



دانشکده علوم - گروه ژئوفیزیک

عنوان پایان نامه

## تحلیل لرزه‌ای برج خنک کننده‌ی نیروگاه حرارتی

سیدرضا حسینی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ژئوفیزیک - گرایش زلزله‌شناسی

سال ۱۳۹۱



دانشکده علوم - گروه ژئوفیزیک

عنوان پایان نامه

## تحلیل لرزه‌ای برج خنک کننده‌ی نیروگاه حرارتی

ارائه دهنده

سید رضا حسینی

استاد راهنما

دکتر احمد شوشتری

استاد مشاور

دکتر رضا خواجه‌جوی

سال انتشار ۱۳۹۱



## تحلیل لرزه‌ای برج خنک‌کننده‌ی نیروگاه حرارتی

### چکیده

اهمیت نیروی برق در کاهش خسارات و افزایش میزان کمک‌رسانی در لحظات و ساعات بعد از وقوع زمین‌لرزه، حفظ و نگهداری نیروگاه‌های تولید برق و همچنین خطوط توزیع و انتقال را ایجاب می‌نماید. برج خنک‌کننده بتنی یکی از اجزاء مهم در چرخه‌ی تولید برق در یک نیروگاه حرارتی به شمار می‌رود. از سوی دیگر، به دلیل ارتفاع بسیار زیاد آن، جزء دسته‌ی سازه‌های خاص قرار گرفته که نیازمند تحلیل‌های عددی و با دقت بالا می‌باشد. در این رساله، برج خنک‌کننده بتنی نیروگاه شریعتی مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل دینامیکی بار زلزله بر روی این برج، با استفاده از نرم‌افزار Abaqus صورت پذیرفته است. نتیجه‌ی محاسبات و مدل‌سازی‌ها نشان داده‌اند که به دلیل ارتفاع و وزن بسیار زیاد این سازه و همچنین ساخت متفاوت آن و پایه‌های X شکل، امکان خسارات احتمالی در پایه‌های برج بسیار محتمل است. از سوی دیگر، پوسته‌ی بتنی برج، در ترازهای گوناگون رفتار نسبتاً یکسانی را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** برج خنک‌کننده، بارگذاری لرزه‌ای، مدل‌سازی، نرم‌افزار Abaqus

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۶	جدول ۱-۲ مقادیر تابع $f(\xi)$ آ
۴۷	جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی مدل ماده تیر یک سرگیردار
۵۴	جدول ۱-۴ مشخصات عمومی برج خنک کننده نیروگاه شریعتی
۵۵	جدول ۲-۴ مشخصات مدل ماده‌ی بتن به کار رفته در پایه‌های X شکل
۵۵	جدول ۳-۴ مشخصات پلاستیسیته‌ی بتن
۵۷	جدول ۴-۴ مشخصات مدل ماده میلگرد مصرفی در پایه‌های X شکل
۶۵	جدول ۵-۴ مشخصات مدل ماده بتن مصرفی در پوسته‌ی برج خنک کننده
۶۵	جدول ۶-۴ مشخصات پلاستیسیته‌ی بتن مصرفی در قسمت پایین پوسته‌ی برج خنک کننده
۷۲	جدول ۷-۴ مدول الاستیسیته معادل به کار رفته در تحلیل نهایی
۷۴	جدول ۱-۵ مشخصات عمومی زلزله‌های بم و طبس

## فهرست نمودارها

صفحه	عنوان
۵۰	نمودار ۱-۳ تابع معادله‌ی حرکت $U(t) = 0.2\sin 5t$
۵۱	نمودار ۲-۳ مقایسه نمودارهای بار اعمالی و جابجایی حاصل شده از نرم افزار <i>Abaqus</i>
۵۱	نمودار ۳-۳ مقایسه نمودارهای بار اعمالی و جابجایی حاصل شده از محاسبات با نرم افزار <i>Mathematica</i>
۵۵	نمودار ۱-۴ نمودار تنش - کرنش تخریب پلاستیک برای بتن <i>X-leg</i> ها در فشار
۵۶	نمودار ۲-۴ نمودار تنش - کرنش ترک خوردگی برای بتن <i>X-leg</i> ها تحت کشش
۵۸	نمودار ۳-۴ نمودار تنش - کرنش پلاستیک میلگرد در پایه های <i>X</i> شکل
۶۳	نمودار ۴-۴ میزان جابجایی پایه در تحلیل با میلگرد در زمان ۲ ثانیه
۶۳	نمودار ۵-۴ میزان جابجایی پایه در تحلیل بدون میلگرد و در زمان ۲ ثانیه
۶۶	نمودار ۶-۴ تنش - کرنش تخریب پلاستیک بتن پوسته در فشار
۶۶	نمودار ۷-۴ تنش - کرنش ترک خوردگی بتن پوسته تحت کشش

۶۷	نمودار ۴-۸	میزان جابجایی قسمت پایین پوسته‌ی بتنی همراه با میلگرد در زمان ۱ ثانیه
۶۸	نمودار ۴-۹	میزان جابجایی قسمت پایین پوسته‌ی بتنی بدون میلگرد در زمان ۱ ثانیه
۶۹	نمودار ۴-۱۰	میزان جابجایی قسمت پائین پوسته‌ی بتنی با میلگرد با المان <i>shell</i>
۷۰	نمودار ۴-۱۱	میزان جابجایی قسمت پائین پوسته‌ی بتنی بدون میلگرد با المان <i>shell</i>
۷۱	نمودار ۴-۱۲	میزان جابجایی قسمت بالایی پوسته‌ی بتنی با میلگرد
۷۲	نمودار ۴-۱۳	میزان جابجایی قسمت بالایی پوسته‌ی بتنی بدون میلگرد
۷۸	نمودار ۵-۱	جابجایی مربوط به زلزله بم- راستای X-Y برج- ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری.
۷۸	نمودار ۵-۲	جابجایی های مربوط به زلزله بم- راستای Y-Z برج- ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری.
۷۹	نمودار ۵-۳	جابجایی مربوط به زلزله بم با 0.4g. راستای Y-Z برج. ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری
۸۰	نمودار ۵-۴	جابجایی مربوط به زلزله طیس = راستای X-Y برج- ترازهای: بالای پوسته، تراز ۱۹ و ۱۰ متری.
۸۰	نمودار ۵-۵	جابجایی مربوط به زلزله طیس = راستای Y-Z برج- ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری.
۸۱	نمودار ۵-۶	جابجایی مربوط به زلزله طیس 0.4g- راستای X-Y برج. ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری
۸۱	نمودار ۵-۷	جابجایی مربوط به زلزله طیس 0.4g- راستای Y-Z برج. ترازهای: بالای پوسته، ۱۹ و ۱۰ متری.

## فهرست شکل‌ها

۴	شکل ۱-۱ نمودار یک نیروگاه حرارتی با سوخت زغال سنگ
۸	شکل ۱-۲ اولین برج خنک کننده بتنی ساخته شده توسط "فردریک ون ایترسون" و "جرارد کویپرز"
۹	شکل ۲-۲ برج خنک کن هذلولوی
۱۰	شکل ۳-۲ هذلولوی دورانی
۱۳	شکل ۴-۲ مشخصات هندسی هذلولوی
۱۹	شکل ۵-۲ معرفی متغیر ابعادی مقطع پایه
۲۰	شکل ۶-۲ منحنی های نیرو - تغییر مکان به ازای مقادیر مختلف عرض مقطع پایه (B)
۲۱	شکل ۷-۲ اختلاف اساسی بین بارهای استاتیکی و دینامیکی؛ : (الف) بارگذاری استاتیکی، (ب) بارگذاری دینامیکی
۲۳	شکل ۸-۲ دو تا از مختصات تیر در حالت المان محدود
۲۹	شکل ۹-۲ پاسخ طیفی و شتاب تاریخچه زمانی زلزله السنترو
۳۶	شکل ۱-۳ المان پیوسته
۳۶	شکل ۲-۳ المان پوسته
۳۷	شکل ۳-۳ انواع المان های تیر
۴۰	شکل ۴-۳ جزء C3D8 که در تحلیل سازه ی بتنی مورد استفاده قرار گرفته است.
۴۱	شکل ۵-۳ جزء B31 که برای مدل سازی آرماتور به کار می رود.
۴۱	شکل ۶-۳ جزء S4R که برای مدل سازی پوسته به کار می رود.
۴۳	شکل ۷-۳ تفکیک کرنش کل به کرنش های الاستیک و پلاستیک در حالت فشاری بتن
۴۴	شکل ۸-۳ تفکیک کرنش کل به کرنش های الاستیک و پلاستیک در حالت کششی بتن



۴۴	شکل ۳-۹	تفکیک کرنش کل به کرنش های الاستیک و پلاستیک برای فولاد
۴۶	شکل ۳-۱۰	نمودار تنش-کرنش دوخطی بتن در کشش
۴۸	شکل ۳-۱۱	تیر یک سرگیردار
۴۸	شکل ۳-۱۲	تیر یک سرگیردار بعد از تحلیل استاتیکی
۴۹	شکل ۳-۱۳	مجموعه ی تیر و جرم متمرکز
۵۰	شکل ۳-۱۴	مجموعه تیر و جرم متمرکز بعد از تحلیل دینامیکی
۵۳	شکل ۴-۱	نقشه ی هوایی نیروگاه شریعتی مشهد
۵۶	شکل ۴-۲	ساختار میگردهای طولی و خاموت ها در <i>X-leg</i> ها
۵۷	شکل ۴-۳	چینش میگردهای طولی در <i>X-leg</i>
۶۰	شکل ۴-۴	مدل <i>X-leg</i> در محیط نرم افزار <i>Abaqus</i>
۶۰	شکل ۴-۵	میگرد طولی <i>X-leg</i>

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۶۱	شکل ۴-۶ خاموت ضلع کوچکتر <i>X-leg</i>
۶۱	شکل ۴-۷ خاموت های ضلع بزرگتر <i>X-leg</i>
۶۲	شکل ۴-۸ خاموت های ضلع بزرگتر <i>X-leg</i> در محیط <i>Sketch</i>
۶۲	شکل ۴-۹ میزان جابجایی پایه ی <i>X</i> شکل

۶۴	شکل ۴-۱۰	مدل پوسته‌ی بتنی ایجاد شده با المان <i>solid</i>
۶۷	شکل ۴-۱۱	مدل قسمت پائینی پوسته‌ی برج با شبکه‌ی میگرد
۶۸	شکل ۴-۱۲	مدل قسمت پائینی پوسته‌ی برج بدون شبکه‌ی میگرد
۶۹	شکل ۴-۱۳	مدل قسمت پائینی پوسته‌ی برج با شبکه‌ی میگرد با ضخامت متوسط ۵۰۰ میلی‌متر
۷۰	شکل ۴-۱۴	مدل قسمت بالایی پوسته‌ی برج با شبکه‌ی میگرد
۷۱	شکل ۴-۱۵	مدل قسمت بالایی پوسته‌ی برج بدون شبکه‌ی میگرد
۷۳	شکل ۴-۱۶	مدل نهایی برج خنک‌کننده‌ی بتنی نیروگاه شریعتی مشهد
۷۵	شکل ۵-۱	رکورد شتاب - زمان زلزله بم (مؤلفه‌ی $L$ ، $PGA=0.79g$ )
۷۵	شکل ۵-۲	رکورد جابجایی - زمان زلزله بم ( $PGD=171.12mm$ )
۷۶	شکل ۵-۳	رکورد شتاب - زمان زلزله طیس (مؤلفه‌ی $L$ ، $PGA=0.82g$ )
۷۶	شکل ۵-۴	رکورد جابجایی - زمان زلزله طیس ( $PGD=15mm$ )
۷۷	شکل ۵-۵	پایه‌های $X$ شکل در صفحه‌ی $X-Y$
۷۷	شکل ۵-۶	پایه‌های $X$ شکل در صفحه‌ی $Y-Z$

## فهرست

### چکیده

#### فصل اول - پیشگفتار

۱	مقدمه	۱-۱
۴	خلاصه مطالب	۲-۱

#### فصل دوم - برج خنک کننده بتنی

۷	برج خنک کننده	۱-۲
۷	برج خنک کننده بتنی	۱-۱-۲
۸	برج خنک کننده بتنی هذلولوی	۲-۱-۲
۱۰	هذلولوی دورانی	۳-۱-۲
۱۱	برخی نکات لازم درباره ی پوسته ها	۲-۲
۱۱	طبقه بندی پوسته ها	۱-۲-۲
۱۲	مشخصات عمومی پوسته ها	۲-۲-۲

۱۳	تحلیل نیروهای غشایی بر روی پوسته ی یک برج خنک کننده بتنی هذلولوی	۳-۲
۱۷	اثرات تخریبی زلزله بر بخش های عمده ی یک برج خنک کننده ی بتنی هذلولوی	۴-۲
۱۸	پوسته ی بتنی برج خنک کننده	۱-۴-۲
۱۹	ستون های X شکل برج خنک کننده	۲-۴-۲
۲۰	تحلیل دینامیکی برج خنک کننده	۵-۲
۲۰	مشخصات اصلی یک مسأله دینامیکی	۱-۵-۲
۲۲	روش های ناپیوسته کردن سیستم	۲-۵-۲
۲۲	روش المان محدود	۱-۲-۵-۲
۲۴	روش های آنالیز سازه	۳-۵-۲

### فصل سوم - معرفی نرم افزار Abaqus و قابلیت های آن

۳۱	مقدمه	۱-۳
۳۲	مبانی نرم افزار Abaqus	۲-۳
۳۳	مرحله پیش پردازش	۱-۲-۳
۳۳	مرحله پردازش	۲-۲-۳
۳۳	مرحله بعد از پردازش	۳-۲-۳
۳۳	اجزاء یک مدل تحلیلی	۳-۳
۳۴	هندسه ی مجزا	۱-۳-۳
۳۴	ویژگی های سطح مقطع اجزاء	۲-۳-۳
۳۵	اجزاء محدود و اجسام صلب	۱-۲-۳-۳
۳۵	اجزاء محیط پیوسته	۲-۲-۳-۳
۳۶	اجزاء پوسته ای	۳-۲-۳-۳

۳۷	اجزاء تیری	۴-۲-۳-۳
۳۷	انواع تحلیل در نرم افزار Abaqus	۴-۳
۳۸	تحلیل خطی	۱-۴-۳
۳۸	تحلیل غیرخطی	۲-۴-۳
۳۹	تحلیل دینامیک ضمنی و صریح	۱-۲-۴-۳
۴۰	نحوه ی مدل سازی ساختمان بتن آرمه در نرم افزار Abaqus	۵-۳
۴۰	معرفی جزءهای تشکیل دهنده ی سازه	۱-۵-۳
۴۱	مدل سازی مصالح	۲-۵-۳
۴۴	مدل سازی اجزاء بتنی و فولادی	۶-۳
۴۴	مدل سازی مصالح	۱-۶-۳
۴۶	راستی آزمایی نرم افزار Abaqus	۷-۳
۴۷	راستی آزمایی استاتیکی	۱-۷-۳
۴۹	راستی آزمایی دینامیکی	۲-۷-۳

#### فصل چهارم - مدل سازی برج خنک کننده نیروگاه شریعتی با نرم افزار Abaqus/CAE

۵۲	نیروگاه سیکل ترکیبی شریعتی	۱-۴
۵۳	برج خنک کننده نیروگاه شریعتی	۲-۴
۵۳	مدل کردن سازه ی برج خنک کننده نیروگاه شریعتی در Abaqus/CAE	۱-۲-۴
۵۴	تحلیل رفتار بتن و فولاد در X-leg ها	۱-۱-۲-۴
۵۸	مدل سازی پایه های X شکل در محیط نرم افزار Abaqus/CAE	۳-۴
۵۹	روند دست یابی مدل ماده معادل	۱-۳-۴
۶۴	مدل سازی پوسته برج خنک کننده بتنی در محیط Abaqus/CAE	۴-۴

۶۴	روند دست یابی مدل ماده معادل	۱-۴-۴
۷۲	Assemble کردن مدل های بدست آمده برای ایجاد مدل نهایی	۵-۴
<b>فصل پنجم - تحلیل های نهایی و ارزیابی برج خنک کننده تحت رکوردهای زلزله بم و طبس</b>		
۷۸	نمودارهای جابجایی برج خنک کننده بتنی حاصل از زلزله بم	۱-۵
۸۰	نمودارهای جابجایی برج خنک کننده بتنی حاصل از زلزله طبس	۲-۵
۸۳	<b>فصل ششم نتایج و پیشنهادات</b>	
۸۶	<b>مراجع</b>	

## **فصل اول**

### **پیشگفتار**

## ۱-۱ مقدمه

تأسیسات شبکه برق بدلیل مصرف گسترده انرژی الکتریکی در صنایع مختلف و همچنین زندگی روزمره انسان‌ها، در زمره شریان‌های حیاتی و مهم قرار گرفته‌اند و بایستی در برابر حوادث غیرمترقبه خصوصاً زمین‌لرزه از مقاومت و ایمنی کافی برخوردار باشند. نقش حیاتی و فوق‌العاده‌ای که انرژی الکتریکی در زندگی امروزه بشری دارد در ساعات‌های پس از وقوع حادثه زمین‌لرزه، خود را بیش از پیش نشان می‌دهد. آمارها نشان می‌دهد که عملیات نجات در ساعات اولیه بعد از وقوع زمین‌لرزه بیشترین تأثیر را در نجات صدها و یا هزاران انسانی دارد که در زیر آوار مدفون شده‌اند و نیاز به امداد دارند. در این لحظات، اگر شبکه برق دچار مشکل شده باشد این فرصت‌های با ارزش به راحتی از دست خواهد رفت. در حالیکه در صورت عملکرد مناسب سیستم‌های تولید، توزیع و انتقال انرژی الکتریکی و یا حداقل وجود یک سیستم برق اضطراری در هر منطقه مسکونی، از ابعاد فاجعه تا حدود زیادی کاسته خواهد شد.

طراحی سازه‌های نیروگاه‌های حرارتی، برق‌آبی و گازی باید براساس مطالعات خطر زمین‌لرزه و بر مبنای لرزه‌زمین‌ساخت اطراف ساختگاه صورت گیرد. لوازم و تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه‌ها باید از مقاومت کافی در برابر اثر زمین‌لرزه برخوردار بوده و پاره‌ای ملاحظات ویژه در مورد نصب آنها بعمل آمده باشد. معیارهای فوق باید در مورد نیروگاه‌های در دست طراحی و ساخت، رعایت شده و در مورد نیروگاه‌های در حال بهره‌برداری در سراسر کشور نیز در فواصل زمانی معین بازرسی فنی دقیق صورت گرفته و تجدیدنظرهای لازم بر اساس آخرین اطلاعات و یافته‌های مهندسی زمین‌لرزه در طراحی آنها به عمل آید.

در چند سال اخیر در کشورمان نمونه‌هایی از آسیبی که زمین‌لرزه به نیروگاه‌ها وارد کرده است را شاهد بوده‌ایم. زمین‌لرزه ۳۱ خرداد ماه ۱۳۶۹ با بزرگای 7.4 Ms در منطقه وسیعی از استان‌های زنجان و گیلان قربانیان و خرابی‌های زیادی برجای گذاشت. در این زمین‌لرزه به تأسیسات و شریان‌های حیاتی و صنعتی منطقه نیز آسیب‌های فراوانی وارد شد. در طی زمین‌لرزه منجیل، نیروگاه شهید بهشتی (لوشان) دچار خرابی‌ها و خسارات زیادی گردید و قسمت‌های مختلف آن آسیب دید. این نیروگاه در ۷۰ کیلومتری لوشان و ۹۲ کیلومتری رشت در کنار جاده اصلی واقع شده است و دارای واحدهای بخاری و گازی و یک پست فشار قوی ۲۳۰ کیلو ولت می‌باشد.

بطور کلی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای از دو دیدگاه کمی و کیفی صورت می‌پذیرد که در هر سه بخش شبکه برق از جمله تولید، انتقال و توزیع قابل بحث می‌باشد [۱].

به طور کلی، نیروگاه‌ها بسته به نوع انرژی مصرفی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

۱. هسته‌ای<sup>۱</sup>؛
۲. آبی<sup>۲</sup>؛
۳. بادی<sup>۳</sup>؛
۴. خورشیدی<sup>۴</sup>؛
۵. زمین گرمایی<sup>۵</sup>؛
۶. گازی<sup>۶</sup>؛
۷. حرارتی<sup>۷</sup>؛

از میان موارد فوق، نیروگاه‌های هسته‌ای و آبی ضوابط طرح لرزه‌ای بسیار کامل و دقیقی دارند و در طراحی آنها، ملاحظات طرح لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. نیروگاه‌های بادی، خورشیدی و زمین گرمایی نیز در ایران بسیار نادر می‌باشند

---

<sup>1</sup> . Nuclear power Plant

<sup>2</sup> . Hydro power Plant

<sup>3</sup> . Wind power plant

<sup>4</sup> . Solar power Plant

<sup>5</sup> . Geothermal power plant

<sup>6</sup> . Gas power Plant

<sup>7</sup> . Thermal power plant

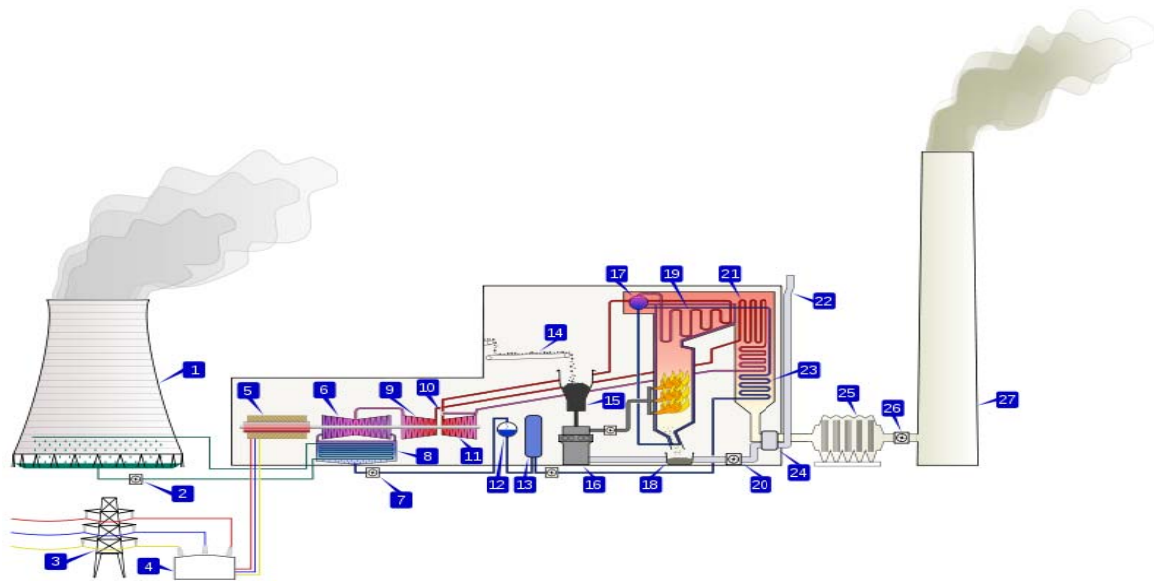


و در شبکه برق اهمیت زیادی ندارند. لذا در حال حاضر، نیروگاه‌های گازی و حرارتی از اهمیت بیشتری برای تحلیل و بررسی برخوردار می‌باشند [۱].

مقاومت سازه‌های نیروگاهی که در مرحله تولید برق قرار دارند، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. حفاظت فیزیکی از این سازه‌ها در زمان وقوع بحران‌هایی مانند زلزله، در زمینه کاهش خسارات مالی و جانی مؤثر است. لذا، موضوع طراحی سازه‌های جدید و یا تقویت سازه‌های موجود در برابر زمین‌لرزه به منظور به حداقل رساندن خسارات و آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه امری ضروری می‌باشد، به گونه‌ای که در آیین‌نامه‌های مرتبط با طراحی سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه در کشورهای مختلف، بر لزوم بررسی و مطالعات خاص برای این گونه سازه‌ها تأکید شده است.

مهمترین و حیاتی‌ترین بخش از یک شبکه‌ی گسترده‌ی برق، مرحله‌ی تولید آن است. نیروگاه‌های تولید برق با هزینه‌های گزاف و صرف زمان طولانی به بهره‌برداری می‌رسند و بعد از بهره‌برداری بخش‌های عمده‌ای از زندگی شهری و روستایی را به خود وابسته می‌کنند. در این بخش، اگر مقاومت کافی در برابر زلزله وجود نداشته باشد، مطمئناً تمهیدات سنجیده شده برای شبکه توزیع و انتقال بیهوده خواهد بود.

یک نیروگاه تولید برق قسمت‌های متعدد و پیچیده‌ای دارد. اگر بخواهیم یک تصویر دوبعدی از آنچه که در یک نیروگاه حرارتی و یا گازی می‌گذرد، داشته باشیم، تصویر ۱-۱ نمونه‌ی مناسبی برای بدست آوردن این پیش‌ذهن خواهد بود.



Typical diagram of a coal-fired thermal power station

- |                                        |                                 |                                 |
|----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Cooling tower                       | 10. Steam Control valve         | 19. Superheater                 |
| 2. Cooling water pump                  | 11. High pressure steam turbine | 20. Forced draught (draft) fan  |
| 3. transmission line (3-phase)         | 12. Deaerator                   | 21. Reheater                    |
| 4. Step-up transformer (3-phase)       | 13. Feedwater heater            | 22. Combustion air intake       |
| 5. Electrical generator (3-phase)      | 14. Coal conveyor               | 23. Economiser                  |
| 6. Low pressure steam turbine          | 15. Coal hopper                 | 24. Air preheater               |
| 7. Condensate pump                     | 16. Coal pulverizer             | 25. Precipitator                |
| 8. Surface condenser                   | 17. Boiler steam drum           | 26. Induced draught (draft) fan |
| 9. Intermediate pressure steam turbine | 18. Bottom ash hopper           | 27. Flue gas stack              |

شکل ۱-۱ نمودار یک نیروگاه حرارتی با سوخت زغال سنگ

یکی از بخش‌های عمده که در چرخه‌ی تولید برق در یک نیروگاه حرارتی حائز اهمیت می باشد، «برج خنک کننده بتنی» است که از ارتفاع بلندی برخوردار بوده و از این رو، جزء سازه‌های حیاتی و خاص به شمار می رود. در برخی از نیروگاه‌ها - مانند نیروگاه نیشابور - بیش از یک برج خنک کننده طراحی شده است که نقش سازنده‌ی را آن‌ها در چرخه‌ی تولید برق نشان می دهد.

## ۱-۲ خلاصه مطالب

علاوه بر مطالب ذکر شده در بخش ۱-۱، می‌توان مطالب فصول بعد را به شرح زیر خلاصه نمود.

**فصل دوم-** در این فصل، در ابتدا شرح نسبتاً مختصری از برج‌های خنک‌کننده و تاریخچه‌ی پیدایش آن ارائه می‌گردد. در ادامه ساختار و معادلات حاکم بر ساخت این سازه توضیح داده می‌شود. سپس گونه‌های مختلف از تحلیل را که توسط مهندسين و محققين برای ارزیابی رفتار این سازه در برابر بارهای مختلف (اعم از زلزله، باد و ...) صورت گرفته است، تشریح می‌شود. روش المان محدود را که امروزه کاربرد وسیعی در تحلیل‌های دینامیکی پیدا کرده، برای این سازه نیز مدنظر قرار داده و به طور مختصر توصیف گردیده است.

**فصل سوم-** در این فصل، به بررسی نرم افزار Abaqus که در این رساله مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته شده است. انواع اجزاء و تحلیل‌های دینامیکی (ضمنی و صریح) تشریح شده است. از سوی دیگر، اجزاء سازه‌ای به کار رفته در مدل‌سازی برج خنک‌کننده نیروگاه شریعتی مشهد معرفی شده است. در ادامه، راستی‌آزمایی نرم افزار در دو مسئله‌ی استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی، و نتایج محاسباتی و تحلیلی نرم افزار مورد مقایسه و صحت برنامه مورد تأیید قرار گرفته است.

**فصل چهارم-** در این فصل، با استفاده از نقشه‌های مربوط به سازه‌ی برج خنک‌کننده که شامل چگونگی چینش آرماتورها در داخل سازه، مشخصات فیزیکی آرماتورها و بتن به کار رفته و همچنین زوایا و ابعاد سازه‌ای برج خنک‌کننده نیروگاه شریعتی می‌باشد، برج مزبور در فضای نرم افزار Abaqus مدل گردیده است. از سوی دیگر، با استفاده از روابط حاکم بر رفتار الاستیک - پلاستیک آرماتورها و بتن‌ها، نمودارهای مربوط به این روابط رسم، و برخی محاسبات ریاضی برای تعیین رفتارهای مواد در مدل مزبور انجام شده است.

**فصل پنجم** - در این فصل، با استفاده از دو رکورد مربوط به زلزله‌های بم و طبس که جزء زلزله‌های پرخسارت (مالی و جانی) بوده‌اند، سازه‌ی مدل شده را تحت تحلیل قرار داده‌ایم. تاریخچه‌ی زمانی مربوط به هر کدام از رکوردها را در ترازهای گوناگون برج مدل شده به صورت تطبیقی مورد مقایسه قرار گرفته است. از سوی دیگر، با نصف کردن میزان حداکثر شتاب افقی حاصل از زلزله، مقایسه‌ای برای زلزله‌های احتمالی و با شدت ضعیف‌تر صورت پذیرفته است.

**فصل ششم** - در این فصل نتایج حاصل شده از این تحلیل را مورد اشاره قرار داده، و از سوی دیگر برخی پیشنهادات را که به نظر می‌تواند در بررسی‌های آینده تحلیل دقیق‌تر و بهتری را حاصل نماید، ارائه گردیده است.