‌دهد که پس از وارد شدن بار باد ترک ضخامتی جدیدی در پوسته ایجاد نشده است ولی ترکهای ضخامتی که در زیر ناحیه فشاری بار باد قرار داشتند بسته شده اند شکلهای (۹) و (۱۰) نمودار ترکهای ضخامتی را در حد نهایی بار باد برای اعوجاجهای واقعی و ۴ برابر شده نشان می‌دهند.

در اعوجاج ۵ برابر شده مطالعات نشان می‌دهد که در پایان بار ثقلی و حرارتی ترکهای ضخامتی در برج بوجود آمده‌اند که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همچنین در این حالت ضریب حد نهایی بار باد $1/2$ می‌باشد که مطالعات نشان می‌دهند که پس از بارگذاری بار باد هیچگونه ترک ضخامتی جدید بوجود نیامده است بلکه ترکهای ضخامتی که در زیر ناحیه فشاری بار باد قرار داشتند بسته شده‌اند که در شکل (۱۲) نمودار ترکهای ضخامتی در ضریب بار باد $1/2$ نشان داده شده است.

در اعوجاج ۶ برابر محاسبات نشان می‌دهد که در پایان بار ثقلی و حرارتی ترکهای ضخامتی در برج بوجود آمده‌اند که نمودار آن در شکل (۱۳) آمده است. ضریب حد نهایی بار باد در این حالت $1/2$ می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد پس از بارگذاری بار باد تا قبل از ضریب بار باد $1/2$ هیچگونه ترک ضخامتی جدید در برج بوجود نیامده است بلکه ترکهای ضخامتی که در زیر ناحیه فشاری بار باد قرار داشتند بسته شده‌اند ولی در ضریب بار باد $1/2$ ترکهای ضخامتی جدیدی شروع به رشد کرده‌اند که در شکل (۱۴) نمودار آن دیده می‌شود. اهمیت ترکهای ضخامتی در این است که هیچ ارماتوری برای مقابله با ترک وجود ندارد و در صورتیکه تجمع این ترکها در ناحیه‌ای از پوسته زیاد باشد می‌تواند به برج صدمه وارد کند

با توجه به نمودار ترکهای ضخامتی دیده می‌شود که بین ترکهای ضخامتی پوسته با اعوجاجهای مختلف هیچگونه شباهتی وجود ندارد به عبارتی بزرگتر شدن اعوجاجها باعث تشدید یا کاهش تجمع ترکهای ضخامتی اعوجاجهای کوچکتر نمی‌شود بلکه رفتار کاملاً مستقلی را از خود نشان می‌دهد که علت آن در تغییر شکل موجی هر کدام از این اعوجاجها می‌باشد. در شکل

(۱۵) تغییر شکل برج در حالت بدون اعوجاج در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی و در شکل (۱۶) تغییر شکل برج از ارتفاع ۵/۸۲ تا ۵/۸۲ متری نشان داده شده است (اعداد کنار شکلها تغییر مکان بر حسب متر است). همچنین در شکل (۱۷) تغییر شکل مقطعی از برج بدون اعوجاج در ارتفاع ۷۰/۵ متری نشان داده شده است مشاهده می گردد که پوسته در پایان بار ثقلی و حرارتی بصورت موجدار تغییر شکل داده است. در شکل (۱۸) تغییر مکان شعاعی در یک نصف النهار برج بدون اعوجاج دیده می شود. همانطور که مشاهده می شود تا ضریب بار ثقلی و حرارتی ۰/۵۷ هیچگونه موج نصف النهاری دیده نمی شود. تغییر شکل زیاد ناحیه پایین پوسته به علت وجود اولین ترکهای قائم در بیرون پوسته در این ناحیه است. همچنین در این شکل دیده می شود که در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر با یک برج بصورت موجی تغییر شکل داده است. در شکل (۱۹) تغییر شکل شعاعی در تراز ۷۰/۵ متری در یک مقطع مداری در پوسته بدون اعوجاج نشان داده شده است همانطور که مشاهده می شود تا ضریب بار ثقلی و حرارتی ۰/۵۷ هیچگونه موج مداری وجود ندارد ولی در ضریب بار ثقلی و حرارتی برابر با یک در پوسته موج مداری ایجاد می شود که علت آن می تواند کاهش سختی به علت ترکهای افقی قائم به همراه نیروی فشاری مداری و نصف النهاری باشد. دامنه موجهای مداری و نصف النهاری در پوسته بدون اعوجاج کوچک است و این امر باعث شده تا ترک ضخامتی در پوسته ایجاد نشود. در شکل (۲۰) تغییر شکل برج در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج اعوجاج یافته (بزرگنمایی اعوجاج برابر یک) و در شکل (۲۱) تغییر شکل مقطعی از برج در ارتفاع ۷۰/۵ متری دیده می شود. در شکل (۲۲) تغییر شکل در مقطع نصف النهاری در پوسته با اعوجاج واقعی را نشان می دهد. چنانچه دیده می شود در ضریب بار ثقلی و حرارتی ۰/۵۷ یک موج نصف النهاری بر روی پوسته ایجاد می شود و سپس بر روی همین موج در ضرایب بار بالاتر یکسری موجهای نصف النهاری موضعی ایجاد شده است.

شکل (۲۳) منحنی تغییر شکل شعاعی در مدار تراز ۷۰/۵ متری در پوسته با اعوجاج واقعی را در ضرایب بار مختلف ثقلی و حرارتی نشان می دهد. در شکل (۲۴) تغییر شکل شعاعی در نصف النهار صفر درجه (رو به وزش باد) در پایان بارگذاری ثقلی و حرارتی برای پوسته بدون اعوجاج و با اعوجاج واقعی آورده شده است. مشاهده می گردد دامنه موجهای نصف النهاری در حالت اعوجاج یافته بسیار بیشتر از حالت بدون اعوجاج است همچنین در شکل (۲۵) تغییر شکل شعاعی در نصف النهار صفر درجه در پوسته با اعوجاج ۴ و ۶ برابر آمده است.

در شکل (۲۶) نمودار تغییر شکل موجهای مداری در تراز ۷۰/۵ متری برای پوسته با اعوجاج واقعی و پوسته بدون اعوجاج آورده شده است. مشاهده می گردد دامنه موجهای مداری با اعوجاج واقعی بسیار بیشتر از حالت بدون اعوجاج است. در شکل (۲۷) نمودار تغییر مکان موجهای مداری در اعوجاجهای ۴ و ۶ برابر شده آورده شده است. با توجه به شکلهای (۲۳) تا (۲۶) دیده می شود که دامنه تغییر شکل موجی ایجاد شده در پوسته با اعوجاج بسیار بیشتر از دامنه تغییر شکل موجی در پوسته بدون اعوجاج است و به همین دلیل است که در پوسته بدون اعوجاج ترک ضخامتی ایجاد نگردیده است در حالیکه در پوسته با اعوجاج ترک ضخامتی ایجاد شده است. در پوسته با اعوجاج دامنه تغییر شکل موجی زیاد است و این باعث می شود که دو نقطه که در فاصله نسبتا کمی از هم قرار دارند یکی دچار تورفتگی شدید و دیگری دچار بیرون رفتگی شدید شود و این امر باعث بوجود آمدن ترکهای ضخامتی می شود.

چنانچه در شکلهای (۲۴) تا (۲۷) دیده می شود در بزرگنمایی اعوجاج ۱ و ۴ و ۶ تغییر شکل هر بزرگنمایی رفتار مستقل به خود را دارد. به عبارتی با زیادتر شدن اعوجاج تغییر شکلهای موجی اعوجاج کوچکتر تشدید یا کاهش پیدا نمی کنند بلکه رفتار مستقلی از خود نشان می دهند به همین دلیل است که مطابق شکلهای (۷) و (۸) و (۱۱) و (۱۳) نمودار ترکهای ضخامتی در هر ضریب بزرگنمایی اعوجاج مستقل عمل می کند. در تمام موارد پس از وارد شدن بار باد دیده می شود که ترکهای ضخامتی در زیر ناحیه فشاری بار باد بسته می شوند. در شکل (۲۸) تغییر شکل بار باد در اعوجاج با بزرگنمایی یک نشان داده شده است. علت بسته شدن ترکهای ضخامتی در این ناحیه به این علت است که تغییر شکل بار باد که بیشترین آن در زیر ناحیه فشاری بار باد ایجاد می شود چند برابر تغییر شکل بار ثقلی و حرارتی است. در نتیجه زیر ناحیه فشاری بار باد از دامنه تغییر شکلهای موجی کاسته می شود و این باعث می گردد تا ترکهای ضخامتی بسته شوند.

مقایسه ای بین نمودار ترکهای ضخامتی در برج با اعوجاج واقعی و اعوجاج ۴ برابر، شکلهای (۷) و (۸) و نمودار انحراف شعاعی برج در محل ترکهای ضخامتی انجام شده است. در حین ساخت برج خنک کننده در هر مقطع (مقطع مداری) انحراف

شعاعی نسبت به حالت طراحی برداشت می‌شود که اگر انحرافهای شعاعی را در هر مقطع مداری بر حسب زاویه مداری آن رسم شود نمودار انحراف شعاعی برج در آن تراز بدست می‌آید. برای نمونه نمودار انحراف شعاعی در گلوگاه برج (تراز ۸۱ متری) در شکل (۲۹) نشان داده شده است. در این شکل دو مکان تجمع ترکهای ضخامت برای اعوجاج ۴ برابر به عنوان نمونه آورده شده است. مقایسه مکان این ترکهای ضخامت با نمودار انحراف شعاعی برج نشان می‌دهد که ترکهای ضخامت در مکانهایی بوجود آمده‌اند که در یک ناحیه حداقل و حداکثر نسبی از انحرافهای شعاعی هستند و این دو نقطه حداقل و حداکثر نسبی در جهت مداری زاویه نسبتاً کمی با یکدیگر تشکیل داده‌اند که در شکل (۲۹) دیده می‌شود. البته مناطقی نیز وجود دارند که بین دو نقطه حداقل و حداکثر نسبی قرار داشته و در جهت مداری زاویه نسبتاً کمی نیز دارند ولی در محدوده آنها ترک ضخامت بوجود نیامده است که علت آن می‌تواند به عوامل زیادی بستگی داشته باشد از آن جمله می‌توان به عواملی چون انحراف شعاعی ترازهای بالاتر و پایینتر مقطع و ضریب بزرگنمایی اعوجاج و مطابق آنچه قبلاً توضیح داده شد، نحوه تغییر شکل مستقل برج در هر ضریب بزرگنمایی اعوجاج در بار ثقلی و حرارتی، اشاره نمود.

بررسی‌هایی که بر روی نقاط حداکثر و حداقل نسبی مجاور ناحیه ترکهای ضخامت انجام شد نتایج زیر را نشان می‌دهد:

- ۱- در جهت مداری زاویه بین نقاط حداکثر و حداقل نسبی مجاور ناحیه ترکهای ضخامت حدود ۱۰ تا ۲۰ درجه می‌باشد.
- ۲- تفاضل انحراف شعاعی نقاط حداکثر و حداقل نسبی مجاور ناحیه ترکهای ضخامت برای سازه با اعوجاج واقعی حدود ۱۷ - ۵ میلیمتر و برای اعوجاج ۴ برابر شده حدود ۶۸ - ۲۰ میلیمتر می‌باشد.

۱۲- بررسی تصحیح ضریب بارگذاری حرارتی برای جلوگیری از بوجود آمدن ترکهای

ضخامت

ترکیب بارگذاری معادله (۸) برای پوسته برج خنک کننده تعیین کننده است. در این ترکیب دیده می‌شود که بار حرارتی با ضریب ۰/۷۳۵ وارد ترکیب بارگذاری شده است. بطور کامل مشخص شده است که در ترکیب بار ثقلی و حرارتی موجهای مداری و نصف‌النهاری با دامنه زیاد باعث بوجود آمدن ترکهای ضخامت می‌باشند. در بررسی‌های فوق بار حرارتی با ضریب واحد بر روی سازه قرار داده شده است. بررسی نشان می‌دهد در اعوجاج واقعی و اعوجاجهای بزرگنمایی شده هرگاه بار حرارتی با ضریب ۰/۷۳۵ وارد شود باز هم در پایان بار ثقلی و حرارتی ترکهای ضخامت ایجاد می‌شوند ولی تعداد این ترکها کمتر می‌شود ولی به هر صورت برج موجود با چنین ترکیب بارگذاری دچار ترک ضخامت می‌شود.

در برج بدون اعوجاج، با اعوجاج واقعی و با اعوجاج ۳ و ۴ برابر شده، ضریب حد نهایی بار باد برابر ۱/۴ و در اعوجاج ۵ و ۶ برابر شده ضریب حد نهایی بار باد برابر ۱/۲ می‌باشد. از آنجا که ضریب ۱/۲ کمتر از مقدار پیشنهادی ضریب بار باد در این نا مه ACI (۰.۷۵×۱.۷ - رابطه (۸)) دارد، بنابراین این اعوجاج با ضریب بزرگنمایی ۴ برابر شده حد اعوجاج می‌باشد بررسی‌ها نشان می‌دهد در برج بدون اعوجاج، با اعوجاج واقعی و با اعوجاج ۳ و ۴ برابر شده هرگاه بار حرارتی با ضریب ۰/۵۹ قرار داده شود در پایان بار ثقلی و حرارتی ترک ضخامت ایجاد نمی‌شوند. بنابراین اختلاف بین ۰/۵۹ و ۰/۷۳۵ به مقدار ۰/۷۳۵ اضافه می‌شود. لذا بنظر می‌رسد اگر برقی با ترکیب زیر:

$$1.05D + 1.275W + 0.88T \quad (9)$$

طرح شود در آن ترک ضخامت ایجاد نمی‌گردد. اضافه بار فوق بهتر است با افزایش در ضخامت برج جبران گردد. با مرتب کردن رابطه (۹) و وارد نمودن بار زنده در آن داریم:

$$1.75(1.4D + 1.7L + 1.7W + 1.4 \times 0.838T) \quad (10)$$

با توجه به بررسیهای صورت گرفته بر روی برج خنک کن بتنی مورد مطالعه که از نظر ابعاد جزء برجهای متعارف و از نظر نوع اعوجاجها از نوع معمول می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در طراحی برجهای خنک کننده به جای رابطه (۷) از رابطه (۱۰) استفاده شود. با اینحال دستیابی به رابطه‌ای دقیقتر مستلزم مطالعات بیشتر بر روی برجهای ساخته شده مشابه برج مورد

۱۳- نتیجه گیری

پوسته برج خنک کننده دارای رفتار پوسته‌ای (غشایی و خمشی) است که این رفتار باعث ایجاد ترک‌هایی در صفحه المان می‌شود و به نظر می‌رسد که ترک‌های ضخامتی در آن ایجاد نمی‌گردد. در حالیکه استفاده از مدل سه بعدی بتن با قدرت ترک خوردگی در سه جهت دلخواه نشان می‌دهد که در پوسته اعوجاج یافته امکان بوجود آمدن ترک‌های ضخامتی می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، هرچند در برج مورد مطالعه اعوجاج در حد مجاز ۵ سانتیمتر می‌باشد ولی تحت بارگذاری ثقلی و حرارتی در برج اعوجاج یافته ترک ضخامتی ایجاد می‌شود و علت آن بوجود آمدن تغییر شکل موجی در جهت مداری و نصف‌النهاری با دامنه زیاد است. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که در اعوجاج با بزرگنمایی‌های مختلف با توجه به اینکه تغییر شکل پوسته در هر حالت بزرگنمایی اعوجاج رفتار مستقلی از خود نشان می‌دهد، در هر ضریب بزرگنمایی اعوجاج نمودار ترک‌های ضخامتی با یکدیگر فرق می‌نماید، ولی تعداد این ترک‌ها با افزایش اعوجاج زیادتر می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد پس از وارد شدن بار باد در برج با ضریب بزرگنمایی اعوجاج ۱ و ۳ و ۴ و ۵ ترک‌های ضخامتی در زیر ناحیه فشاری بار باد بسته می‌شود و بار باد خود باعث ایجاد ترک ضخامتی جدید نمی‌گردد ولی در برج با ضریب بزرگنمایی ۶ و بالاتر با اینکه ترک‌های ضخامتی در زیر ناحیه فشاری بار باد بسته می‌شود ولی خود بار باد باعث ایجاد ترک‌های ضخامتی جدید می‌گردد.

خطر بوجود آمدن ترک‌های ضخامتی در این است که هیچ ارماتوری برای مقابله با آن وجود ندارد، بنابراین اگر مقدار تجمع آنها در یک ناحیه زیاد شود باعث صدمه زدن به برج می‌شود از این رو با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی برج مورد مطالعه که از نظر ابعاد جزء برج‌های متداول و از نظر نوع اعوجاج‌های ایجاد شده در آن در حین اجرا، جزء برج‌های معمول می‌باشد دو راه حل پیشنهاد می‌شود:

۱- از تجمع ترک‌های ضخامتی در یک ناحیه جلوگیری شود برای این منظور در هر مقطع ساخته شده از برج رعایت دو نکته الزامی است

الف - زاویه بین دو نقطه حداکثر و حداقل نسبی متوالی در انحراف‌های شعاعی در هر مقطع مداری نباید از ۱۵ درجه کمتر شود.

ب - در هر مقطع مداری تفاضل انحراف‌های شعاعی بین دو نقطه حداکثر و حداقل نسبی متوالی نباید از ۵ سانتیمتر بیشتر باشد.

۲- با اصلاح رابطه طراحی از ایجاد ترک‌های ضخامتی جلوگیری شود به عبارت دیگر بجای استفاده از رابطه (۷) از رابطه (۱۰) در طراحی برج‌های خنک کن بتنی استفاده گردد.

فهرست علائم

فاکتور توزیع فشار باد در جهت مداری = $C_p(\theta)$

بار مرده = D

ماتریس مصالح کلی المان = $[D]$

ماتریس مصالح بتن = $[D_c]$

ماتریس مصالح آرماتور = $[D_r]$

بردار نیروی گرهی در پله بارگذاری = F^a

بردار نیروی گرهی ایجاد شده در المان در تکرار i = F_{i+1}^{nr}

ارتفاع از سطح زمین = H

بار زنده = L

تعداد جهت‌های آرماتور = N_r

توزیع عمودی فشار = $q_E(z)$

توزیع فشار عمودی مبنای استاتیکی = $q_0(z)$

R = شعع پوسته در یک مقطع افقی =

T = بار حرارتی =

V_i^R = نسبت حجم آرماتور در جهت I نسبت به حجم المان =

W = بار باد =

زیر نویس ها

- 1-Smeared crack
- 2-Solid
- 3-shell

مراجع

- [1] K.O. Kemp & J. G. A. croll: "The role of geometric imperfections in the collapse of a cooling tower" The Structural Engineer, January 1976, No.1, Volume 54
- [2] T. Hara & S.Kato & P.L. Gould: " 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] C.K. choi & H.C. Noh: " Analysis of geometrically imperfect cooling tower shell considering the effect of tension stiffening of concrete"- Natural draught cooling tower, wittek & Kratzig, 1996 -PP. 141
- [4] S. Gopalakrishnan & K. Ramanjaneyulu & T.V.S. R, AppaRao : "Studies on inelastic behavior of Perfect and imperfect cooling tower shells"- Natural draught cooling tower, wittek & Kratzig, 1996 - PP.173
- [5] M.N.Viladkar & P.N.Godbole & A.Tankha: "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 design of cooling towers - VGB- R610 ve - Edition 1990
- [8] Reinforced concrete cooling tower shells practice and commentary - ACI 334.2R - 91

