

بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی

برجهای خنک کن بتنی تحت اثر زلزله

سعید صبوریⁱ؛ فرهاد عابدی نیکⁱⁱ

چکیده

برجهای خنک کن بتنی سازه‌های خاصی هستند که در اغلب نیروگاه‌ها به چشم می‌خورند. در طراحی این سازه تنوعی از بارگذاری مطرح است که هر یک می‌تواند در بخشی از طرح سازه تعیین کننده باشد. در این میان زلزله سبب بروز رفتار و پاسخ‌های پیچیده‌ای در سازه می‌گردد و ممکن است تهدیدی جدی برای ایمنی سازه و پایداری آن باشد. تحقیقات گذشته نشان دهنده حساسیت ستونهای برج خنک کن بتنی تحت اثر زلزله می‌باشد. از این رو، در این تحقیق ضمن توجه ویژه به ستون‌های این سازه، به مطالعه و بررسی اثر زلزله بر رفتار برجهای خنک کن پرداخته شده است. بدین منظور برج خنک کن نیروگاه حرارتی شازند، به عنوان نمونه‌ای از این سازه انتخاب و مدل اجزاء محدود آن تهیه شده است. سپس با اعمال اثر همزمان مولفه‌های افقی و قائم شتاب زلزله‌های واقعی طیس، ناغان ویم، عملکرد لرزه‌ای برج خنک کن بررسی شده و علاوه بر مقایسه پاسخ‌های نیرویی و تغییر مکانی خطی و غیرخطی سازه، محل و ترتیب تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی سازه تعیین گشته است. در ادامه، پایداری سازه با توجه به گره‌های پلاستیک تشکیل شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تحت اثر زلزله‌های مذکور ستون‌های سازه دچار آسیب دیدگی می‌شوند؛ بطوریکه آسیب دیدگی شدید می‌تواند سبب ناپایداری سازه گردد.

کلمات کلیدی

برج خنک کن بتنی، رفتار غیر خطی، زلزله، پایداری.

Nonlinear Dynamic Behavior of Natural Draft Concrete Cooling Towers under the Effect of Earthquake

S. Sabouri-Ghomi; F. Abedi Nik

ABSTRACT

Natural draft concrete cooling towers are special structures in most of the power plants. For design of these structures, there are varieties of loadings that each one can be determinant. Among these loads, earthquake can cause instability in such structures. Previous research has shown that the columns supporting a cooling tower are sensitive to earthquake forces, so in this study the columns of these towers were regarded. As a case, Shazand cooling towers were chosen in which the columns length are very high. Finite element model of them were provided and nonlinear dynamic behavior of them were studied under the effect of real vertical and horizontal components of Tabas, Naghan and Bam earthquakes. The results show columns damage and instability of the towers.

KEYWORDS

Concrete Cooling Tower, Nonlinear Behavior, Earthquake, Stability

ⁱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران: sabouri@kntu.ac.ir

ⁱⁱ کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران: farnikan@sina.kntu.ac.ir

ارتفاع بلندترین نقطه پوسته از روی فونداسیون	۱۲۰ متر
ارتفاع پایینترین نقطه پوسته از روی فونداسیون	۲۴ متر
شعاع دهانه فوقانی پوسته	۲۲/۳۵ متر
شعاع دهانه تحتانی پوسته	۴۴/۸۴ متر
شعاع مرکز فونداسیون رینگی	۵۲/۱۸۲ متر
ابعاد فونداسیون	۴/۲ × ۱/۴ متر
ابعاد ستون	۱/۱۵ × ۰/۷ متر
طول ستون‌ها	۲۹/۵۶ متر

پیش از انجام هرگونه تحلیل دینامیکی، داشتن آگاهی درمورد توزیع بار مرده در ارتفاع سازه می تواند بسیار سودمند باشد. بررسی مدل اجزاء محدود ساخته شده نشان می دهد که در حدود ۲۲/۳ درصد از وزن کل سازه مربوط به فونداسیون، ۱۷/۵ درصد از وزن کل مربوط به ستونها و ۶۰/۲ درصد از وزن کل مربوط به پوسته برج خنک کن بتنی است. همچنین مرکز جرم سازه حدوداً در ارتفاع ۳۶ متری نسبت به سطح زیر فونداسیون قرار دارد. آنچه مسلم است، بیشتر وزن سازه به پوسته تعلق دارد و ستونها باید این وزن قابل توجه را تحمل کنند. با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته عموماً ستون‌های این نوع سازه به عنوان بخش حساس در برابر زلزله تشخیص داده شده‌اند، حفظ پایداری سازه تحت اثر زلزله حائز اهمیت خواهد بود. به منظور کاهش حجم و زمان محاسبات، بخش بحرانی شتابنگاشت‌های زلزله‌های طبیس، ناغان و بم در تحلیل‌های دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات بیشینه شتاب افقی و قائم و بخش بحرانی انتخاب شده از هر رکورد در جدول (۲) و شکل (۱) ارائه شده است.

جدول (۲): حداکثر شتاب افقی و قائم زلزله‌های طبیس، ناغان و بم

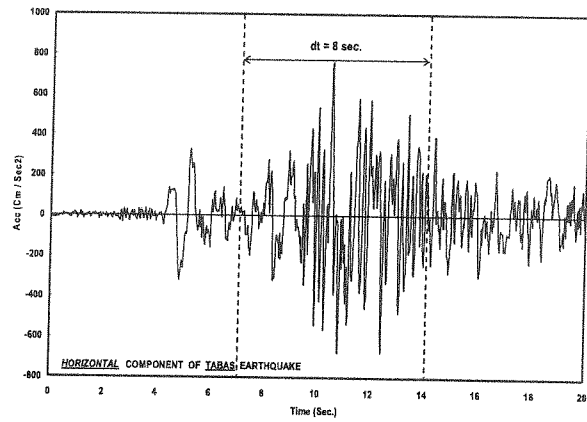
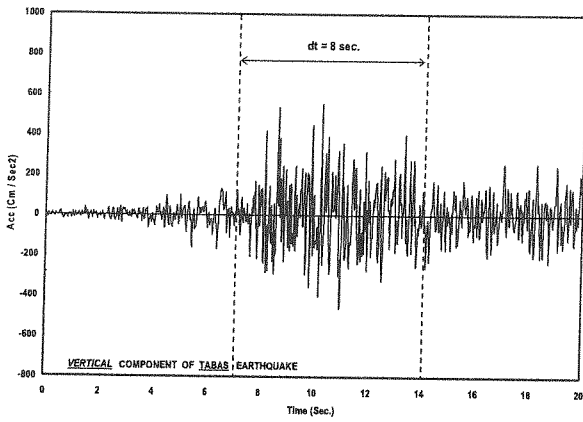
زمین لرزه	بیشینه شتاب قائم		بیشینه شتاب افقی	
	g%	g%	g%	g%
طبیس	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۷۴	۰/۷۹
ناغان	۰/۵	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۹
بم	۱/۰۱	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۷۹

برجهای خنک کن بتنی سازه های خاصی هستند که در اغلب نیروگاهها به چشم می‌خورند. در طراحی این سازه تنوعی از بارگذاری مطرح است که هر یک می‌تواند در بخشی از طرح تعیین کننده باشد.

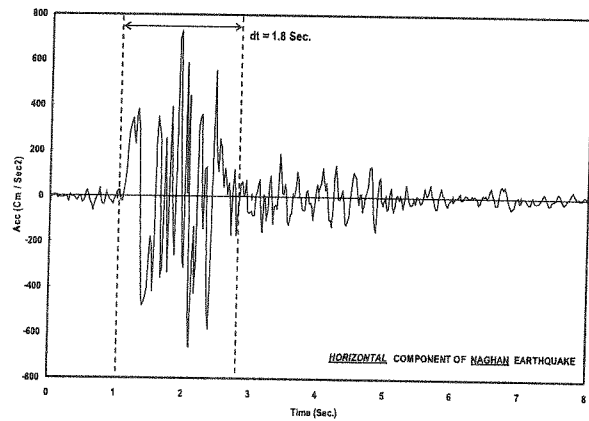
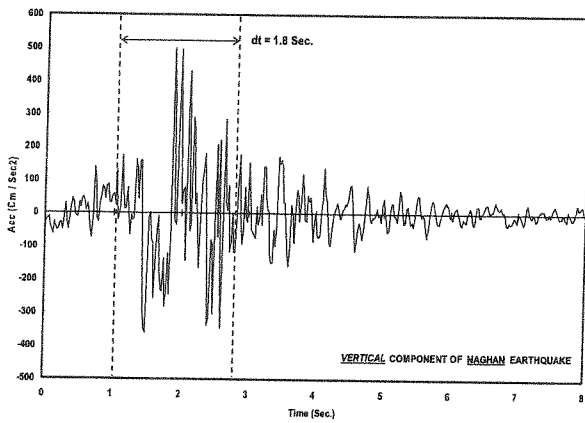
در این میان زلزله سبب بروز رفتار پیچیده‌ای در سازه می‌گردد و ممکن است تهدیدی جدی برای پایداری سازه باشد. در سال‌های اخیر در کشورمان شاهد طراحی و ساخت برجهای خنک کن بتنی مرتفع هستیم. با توجه به اینکه ایران بخشی از کمربند آلپ - هیمالیا (آلیپاید) را تشکیل می‌دهد و منطقه ای لرزه خیز محسوب می‌شود، درک رفتار لرزه ای این سازه خاص بسیار با اهمیت است و باید به دقت مورد بررسی و توجه قرار گیرد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط صبوری [۱]، گران و یانگ [۲]، کاستیواو [۳]، کراتزیگ [۴]، و برخی دیگر از محققان نشان دهنده حساسیت ستون‌های برجهای خنک کن بتنی به بارهای لرزه ای است. بر این اساس با توجه به اهمیت نقش ستون‌ها در پایداری سازه، تحقیق حاضر بر عملکرد ستون‌های برج خنک کن متمرکز گشته و سعی شده است که در مدلسازی اجزاء محدود نیز به ستونهای سازه توجه بیشتری شود.

۲- برجهای خنک کن مورد مطالعه

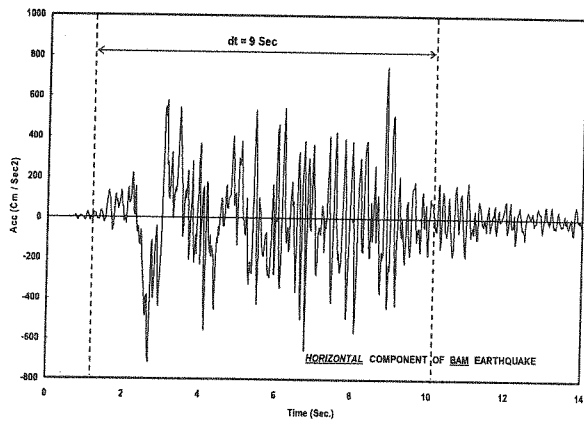
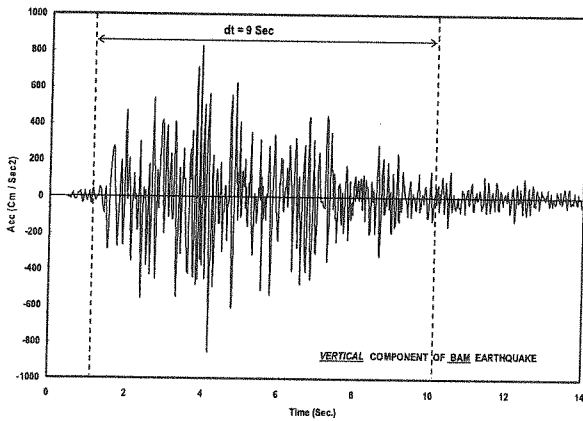
در این تحقیق به منظور بررسی رفتار غیرخطی برج‌های خنک کن بتنی تحت اثر زلزله، برج خنک کن نیروگاه حرارتی شازند به عنوان نمونه‌ای از بلندترین برجهای خنک‌کن ایران انتخاب شده است. ستون‌های بلند این سازه ویژگی بارز این برج نسبت به برجهای مشابه می‌باشد. سازه مورد مطالعه متشکل از پوسته هذلولی ۱۰۶ متری است که بر روی ۳۶ زوج ستون X شکل واقع شده و ستون‌های مذکور در هر ۱۰ درجه بر روی فونداسیونی حلقوی مستقر هستند. برخی از ویژگیهای ابعادی برج خنک‌کن مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. پیش از انجام هرگونه تحلیل دینامیکی، داشتن آگاهی درمورد توزیع بار مرده در ارتفاع سازه می‌تواند بسیار سودمند باشد. بررسی مدل اجزاء محدود ساخته شده نشان می‌دهد که در جدول ۱ ارائه شده است.



الف) زلزله طبیس



ب) زلزله ناغان



ج) زلزله بم

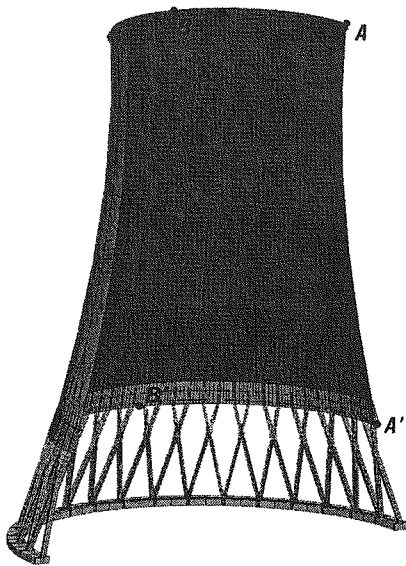
شکل (۱): شتابنگاشت‌های افقی و قائم زلزله‌های طبیس، ناغان و بم

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود

مدلسازی، فونداسیون با استفاده از المان خطی Solid45 و ستون‌ها با استفاده از المان بتنی غیرخطی Solid65 با قابلیت ترک خوردگی و خردشدگی مدل‌سازی شده‌اند. پوسته ۱۰۶ متری برج خنک‌کن مورد مطالعه با استفاده از سه المان متفاوت مدل‌سازی شده، بطوریکه یک مترپایینی پوسته

در مدل اجزاء محدود ساخته شده از برج خنک‌کن مورد مطالعه، از شرایط تقارن مخوری استفاده و تنها نیمی از سازه توسط نرم افزار ANSYS[5] مدل‌سازی شده است. در این





شکل (۲): نقاط کلیدی انتخاب شده روی پوسته

همانگونه که مشاهده می‌شود گره‌های پلاستیک روی ستون‌ها عمدتاً در محل تماس ستون با فونداسیون، محل تماس ستون با پوسته و در محل تلاقی دو ستون، تشکیل می‌شوند. همچنین نواحی پلاستیک شده بر روی پوسته پس از آسیب دیدگی جدی ستون‌های مجاور رخ می‌دهند.

تاریخچه زمانی برش پایه در حالت خطی و غیرخطی در شکل (۴) مقایسه شده است. همچنین در این شکل موقعیت زمانی تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی پاسخ غیرخطی برش پایه با نقاط توپر مشخص شده است.

همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، پاسخ خطی و غیرخطی در ابتدا برهم منطبق اند؛ اما با تشکیل گره‌های پلاستیک و ظهور رفتار غیر الاستیک سازه، مقادیر پاسخ غیرخطی کاهش قابل توجهی می‌یابد. کاهش برش پایه غیرخطی سازه را می‌توان با فلسفه کاهش نیروی وارد بر سیستم در اثر کاهش سختی (افزایش نرمی) تفسیر کرد.

در تحلیل غیرخطی که با رکورد زلزله‌های طبرس و بم به عمل آمده است، به ترتیب از حدود ثانیه ۳ و ۲/۴ به بعد در بعضی از گام‌های زمانی با عدم همگرایی پاسخ‌های تحلیلی نرم افزار ANSYS و کاهش قابل توجه برش پایه غیر خطی مواجه شدیم که این مساله را می‌توان ناشی از عدم پایداری سازه دانست.

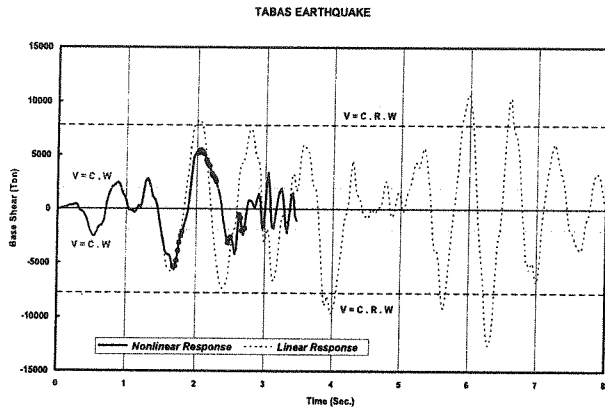
که در محل تماس با ستونهاست (به دلیل احتمال وجود تمرکز تنش و بروز رفتار غیرخطی موضعی) با استفاده از المان بتنی غیرخطی Solid65، و پنج متربالایی آن با استفاده از المان خطی Solid45، و در نهایت صد متر فوقانی پوسته با استفاده از المان پوسته‌ای الاستیک Shell63، مدلسازی شده است. کلیه ستونها و یک متر اول پوسته که با المان بتنی مدلسازی شده‌اند با استفاده از المان Link8 و با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مصالح برای این المان، مسلح گشته است.

در بررسی‌های انجام شده، تحلیل‌های دینامیکی یکبار بر روی مدل اجزاء محدود ساخته شده با اجزای کاملاً الاستیک و یکبار بر روی مدل اجزاء محدود دارای اجزای غیرالاستیک اجرا شده و پاسخ‌های نیرویی و تغییر مکانی سازه در حالت خطی و غیرخطی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است؛ بدین ترتیب می‌توان درک بهتری از رفتار غیرخطی سازه در اثر بارهای دینامیکی ارائه کرد.

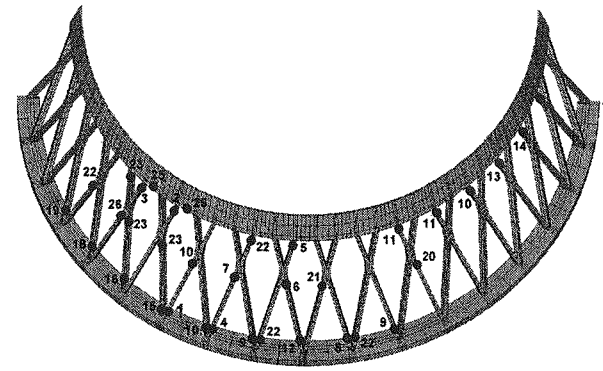
پس از بررسی تغییر مکان‌های تعداد قابل توجهی از نقاط پوسته، چهار نقطه نشان داده شده در شکل (۲) به عنوان نقاط کلیدی در نظر گرفته شده است. با مقایسه پاسخ تغییر مکانی نقاط A-B و A'-B' می‌توان اعوجاج بخش فوقانی و تحتانی پوسته را بررسی نمود. همچنین تغییر مکان نسبی بخش فوقانی و تحتانی پوسته با مقایسه پاسخ نقاط A-A' و B-B' قابل بررسی و مقایسه خواهد بود.

۴- بررسی رفتار غیرخطی برج خنک کن بتنی در اثر زلزله

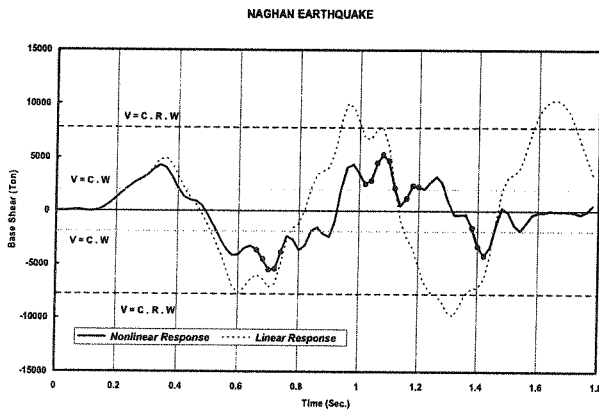
پس از اعمال بخش بحرانی شتابنگاشت‌های انتخابی به برج خنک‌کن مورد مطالعه، وضعیت اجزاء سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده می‌شود علاوه بر ترک خوردگی بتن ستون‌ها، آرماتورهای مدلسازی شده روی ستون‌ها در بعضی قسمت‌ها وارد مرحله غیرالاستیک می‌شوند. همچنین ترک خوردگی بتن و تسلیم آرماتور در بخش پایینی پوسته بصورت موضعی مشهود است. ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک و موقعیت آنها در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل گره‌های پلاستیک نقاطی هستند که آرماتورهای مقطع در آن نقاط جاری شده و دارای کرنش پلاستیک است.



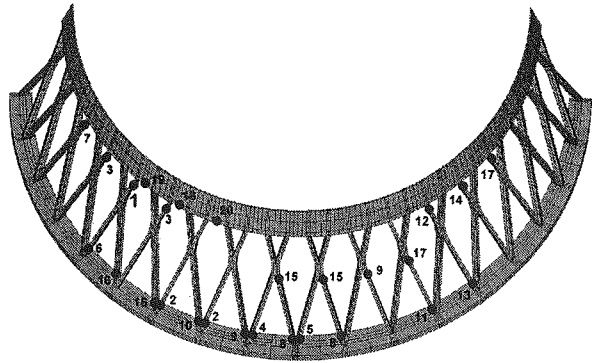
الف) زلزله طبس



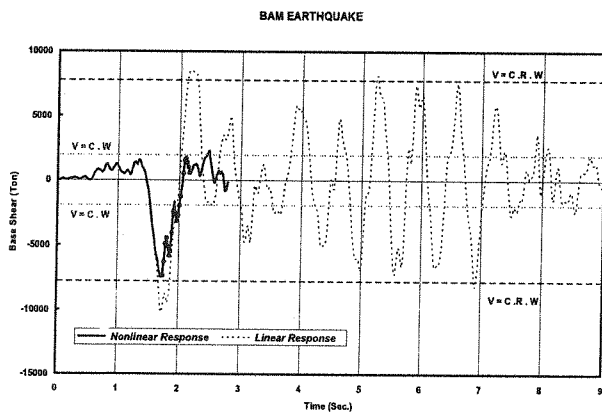
الف) زلزله طبس



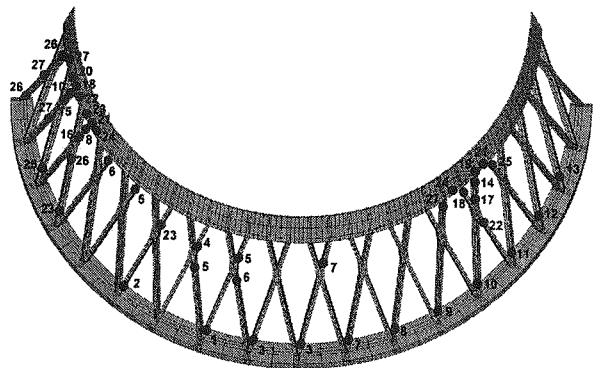
ب) زلزله ناغان



ب) زلزله ناغان



ج) زلزله بم



ج) زلزله بم

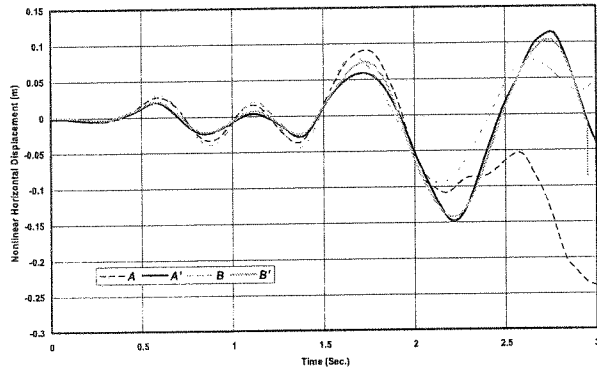
شکل (۴): مقایسه برش پایه خطی و غیر خطی سازه در اثر

زلزله‌های طبس ، ناغان و بم

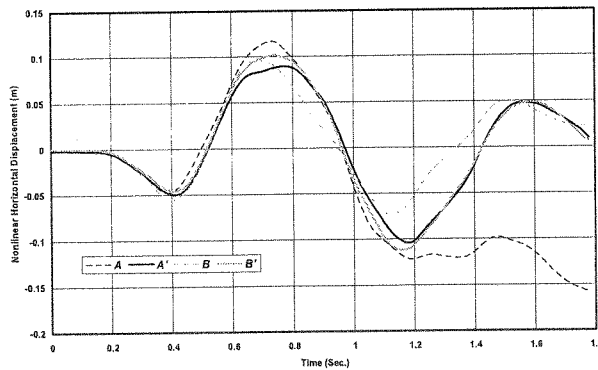
نکته قابل توجهی که در پاسخ‌های حاصل از زلزله های طبس و بم مشاهده می‌شود، افزایش پاسخ تغییر مکانی بخش تحتانی نسبت به بخش فوقانی پوسته است. این مساله را می‌توان ناشی از اثر شتاب بر مرکز جرم سازه (حدوداً در ارتفاع ۳۲ متری از روی فونداسیون) و کاهش سختی سیستم در اثر

شکل (۳): موقعیت و ترتیب تشکیل گره‌های پلاستیک روی سازه در اثر زلزله‌های طبس ، ناغان و بم

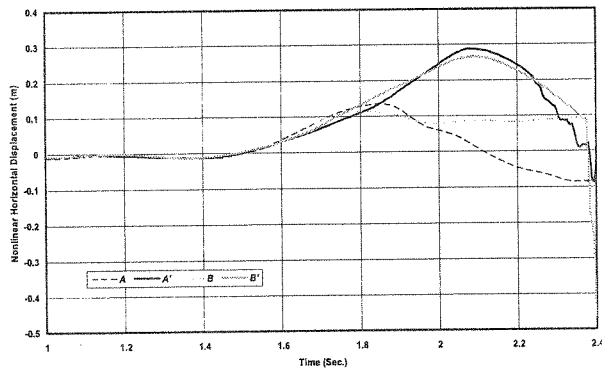
تغییر مکان افقی نقاط کلیدی سازه در حالت غیر خطی در شکل (۵) مقایسه شده است. تفاوت نسبی نه چندان قابل توجه در مقادیر تغییر مکان نقاط A و B (نقاط بخش فوقانی پوسته) را می‌توان ناشی از اعوجاج ناچیز (در مقایسه با ابعاد سازه) بخش فوقانی پوسته دانست. در عین حال پاسخ تغییر مکانی نقاط A' و B' بیانگر عملکرد صلب رینگ سخت کننده تحتانی در مدت زمان پایداری سازه هنگام وقوع زلزله است.



الف) زلزله طبس



ب) زلزله ناغان



ج) زلزله بم

شکل (۵): مقایسه تغییر مکان افقی نقاط کلیدی در حالت غیرخطی در اثر زلزله های طبس، ناغان و بم

در آنالیزهای کمانش انجام شده تنها مفاصل تشکیل شده بر روی ستون‌ها مدلسازی شده‌اند حال آنکه وجود نواحی پلاستیک شده بر روی پوسته می‌تواند وضعیت بحرانی تری

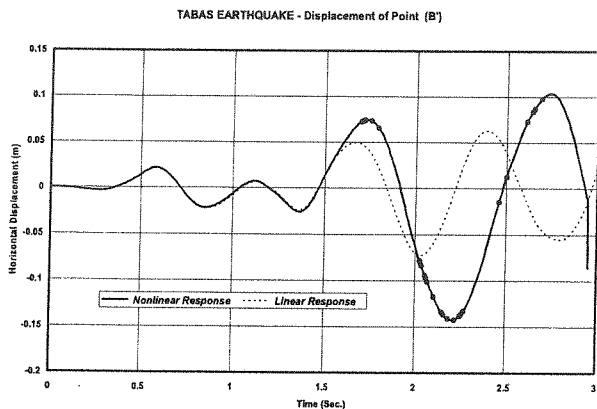
تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی ستون‌ها دانست.

با توجه به عملکرد صلب رینگ سخت کننده تحتانی پیش از ناپایداری سازه و اهمیت ستونها و تغییر مکان نسبی دو انتهای ستون‌ها، بررسی و مقایسه تغییر مکان خطی و غیرخطی نقاط می‌تواند در مطالعه رفتار سازه مفید باشد. تغییر مکان افقی خطی و غیرخطی نقطه B' تحت اثر زلزله‌های طبس، ناغان و بم در شکل (۶) مقایسه شده است. افزایش تغییر مکان غیرخطی نسبت به حالت خطی را می‌توان به کاهش سختی سیستم در اثر تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی ستون‌های سازه نسبت داد. همچنین افزایش ناگهانی تغییر مکان در بخش انتهایی پاسخ حاصل از زلزله‌های طبس و بم حاکی از ناپایداری سازه است.

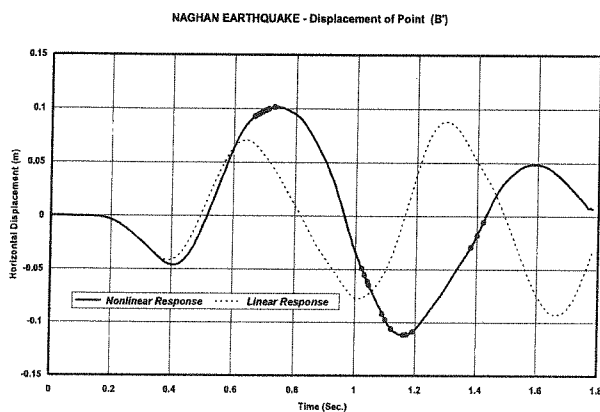
با توجه به عملکرد صلب رینگ سخت کننده تحتانی در زمان پایداری سازه و فرض تغییر مکان یکسان بخش فوقانی ستونها، منحنی تغییر مکان - برش پایه مربوط به ستون‌های سازه در حالت الاستیک و غیر الاستیک مطابق با شکل (۷) خواهد بود. نمودار نیرو- تغییر مکان ستون‌های سازه در حالت خطی نشان دهنده تغییرات مکانی و نیرویی در یک محدوده معین است؛ اما نمودار هیستریتیک ستون‌ها در حالت غیرخطی افزایش تغییر مکان و کاهش نیروی متناظر را نشان می‌دهد.

سطح داخلی منحنی هیستریتیک با مقدار انرژی تلف شده توسط سیستم برابر است و هرچه قدر این منحنی چاق تر باشد، انرژی تلف شده بیشتر خواهد بود. همانگونه که در شکل دیده می‌شود انرژی جذب شده توسط سیستم چندان قابل توجه نبوده و با افزایش تغییر مکان نسبی دو انتهای ستون‌ها، کاهش مقاومت و سختی به خوبی مشهود است. پس می‌توان گفت به منظور بررسی وضعیت پایداری سازه در حین زلزله، با مدلسازی یکایک گره‌های پلاستیک، به ترتیب تشکیل بر روی ستون‌های مدل اجزاء محدود ساخته شده بوسیله نرم‌افزار سازه رفتار هیستریتیک پایدار و مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. SAP2000، آنالیز کمانش انجام گرفته و ضریب کمانش سازه در هر مرحله تعیین شده است. در این تحلیل‌ها گره‌های مدلسازی شده به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که قابلیت جذب لنگر خمشی در مقطع (در دو راستای متعامد) برابر صفر باشد. در شکل (۸) تغییرات ضریب مود اول کمانش در برابر زمان ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که ضریب

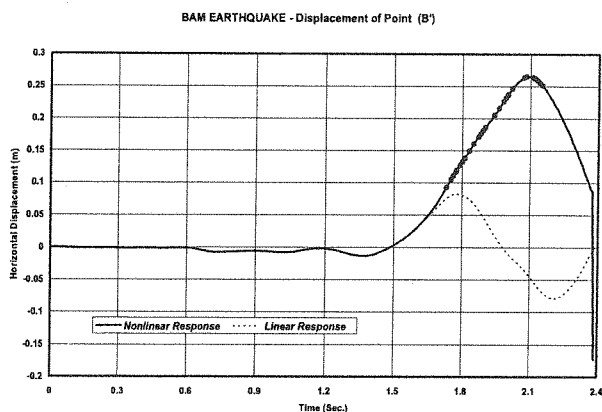
کمانش سازه پیش از تشکیل گره‌های پلاستیک برابر ۱۸/۵۲ بوده و پس از تشکیل گره‌های مذکور مقدار ضریب کمانش به تدریج کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که



الف) زلزله طبیس



ب) زلزله ناغان



ج) زلزله بم

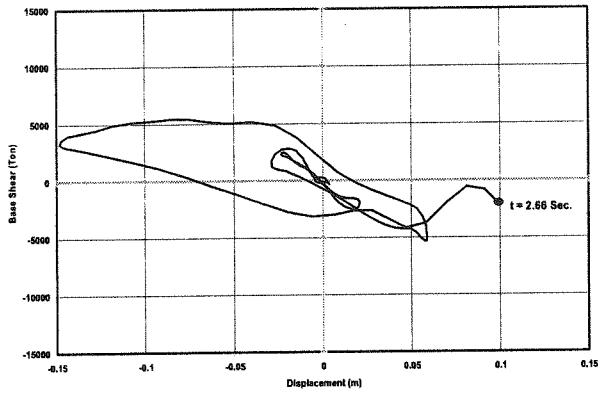
شکل (۶): مقایسه تغییر مکان افقی خطی و غیرخطی نقطه B' در اثر زلزله‌های طبیس، ناغان و بم

برای پایداری سازه ایجاد نماید. همچنین در محاسبه ضریب کمانش در هر تحلیل، از اثر بار دینامیکی ناشی از زلزله نیز صرفنظر شده و تنها اثر بار ثقلی ناشی از وزن سازه در هر مرحله لحاظ شده است. مسلماً اثر همزمان بار ناشی از زلزله وضعیت بحرانی تری در پایداری سازه ایجاد می‌نماید.

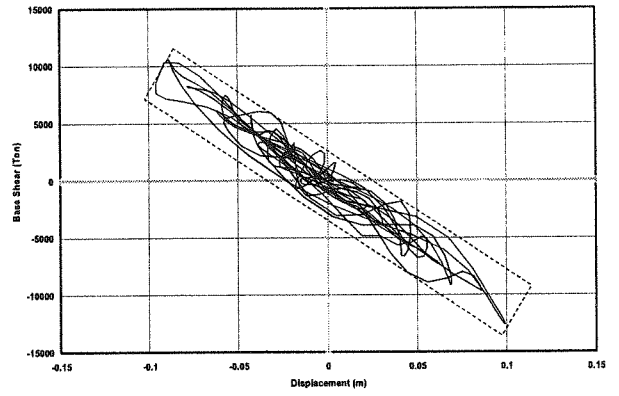
همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از کنترل پایداری سازه تطابق خوبی با نتایج حاصل از بررسی پاسخ-های تغییر مکان و برش پایه دارد؛ بطوریکه ناپایداری سازه تحت اثر زلزله‌های طبیس و بم و حفظ پایداری تحت اثر زلزله ناغان کاملاً مشهود است.



TABAS EARTHQUAKE - Nonlinear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear

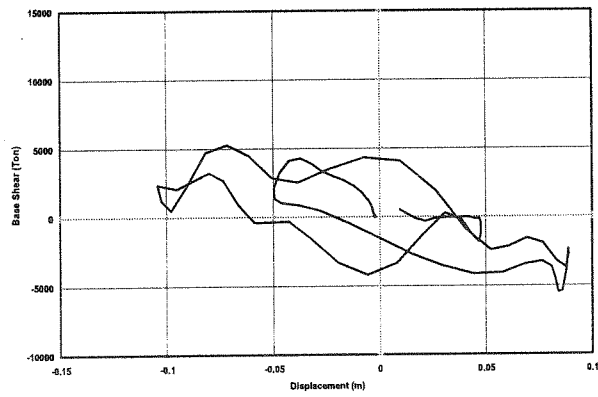


TABAS EARTHQUAKE - Linear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear

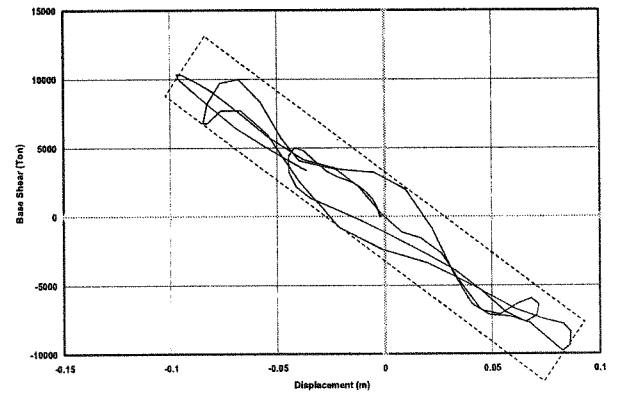


الف) زلزله طبیس

NAGHAN EARTHQUAKE - Nonlinear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear

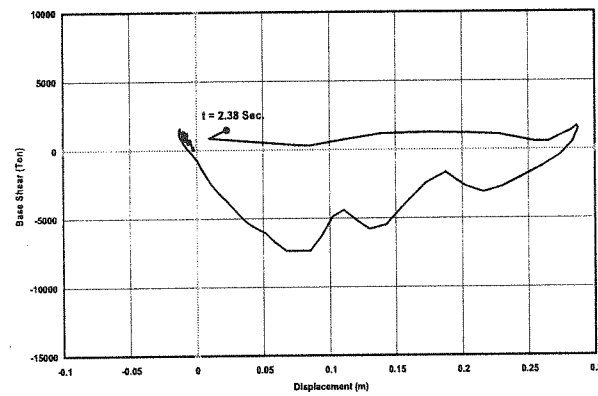


NAGHAN EARTHQUAKE - Linear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear

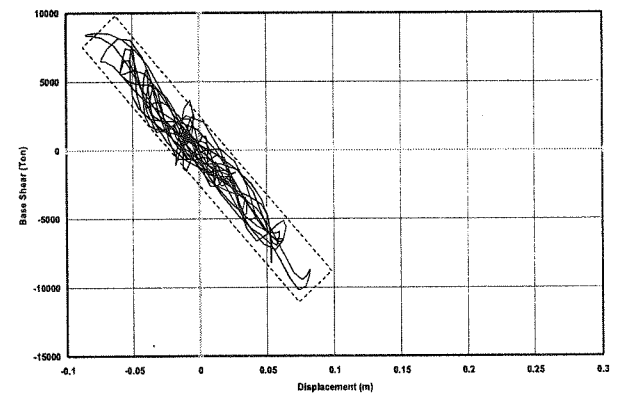


ب) زلزله ناغان

BAM EARTHQUAKE - Nonlinear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear



BAM EARTHQUAKE - Linear Horizontal Displacement of Point (A') Versus Base Shear



ج) زلزله بم

شکل (۷): نمودار نیرو - تغییر مکان ستون‌ها در اثر زلزله‌های طبیس، ناغان و بم

پلاستیک بیشتر بر روی ستون‌ها و در محل تماس ستون با پی، با پوسته و اطراف محل تلاقی ستون‌ها تشکیل می‌شوند. همچنین نواحی پلاستیک شده بر روی پوسته پس از آسیب دیدگی جدی ستون‌های مجاور ایجاد می‌شوند.

همچنین بروز رفتار غیرالاستیک سازه در اثر تشکیل گره‌های پلاستیک سبب کاهش سختی سیستم و در نتیجه کاهش برش پایه اعمال شده به سازه و افزایش تغییر مکانها نسبت به حالت الاستیک می‌گردد.

- پیش از وقوع ناپایداری سازه در اثر زلزله، رینگ سخت کننده تحتانی عملکردی صلب داشته و تغییر مکان نسبی دو انتهای کلیه ستون‌ها را می‌توان یکسان دانست.

- منحنی هیستریتیک ستون‌های سازه، جذب انرژی چندانی مناسبی را تحت اثر زلزله‌های اعمال شده، نشان نمی‌دهند و کاهش مقاومت و سختی در اثر افزایش جابجایی به خوبی مشهود است.

- بررسی وضعیت پایداری سازه (تحت اثر بار مرده) پس از تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی ستونها، تحت اثر زلزله‌های طیس و بم فروریزی سازه پیش از اتمام کامل زلزله را تایید می‌کند. این درحالی است که اثر بار دینامیکی زلزله و گره‌های پلاستیک تشکیل شده بر روی پوسته در کنترل پایداری در نظر گرفته نشده است. مسلماً "حضور این دو عامل وضعیت را بحرانی‌تر می‌کند.

۶- مراجع

[۱] صبوری، سعید، "بررسی اولیه اثر زلزله بر پایداری برجهای خنک کن بتنی"، گزارش فنی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، پاییز ۱۳۷۹.

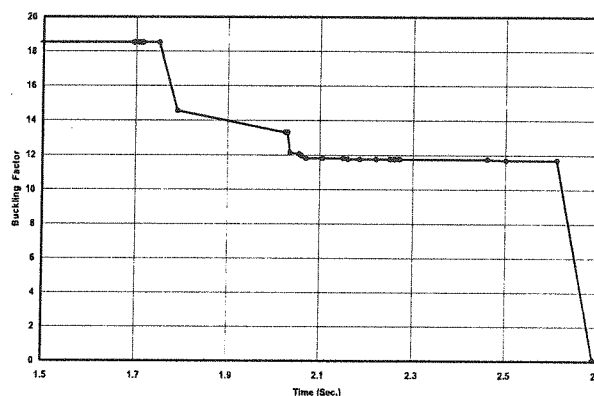
[2] Gran C.S., Yang T.Y. "Nastran and Sap IV applications on the seismic response of column-supported cooling towers". Computers & Structures Vol 8, pp761-768. Pergamon press Ltd.1978. Printed in Great Britain.

[3] Castiau Th, Gaurois R. "The design of cooling towers in extremely severe earthquake condition". Eng. Structure. 1991, Vol.13, January.

[4] Kratzig W.B. "Toward safe and economic seismic design of cooling tower of extreme height". 1979

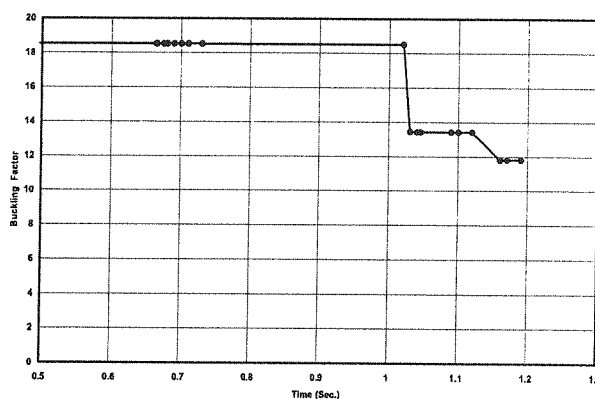
[5] Ansys (Ver.8.00). Users manual. Swanson Analysis System. Inc.

TABAS EARTHQUAKE



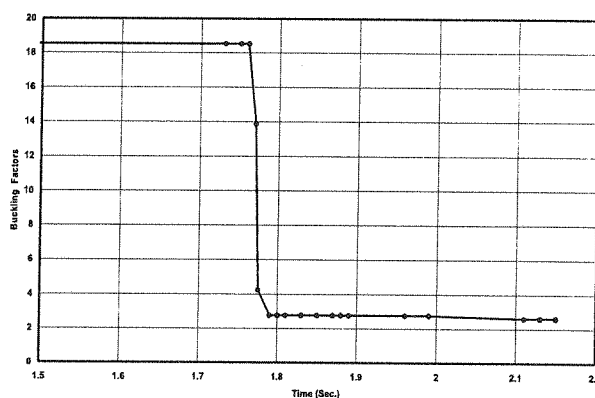
الف) زلزله طیس

NAGHAN EARTHQUAKE



ب) زلزله ناغان

BAM EARTHQUAKE



ج) زلزله بم

شکل (۸): تاریخچه زمانی ضریب کماتش سازه در اثر زلزله‌های طیس، ناغان و بم

۵- نتیجه گیری

- موقعیت و ترتیب تشکیل گره‌های پلاستیک بر روی ستون‌ها به ماهیت رکورد زلزله وابسته است. با این حال، گره‌های