دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد عمران

گرایش مهندسی زلزله

عنوان:

بررسی نشست غیریکنواخت در برج‌های خنک‌کننده‌ی فولادی تحت اثر بارهای باد و ثقلی

اساتید راهنما:

دکتر سعید صبوری قمی

مهندس اکبر خلیفه لو

دانشجو:

سعید مومنی

شماره دانشجویی:

۸۹۰۴۳۱۴

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

نشست غیریکنواخت تکیه‌گاهی در سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که نشست ناهمگون باعث ایجاد نیروهای اضافی در سازه شده و در نتیجه سازه باید قادر به تحمل نیروهای اضافی به وجود آمده در اثر این نوع نشست باشد. در سازه‌های بزرگ مانند برج‌های خنک کننده، مسألهٔ نشست غیریکنواخت اهمیت بیشتری می‌یابد، زیرا به دلیل بزرگی ابعاد پی، امکان تغییرات جنس خاک زیر پی نیز بیشتر می‌شود و این مسأله خود موجب بروز نشست غیریکنواخت در برج‌های خنک کننده می‌گردد. همچنین به دلیل ارتفاع قابل ملاحظهٔ این نوع سازه‌ها، نیروی باد به عنوان یک بارگذاری مهم محسوب شده که باعث به وجود آمدن نیروهای متفاوت در ستون‌ها و در نتیجه نشست غیریکنواخت می‌شود.

هدف این پروژه بررسی رفتار برج خنک کنندهٔ فولادی تحت بارهای وارده و همچنین نشست غیریکنواخت تکیه‌گاهی می‌باشد. بدین منظور ابتدا یک برج خنک کنندهٔ فولادی موجود در تحقیقات گذشته با روش اجزاء محدود مدلسازی شد و نشست غیریکنواخت تکیه‌گاهی با استفاده از یک مدل ریاضی به همراه دیگر بارگذاری‌ها به برج اعمال گردید. سپس رفتار برج تحت بارهای وارده در حالت غیر خطی استاتیکی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

نتایج تحلیل نشان داد، رفتار این برج خنک کنندهٔ فولادی در برابر بارهای ثقلی و بار باد، رفتار الاستیکی خواهد بود اما در صورت بروز نشست غیریکنواخت تکیه‌گاهی، اعضای ترازهای پایینی این برج وارد محدودهٔ پلاستیک شده و در نهایت موجب تخریب کلی این برج خواهد شد.

کلمات کلیدی: برج خنک کنندهٔ فولادی، نشست غیریکنواخت تکیه‌گاهی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر برج خنک‌کننده ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ برج‌های خنک‌کننده طبیعی ۳

۱-۳ انواع برج‌های خنک‌کننده طبیعی ۴

فصل دوم: تحقیقات گذشته در مورد نشست تکیه‌گاهی برج‌های خنک‌کننده ۶

۲-۱ نشست خاک ۷

۲-۲ نشست برج‌های خنک‌کننده ۹

۲-۳ هدف از انجام پروژه ۳۰

فصل سوم: برج‌های خنک‌کننده‌ی فولادی ۳۳

۳-۱ مقدمه ۳۳

۳-۲ قسمت‌های مختلف برج خنک‌کننده فولادی ۳۳

۳-۲-۱ فونداسیون ۳۳

۳-۲-۲ سازه‌ی فضاکار اصلی برج خنک‌کننده ۳۴

۳-۲-۳ حلقه سخت کننده ۳۵

۳-۲-۴ پوسته‌ی برج ۳۶

۳-۳ برج‌های خنک‌کننده فولادی ساخته شده ۳۸

۳-۳-۱ مقدمه ۳۸

۳-۳-۲ برج‌های خنک‌کننده فلزی نیروگاه ارمنستان ۳۸

۳-۳-۳ برج‌های خنک‌کننده فلزی نیروگاه شهید منتظری اصفهان ۴۰

۳-۳-۴ برج‌های خنک‌کننده فلزی نیروگاه شهید رجایی قزوین ۴۱

۳-۳-۵ برج‌های خنک‌کننده فلزی نیروگاه جهرم ۴۲

فصل چهارم: معرفی و مدلسازی برج خنک‌کننده‌ی مورد مطالعه ۴۴

۴-۱ معرفی مدل ۴۵

۴-۲ کمانش در اعضای فشاری ۴۷

۴-۳ مدلسازی و تحلیل ۵۲

۴-۳-۱ روش اجزاء محدود ۵۲

۴-۳-۲ مدلسازی در نرم‌افزار ۵۳

فصل پنجم: تحلیل برج خنک‌کننده تحت بار ثقلی، نشست تکیه‌گاهی و بار باد ۵۵

۵-۱ مقدمه ۵۶

۵-۲ بار ثقلی: ۵۶

۵-۲-۱ بار مرده ۵۶

۵-۲-۲ بار زنده ۵۶

۵-۲-۳ بار یخ ۵۷

۵-۲-۴ رفتار برج خنک‌کننده تحت بارهای ثقلی ۵۷

۵-۳ بار نشست: ۵۹

۵-۴ بار باد: ۸۴

۵-۵ نتایج برج خنک‌کننده تحت ترکیب بارهای ثقلی، نشست و باد ۹۳

فصل ششم: نتیجه‌گیری و موارد قابل بررسی در تحقیقات آینده ۹۷

۶-۱ نتیجه‌گیری ۹۸

۶-۲ موارد قابل بررسی در تحقیقات آینده ۹۹

مراجع: ۱۰۰

فهرست اشکال، نمودارها و جداول

شکل ۱-۱: نمای برج خنک‌کننده‌ی بتنی (راست) و فلزی (چپ) ۵
شکل ۲-۱: هندسه‌ی کلی یک برج خنک‌کننده هیپربولیک ۱۲
شکل ۲-۲: مدل نشست ستون‌ها ۱۲
شکل ۲-۳: تعادل پوسته‌ی برج ۱۲
شکل ۲-۴: تغییرات نیروی نصف‌النهاری در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۳
شکل ۲-۵: تغییرات نیروی محوری محیطی در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۴
شکل ۲-۶: ممان خمشی نصف‌النهاری در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۴
شکل ۲-۷: ممان خمشی محیطی در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۵
شکل ۲-۸: مقادیر اندازه‌گیری شده نشست پی ۱۵
شکل ۲-۹: هندسه‌ی برج خنک‌کننده‌ی مدل شده توسط کریشنا ۱۸
شکل ۲-۱۰: ابعاد شبکه المان استفاده شده برای پوسته برای حالت پایه صلب ۱۹
شکل ۲-۱۱: ابعاد شبکه المان استفاده شده برای پوسته برای حالت پایه انعطاف‌پذیر ۱۹
شکل ۲-۱۲: مقایسه‌ی نتایج نیروهای نصف‌النهاری با نتایج "وندا" ۲۰
شکل ۲-۱۳: مقایسه‌ی نتایج نیروهای محیطی با نتایج "وندا" ۲۰
شکل ۲-۱۴: نیروهای به وجود آمده در ستون‌ها و مقایسه با نتایج "گولد" ۲۰
شکل ۲-۱۵: هندسه‌ی برج خنک‌کننده‌ی "می‌سی‌سی‌پی" ۲۲
شکل ۲-۱۶: شبکه‌ی المان‌بندی شده برج خنک‌کننده‌ی "می‌سی‌سی‌پی" ۲۲
شکل ۲-۱۷: نیروهای نصف‌النهاری در ارتفاع برج خنک‌کننده "می‌سی‌سی‌پی" در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0$ ۲۳
شکل ۲-۱۸: نیروهای محیطی در ارتفاع برج خنک‌کننده "می‌سی‌سی‌پی" در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0°$ ۲۳
شکل ۲-۱۹: نیروهای به دست آمده در ارتفاع برج خنک‌کننده "می‌سی‌سی‌پی" در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0°$ ۲۳
شکل ۲-۲۰: لنگرهای به دست آمده در ارتفاع برج خنک‌کننده "می‌سی‌سی‌پی" در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0°$ ۲۴
شکل ۲-۲۱: نیروهای نصف‌النهاری در لبه‌ی پایینی پوسته بین دو ستون اول و دوم ۲۴
شکل ۲-۲۲: نیروهای به دست آمده در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۰۵متری در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0°$ ۲۵
شکل ۲-۲۳: لنگرهای به دست آمده در ارتفاع برج خنک‌کننده ۱۰۵متری در اثر بار مرده در امتداد زاویه‌ی $\theta=0°$ ۲۵
شکل ۲-۲۴: هندسه‌ی برج خنک‌کننده‌ی مورد مطالعه‌ی "کاتو" و "چیپا" ۲۸

شکل ۳-۱: شبکه دوار فلزی اسکلت برج خنک کن با اعضاء خرپایی ۳۵
شکل ۳-۲: شبکه دوار فلزی اسکلت برج خنک کن با اعضاء لوله‌ای ۳۵
شکل ۳-۳: حلقه سخت کننده در برج فلزی ۳۶
شکل ۳-۴: پوشش آلومینیومی سازه‌ی برج خنک‌کننده ۳۷
شکل ۳-۵: اتصال پوشش آلومینیومی به سازه اصلی توسط لاپه‌ها ۳۷
شکل ۳-۶: برج خنک‌کننده فولادی ساخته شده در ارمنستان ۳۹
شکل ۳-۷: برج خنک‌کننده فلزی نیروگاه اصفهان ۴۰
شکل ۳-۸: برج‌های خنک کن فلزی نیروگاه قزوین ۴۲
شکل ۳-۹: مدل برج خنک کن فولادی نیروگاه جهرم ۴۳
شکل ۳-۱۰: اسکلت فولادی برج خنک کن فولادی نیروگاه جهرم ۴۳
شکل۴-۱: هندسهٔ برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۴۶
جدول ۴-۱: مشخصات مقاطع برج خنک‌کننده‌ی مورد مطالعه ۴۷
شکل ۴-۴: نمودار بار کمانشی و طول مؤثر برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف ۴۸
جدول ۴-۲: مقادیر تنش کمانشی تیرها در برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۴۹
جدول ۴-۳: مقادیر تنش کمانشی ستون‌ها در برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۵۰
جدول ۴-۴: مقادیر تنش کمانشی مهاربندها در برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۵۱
شکل۴-۵: نمودار تنش-کرنش فولاد به کار رفته در برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۵۳
شکل۴-۶: مقطع FIBER SECTION مدل شده در برج خنک‌کنندهٔ مورد مطالعه ۵۴
شکل ۵-۱: تنش ستون‌ها تحت بار ثقلی ۵۸
شکل ۵-۲: تنش مهاربندها تحت بار ثقلی ۵۸
شکل ۵-۳: تنش تیرها تحت بار ثقلی ۵۹
شکل ۵-۴: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود دوم ۶۳
شکل ۵-۵: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود دوم ۶۳
شکل ۵-۶: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود دوم ۶۳
شکل ۵-۷: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود سوم ۶۴
شکل ۵-۸: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود سوم ۶۴

شکل ۵-۹: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود سوم ۶۴
شکل ۵-۱۰: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مودچهارم ۶۵
شکل ۵-۱۱: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مودچهارم ۶۵
شکل ۵-۱۲: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود چهارم ۶۵
شکل ۵-۱۳: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود پنجم ۶۶
شکل ۵-۱۴: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود پنجم ۶۶
شکل ۵-۱۵: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود پنجم ۶۶
شکل ۵-۱۶: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود ششم ۶۷
شکل ۵-۱۷: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود ششم ۶۷
شکل ۵-۱۸: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود ششم ۶۷
شکل ۵-۱۹: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود هفتم ۶۸
شکل ۵-۲۰: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود هفتم ۶۸
شکل ۵-۲۱: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود هفتم ۶۸
شکل ۵-۲۲: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود هشتم ۶۹
شکل ۵-۲۳: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود هشتم ۶۹
شکل ۵-۲۴: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود هشتم ۶۹
شکل ۵-۲۵: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود نهم ۷۰
شکل ۵-۲۶: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود نهم ۷۰
شکل ۵-۲۷: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود نهم ۷۰
شکل ۵-۲۸: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود دهم ۷۱
شکل ۵-۲۹: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود دهم ۷۱
شکل ۵-۳۰: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود دهم ۷۱
شکل ۵-۳۱: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود یازدهم ۷۲
شکل ۵-۳۲: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کنننده پس از اعمال نشست در مود یازدهم ۷۲
شکل ۵-۳۳: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود یازدهم ۷۲
شکل ۵-۳۴: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود دوازدهم ۷۳

شکل ۵-۳۵: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود دوازدهم ۷۳
شکل ۵-۳۶: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود دوازدهم ۷۳
شکل ۵-۳۷: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود سیزدهم ۷۴
شکل ۵-۳۸: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود سیزدهم ۷۴
شکل ۵-۳۹: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود سیزدهم ۷۴
شکل ۵-۴۰: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود چهاردهم ۷۵
شکل ۵-۴۱: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود چهاردهم ۷۵
شکل ۵-۴۲: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود چهاردهم ۷۵
شکل ۵-۴۳: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود پانزدهم ۷۶
شکل ۵-۴۴: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود پانزدهم ۷۶
شکل ۵-۴۵: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود پانزدهم ۷۶
شکل ۵-۴۶: نشست غیریکنواخت اعمال شده به تکیه‌گاه برج خنک کننده در مود شانزدهم ۷۷
شکل ۵-۴۷: تغییر شکل تکیه گاه برج خنک کننده پس از اعمال نشست در مود شانزدهم ۷۷
شکل ۵-۴۸: تنش محوری اعضاء تحت بار نشست تکیه گاهی در مود شانزدهم ۷۷
شکل ۵-۴۹: تنش محوری تیرها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوم تا ششم ۷۸
شکل ۵-۵۰: تنش محوری تیرها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای هفتم تا یازدهم ۷۹
شکل ۵-۵۱: تنش محوری تیرها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوازدهم تا شانزدهم ۷۹
شکل ۵-۵۲: تنش محوری مهاربندها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوم تا ششم ۸۰
شکل ۵-۵۳: تنش محوری مهاربندها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای هفتم تا یازدهم ۸۱
شکل ۵-۵۴: تنش محوری مهاربندها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوازدهم تا شانزدهم ۸۱
شکل ۵-۵۵: تنش محوری ستونها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوم تا ششم ۸۲
شکل ۵-۵۶: تنش محوری ستونها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای هفتم تا یازدهم ۸۳
شکل ۵-۵۷: تنش محوری ستونها تحت بار نشست تکیه گاهی در مودهای دوازدهم تا شانزدهم ۸۳
شکل ۵-۵۸: مقادیر ضریب بزرگنمایی دینامیکی بر اساس دستورالعمل VGB برای برجهای خنک‌کننده بتنی ۸۵
شکل ۵-۵۹: منحنی‌های توزیع فشار بعنوان تابعی از زبری سطح ۸۶
شکل ۵-۶۰: مقدار $Cp(\theta)$ طبق دستورالعمل VGB ۸۷

جدول ۵-۱: تابع منحنی فشار $Cp(\theta)$ ۸۷

شکل ۵-۶۱: توزیع بار باد در پلان و ارتفاع ۸۸

شکل ۵-۶۲: نمای پلان تغییر شکل برج خنک‌کننده تحت بار باد ۸۹

شکل ۵-۶۳: نمای سه بعدی تغییر شکل برج خنک‌کننده تحت بار باد ۹۰

شکل ۵-۶۴: تنش محوری تیرها تحت بار باد ۹۱

شکل ۵-۶۵: تنش محوری مهاربندها تحت بار باد ۹۱

شکل ۵-۶۶: تنش محوری ستونها تحت بار باد ۹۲

شکل ۵-۶۷: تغییر مکان جانبی برج خنک‌کننده تحت اثر ترکیب بارهای وارده ۹۳

شکل ۵-۶۸: تنش محوری تیرها تحت ترکیب بارها برای ضرایب بزرگنمایی بار مختلف ۹۴

شکل ۵-۶۹: تنش محوری مهاربندها تحت ترکیب بارها برای ضرایب بزرگنمایی بار مختلف ۹۵

شکل ۵-۷۰: تنش محوری ستونها تحت ترکیب بارها برای ضرایب بزرگنمایی بار مختلف ۹۵

فصل اول

مقدمه‌ای بر برج خنک‌کننده

۱-۱ مقدمه

برج‌های خنک‌کننده از عظیم‌ترین سازه‌های ساخته شده به دست بشر به شمار می‌روند و به خاطر مسائل خاص در آنالیز و طراحی همواره مورد توجه محققین و مهندسان طراح بوده است. برج‌های خنک‌کننده علاوه بر اهمیت سازه‌ای در زمینه عملکرد، دارای تعریف مهمی نیز در مبحث مکانیک سیالات می باشند مهندسان و محققان سازه برای ارائه طراحی بهتر در این زمینه ناگزیر به دانستن آن هستند .

در اکثر صنایع عظیم امروزی مانند: صنایع پتروشیمی، پالایشگاه‌ها، کارخانجات فولادسازی، صنایع پلاستیک و از همه مهم‌تر در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق، برای جلوگیری از بالا رفتن دمای قسمت‌های مختلف کارخانه، باید گرمای حاصل از عملکرد ماشین‌ها و موتورها، به نحوی مناسب از سیستم گرفته شده و به محیط خارج منتقل می گردد.

یک مثال بارز در این مورد، نیاز به سرمایش در نیروگاه‌های بخاری است. در این نیروگاه‌ها از طریق اختلاف فشار بخار آب بین دو منبع گرم و سرد توربین به حرکت در می‌آید و نیروی برق تولید می‌گردد. از آنجا که میزان بخار آب مصرفی در این پروسه بسیار بالاست لازم است این بخارها مجدداً به آب تبدیل شده و مورد استفاده قرار گیرند و همچنین با تقطیر بخار آب فشار منبع سرد کاهش یابد. لذا چنانچه این بخار گرم با آب سرد در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، گرمای بخار گرفته شده و به آب تبدیل می‌گردد اما از طرف دیگر گرمای منتقله از بخار به آب سرد، باعث بالا رفتن دمای آب سرد می‌شود. برای ادامه روند فوق مجدداً به آب سرد نیاز خواهد بود .

در صنایع بزرگ چه سرمایش به صورت طبیعی و چه به صورت مکانیکی انجام شود، چون میزان گرمای تولید شده بسیار بالاست، مناسب خواهد بود که برای تبادل گرما، سیستم‌های بزرگ با بازده هرچه بیشتر، طراحی و مورد استفاده قرار گیرند. آنچه در اکثر صنایع گوناگون و عظیم صنعتی امروز برای دستیابی به منظور فوق رونق یافته و مورد استفاده جهانی است، برج‌های خنک‌کننده می‌باشد .

برج خنک‌کننده عبارتست از یک ساختمان بتنی یا فلزی یا چوبی، با شکل و ترکیب خاص که برای سرمایش آب گرم به صورت طبیعی یا مکانیکی طراحی و ساخته شده است. طبعاً ابعاد و شکل این ساختمان تابعی است از میزان تبادل گرمای مورد نیاز و همچنین مکانیزم سرمایش. در این ساختمان آب گرم به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم در تماس با جریان هوای سرد یا در تماس با آب سرد قرار گرفته، گرمای آن به هوای سرد منتقل شده و برای مصرف بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد .

۱-۲ برج‌های خنک‌کننده طبیعی

این نوع برجها ساختمان‌هایی مرتفع، به صورت استوانه ای یا مخروط ناقص و یا هیپربولیک هستند که از پوسته‌های فلزی و یا بتن مسلح معمولی یا بتن مسلح پیش تنیده ساخته شده‌اند. اساس کار این برجها عبارتست از استفاده از قانون فیزیکی حاکم در دودکش‌ها، یعنی : جریان یافتن هوا از ناحیه پرفشار به ناحیه کم فشار.

مکانیزم کار این برجها به شرح زیر است:

آب گرم از قسمت‌های پایین این برجها، در سیستم‌های باز یا بسته به جریان در آمده و مقداری از گرمای آن به هوای مجاور منتقل شده، باعث گرم شدن و در نتیجه سبک شدن هوا می‌گردد. هوای گرم در اثر سبکی وزن به ارتفاعات بالاتر در داخل برج منتقل می شود و این چرخه دائماً تکرار می شود. قسمت‌های پایین ساختمان این برج در سطح جانبی باز است و در این قسمت‌ها تنها ستون‌های برج قرار دارند .

میزان جریان هوای برقرار شده در سیستم فوق از یک طرف به اختلاف فشار در بالا و پایین برج و از طرف دیگر به سطح مقطع ورودی برج بستگی دارد. برای ایجاد اختلاف فشار در بالا و پایین برج بایستی ارتفاع آن را افزایش داد و برای ازدیاد سطح مقطع برج بایستی قطر پایه را اضافه نمود. به این

ترتیب با تغییر دادن دو پارامتر فوق می توان ظرفیت سرمایشی برج را متناسب با نیاز کارخانه تغییر داد .

معمولاً در برج‌های امروزی نسبت قطر پایه به ارتفاع برج حدود ۰/۸ است و نسبت قطر گلوگاه به قطر پایه در برج‌های هیپربولیک حدود ۰/۶ و نسبت ارتفاع گلوگاه به ارتفاع کل برج حدود ۰/۸۵ است .

به طور کلی با افزایش ارتفاع و قطر پایه برج خنک‌کننده طبیعی کارایی آن بالا می‌رود و ظرفیت سرمایشی آن افزایش می‌یابد اما نسبت افزایش قیمت ساخت برج به مراتب کمتر از راندمان برج است و به همین جهت است که امروزه ساخت برج‌های عظیم بسیار اقتصادی تر از انواع کوچک آن می‌باشد .[۲۲]

۱-۳ انواع برج‌های خنک‌کننده طبیعی

برج‌های خنک‌کننده ساخته شده در دنیا به طور کلی به دو دسته‌ی بتنی و فلزی تقسیم می‌شوند. از نظر ترمودینامیکی هندسه‌ی بهینه برای برج‌های خنک‌کننده، از نوع هیپربولیک می‌باشد. استفاده از مصالح بتن در ساخت برج‌های خنک کن هیپربولیکی بسیار متداول میباشد چرا که قالب‌گذاری ساده به جهت استفاده از قالب‌های لغزنده و یا بالا رونده اجرای این شکل هیپربولیک را آسان کرده است، در مقابل با توجه به فن آوری پیچیده‌تر اجرای برج‌های خنک‌کننده فولادی نسبت به بتنی سالیان متمادی است امکان اجرای هندسه‌ی هیپربولیک نوع فولادی آن همیشه با تردید همراه بوده است. از لحاظ عامل هزینه و زمان با توجه به طولانی و پر هزینه بودن ساخت برج‌های خنک‌کننده بتنی، انواع فلزی آنها به دلیل قابلیت پیش‌سازه‌ای در اولویت قرار دارد. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که برج‌های خنک‌کننده‌ی بتنی به علت وزن بیشتر نسبت به برج‌های خنک‌کننده‌ی فولادی (حدود ۵ برابر) در مقابل زلزله آسیب‌پذیرتر می‌باشند.

با توجه به مقایسه‌ی انجام شده بین برج‌های خنک‌کننده‌ی فولادی و بتنی و همچنین زلزله‌خیز بودن کشور ما و نیازبه احداث نیروگاههای بیشتر، انجام مطالعات لازم به منظور کسب آگاهی هرچه بیشتر پیرامون برج‌های خنک‌کننده فلزی، ضروری به نظر می‌رسد.

شکل ۱-۱: نمای برج خنک‌کننده‌ی بتنی (راست) و فلزی (چپ) [۱۴]

یکی از حوادث مهم در تاریخ ساخت برج‌های خنک کن، در طوفان اول نوامبر ۱۹۶۵ ، در یک گروه۸ تایی برج‌های نیروگاه فری‌بریج انگستان اتفاق افتاد، که در آن سه برج خنک کن تخریب و ۵ دستگاه دیگر سالم باقی ماندند. این حادثه موجب انجام تحقیقات جدیدتری در این زمینه گردید.[۱۴]

فصل دوم

تحقیقات گذشته در مورد نشست تکیه گاهی برج های خنک کننده

۲-۱ نشست خاک

هنگامی که روی خاک بارگذاری صورت می‌گیرد خاک تغییر شکل می‌دهد یا به عبارت دیگر نشست می‌کند. نشست خاک شامل دو قسمت است. قسمت اول ناشی از تغییر حجم کلی دانه‌ها (تغییر حجم خاک در اثر عواملی نظیر تراکم و فشرده شدن) و قسمت دوم ناشی از تغییر شکل خود دانه‌ها (جمع شدگی اسکلت خاک). به کمک روابط ارائه شده در مکانیک خاک، نشست خاک تحت اثر نیروهای وارده در نقاط مختلف قابل محاسبه است. [۱۶]

اگر خاک زیر پی یک سازه به طور یکسان دچار اندکی نشست شود و یا مجموعه‌ی سازه و پی به صورت یک جسم صلب دوران نماید، این امر موجب ایجاد تنش‌های جدید در سازه نخواهد شد. اما نشست غیریکنواخت نقاط مختلف پی می‌تواند تنش قابل ملاحظه‌ای را هم در خود پی و هم در سازه ایجاد نماید. در نتیجه، نشست غیریکنواخت به عنوان یک عامل بارگذاری سازه محسوب می‌گردد. بدین لحاظ در آیین‌نامه‌های مختلف طراحی سازه‌ها، برای در نظر گرفتن نیروهای متناظر با نشست غیریکنواخت سازه و ترکیب آن با سایر عوامل بارگذاری، ضرایبی در نظر گرفته شده است. بدیهی است مقدار نشست غیریکنواخت در پی‌های منفرد به دلیل استقلال هر پی، بیشتر از انواع پی‌های یکپارچه است.

تجربیات و آزمایشات مختلف ثابت کرده است هر قدر مقدار نشست یکنواخت بیشتر باشد، اختلاف نشست در نقاط مختلف پی نیز بیشتر خواهد بود به گونه‌ای که بین نشست یکنواخت و اختلاف نشست رابطه‌هایی پیشنهاد شده است. به طور کلی می‌توان گفت: مقدار نشست کل در خاک‌های ماسه‌ای کمتر از خاک‌های رسی می‌باشد. همچنین اختلاف نشست در خاک‌های ماسه‌ای تقریباً برابر با نشست حداکثر است ولی در خاک‌های رسی، این اختلاف نشست بسیار کوچکتر از نشست حداکثر می‌باشد. [۱۹]

در تعیین میزان نشست غیریکنواخت سازه علاوه بر خواص خاک و مشخصات پی، صلبیت خود سازه نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. از این نظر سازه‌ها را می‌توان به رده‌های مطلقاً انعطاف‌پذیر، عملاً انعطاف‌پذیر، عملاً صلب و مطلقاً صلب تقسیم کرد. [۲۰]

الف- سازه‌های مطلقاً انعطاف‌پذیر:

سازه‌هایی هستند که نسبت به تغییر شکل‌های ایجاد شده در هر نقطه‌ای از پی انعطاف‌پذیر بوده و از این نشسست‌ها تبعیت می‌کنند. در این نوع سازه‌ها نشست غیریکنواخت مشکلی ایجاد نمی‌کند. سدهای خاکی از این نوع سازه‌ها به شمار می‌آیند.

ب- سازه‌های مطلقاً صلب:

سازه‌هایی هستند که در مواجهه با بارهای با توزیع متقارن و خاک بستر یکنواخت، دچار نشست یکنواخت می‌گردند. این سازه‌ها خود را با تغییر شکل‌های خاک وفق می‌دهند. دودکش‌های کارخانجات از جمله چنین سازه‌هایی به شمار می‌آیند.

ج- سازه‌های عملاً صلب:

چنین سازه‌هایی نمی‌توانند از هر حیث خود را با تغییر شکل‌های یکنواخت ایجاد شده در خاک وفق دهند و لذا در اعضای آن‌ها تنش‌های اضافی ایجاد خواهد شد. اکثر ساختمان‌های معمولی و سازه‌های مهندسی مانند پل‌ها، مخازن و سیلوها در این دسته قرار می‌گیرند.

د- سازه‌های عملاً انعطاف‌پذیر:

این نوع سازه‌ها بهتر می‌توانند خود را با تغییر شکل‌های خاک زیر پی وفق دهند. در این نوع سازه‌ها نیز تنش‌های اضافی ناشی از نشست غیریکنواخت پی به وجود می‌آید اما میزان این تنش‌ها نسبت به سازه‌های صلب کمتر است. ساختمان‌های یک‌طبقه با تیرهای پوششی مرکب از این نوع سازه‌ها به حساب می‌آیند.

با توجه به توزیع غیریکنواخت نشست پی و سختی سازه، پنج فرم ساده کلی سازه قابل پیش‌بینی است. این فرم‌ها به طور مختصر در زیر شرح داده می‌شوند: [۲۰]

الف- متمایل شدن سازه به یک سمت:

در این حالت سازه حول محور افقی خود می‌چرخد. این پدیده در اکثر سازه‌هایی که به طور نامتقارن بارگذاری شده باشد رخ می‌دهد.

این پدیده در سازه‌های مرتفع نظیر دودکش‌ها و ساختمان‌های بلند و لاغر بسیار خطرناک می‌باشد. در این حالت در سازه لنگرهای خمشی اضافی تولید خواهد شد.

ب و ج- خمیدگی سازه به سمت داخل و خارج:

این حالت در اثر کمانش یا خمش سازه رخ می‌دهد؛ تغییر شکل‌هایی از این نوع در کلیه‌ی ساختمان‌ها به ویژه ساختمان‌های بزرگ، به جز در سازه‌های با صلبیت زیاد، محتمل می‌باشد. در این حالت بعضی از قسمت‌های سازه دچار خمش به سمت بیرون و برخی دچار خمش به سمت داخل می‌گردند. در حالت خمش به سمت داخل ناحیه کنترل کشش در قسمت‌های پایینی سازه و در حالت خمش به سمت خارج منطقه کنترل کشش در نواحی فوقانی سازه واقع می‌گردد.

ه- کج شدن:

هر گاه سازه در طول نسبتاً کوتاهی از پی خود دچار مقدار نسبتاً زیادی نشست غیریکنواخت گردد در برخی از اعضای آن به علت تمایل به حفظ وضعیت اولیه، این تغییرشکل رخ می‌دهد.

و- پیچش:

زمانی رخ می‌دهد که سازه در طول خود به طور ناگهانی دچار انحراف شود. در اثر این نوع تغییرشکل در کلیه اعضای سازه نیروهای اضافی ایجاد خواهد شد.

۲-۲ نشست برج‌های خنک‌کننده

با افزایش ابعاد سازه، نشست غیر یکنواخت تکیه‌گاهی می‌تواند تأثیر عمده‌تری در توزیع نیروهای داخلی در اعضاء مختلف یک سازه داشته باشد و در بعضی موارد می‌تواند نقش

تعیین‌کننده‌ای ایفا کند، لذا بررسی این پدیده در سازه‌های بزرگ و مهم مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از سازه‌های عظیم مهندسی، برج‌های خنک‌کننده می‌باشند. این سازه‌ها دارای ابعاد بزرگی از نظر ارتفاع و قطر می‌باشند. قطر قاعده‌ی این برج‌ها معمولاً بیشتر از ۵۰ متر می‌باشد و لذا پی این برج‌ها که معمولاً به صورت حلقوی طراحی می‌شود دارای طول قابل توجهی است.

به دلیل عظیم بودن سازه‌ی برج خنک‌کننده و طولانی بودن پی، احتمال وقوع نشست غیریکنواخت زیاد است. عوامل متعددی می‌توانند موجب بروز این نشست شوند از جمله این عوامل عبارتنداز:

۱- به دلیل طول زیاد پی، جنس خاک زیر پی یکسان نبوده و این تغییرات در جنس خاک می‌تواند موجب عملکرد متفاوت خاک شود و نشست غیریکنواخت به وجود آید. [۸]

۲- وجود عواملی مانند باد و زلزله که باعث به وجود آمدن نیروهای نامساوی در ستون‌ها گردد که این امر خود موجب ایجاد تنش‌های متفاوت در خاک گردیده و باعث نشست غیریکنواخت می‌گردد. [۸]

۳- حفره‌ها و حفاری‌های زیرزمینی و همچنین تغییرات در سطح تراز آب‌های زیرزمینی می‌تواند موجب تغییرات تنش در خاک گردیده که این عامل خود موجب بروز نشست غیریکنواخت است.[۴]

نشست غیریکنواخت عامل به وجود آمدن نیروهای جدید در اعضاء است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تغییرات تنش‌ها تا عمق ۱۰ تا ۲۰ درصد ارتفاع برج نفوذ می‌کند که این امر خود در برج‌های بتنی باعث بروز ترک‌های بزرگ در پوسته شده و موجب خراب شدن برج می‌گردد.