



بررسی درجه آسیب پذیری لرزه ای برجهای آجری تاریخی نسبت به فاصله از مرکز زلزله

محمود رضا ماهری^۱، سحر زرنندی^۲، بهاره بصیرت^۲

۱- استاد بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی عمران، دانشگاه شیراز

maheri@shirazu.ac.ir

خلاصه

برجهای تاریخی بواسطه ویژگی های متفاوت دینامیکی که به دلیل فرم و تنوع در ابعاد هندسی دارند، در هنگام زلزله رفتارهایی کاملاً متفاوت با بسیاری از بناهای تاریخی دیگر از خود نشان می دهند. رفتار این بناها، علاوه بر بیشینه حرکت زمین، شدیداً متأثر از محتویات فرکانسی حرکت زمین و نوع خاک زیر بنا می باشد. در این مقاله، ابتدا تأثیر عواملی چون خصوصیات مصالح برج، شامل دانسیته و مدول الاستیک آجرکار و ویژگی های هندسی برج، شامل ارتفاع، قطر و ضخامت دیوار و همچنین نوع خاک زیر برج بر رفتار دینامیکی آن، به ویژه فرکانس های طبیعی برج مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس با در نظر گرفتن دو پارامتر متغیر دیگر، از جمله بزرگای زلزله و فاصله برج تا مرکز زلزله، میزان آسیب پذیری برجهای تاریخی با توجه به پنج متغیر یاد شده مشخص می گردند. جهت بررسی وضعیت آسیب پذیری برجها از روابط کاهیدگی معتبر استفاده شده و درجه آسیب پذیری با توجه به امکان اتفاق حداکثر تشدید دینامیکی برای یک برج خاص در فاصله ای مشخص در زلزله ای با بزرگای مشخص بدست می آید. از نتیجه گیری های عمده مقاله، یکی اهمیت تأثیر نوع خاک زیر پی بر درجه آسیب پذیری می باشد. همچنین نشان داده خواهد شد که فاصله برج تا مرکز زلزله و نسبتهای هندسی برج عوامل اصلی تعیین کننده میزان آسیب پذیری برجها می باشند.

کلمات کلیدی: برجهای تاریخی، آسیب پذیری لرزه ای، برجهای آجری، کاهیدگی

مقدمه

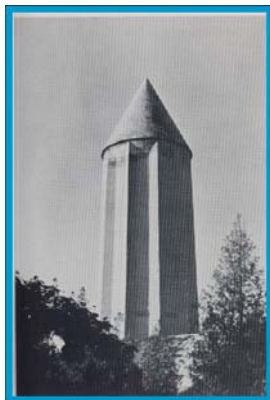
در این مقاله و در راستای طرحهای مقام سازی ابنیه تاریخی، آسیب پذیری لرزه ای برجهای آجری مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق براساس مطالعه و بررسی منابع تاریخی از زلزله های تاریخی و یا منابع اخیر از زلزله های اخیر و تاریخی انجام شده است. این تحقیق بر برجهای تاریخی ایران پس از اسلام تأکید دارد، زیرا که داده ها از رفتار برجها در زلزله های دوره های قبل از اسلام محدود می باشد. این ابنیه، هرچند از نظر اندازه و فرم سازه ای متفاوت می باشند ولی ویژگی های مشابهی دارند که یک بررسی مقایسه ای را امکان پذیر می سازد. این بناها اساساً سازه های منفردی هستند که نسبت ارتفاع به سطح مقطع قابل توجهی دارند. آنها یا به عنوان مناره مساجد، ویا برجهای بلند دیده بانی ساخته شده و یا دودکش های بلند کوره های آجرپزی می باشند که به علت قدمت از ارزش تاریخی برخوردار می باشند. بعضی از این برجها دارای تزئینات نما، بخصوص آجرکاری بسیار ارزشمند می باشند.

در بسیاری موارد تفاوت رفتاری برجهای تاریخی در مقایسه با بناهای دیگر از زلزله های ایران گزارش شده اند. در یک زلزله خاص دیده شده است که در ناحیه ای کلیه ابنیه تخریب شده ولی برجهای بلند سالم مانده اند، در صورتیکه از زلزله دیگر و یا از همان زلزله در ناحیه ای دیگر گزارش گردیده که برجها تخریب شده یا آسیب دیده اند بدون اینکه خسارتی به بناهای دیگر وارد شود. هم شتاب و هم فرکانسهای غالب حرکت زمین با دور شدن از مرکز زلزله دچار کاهیدگی می گردند. کاهیدگی شتاب اساساً باعث کاهیدگی درجه آسیب پذیری می شود. ولی کاهش فرکانس حرکت زمین با دور شدن از مرکز زلزله بواسطه وقوع پدیده تشدید در مواردی می تواند باعث افزایش آسیب پذیری برج گردد. از سوی دیگر، لاغری این ابنیه از آنها سازه هایی نرم با فرکانس طبیعی ارتعاش پایین ساخته است که معمولاً از محدوده فرکانسهای قوی بیشتر زلزله های نزدیک خارج می باشند، بنابراین احتمال مقاومت آنها در برابر چنین زلزله هایی بسیار می باشد. لذا بررسی ویژگی های دینامیکی برج و ویژگی های دینامیکی حرکت زمین در تعیین آسیب پذیری برج امری الزامی می باشد.

نمونه های متعددی از پابرجا ماندن این بناها در میان ویرانه های ابنیه دیگر مشاهده شده است. برج زیبای جام (ساخته شده بین سالهای ۱۱۶۳ و ۱۲۰۳ میلادی)، همچنین برج کج قیبرات (ساخته شده در اواخر قرن دوازدهم) و برج ۳۰ متری خسروگرد (شکل ۱) مربوط به ۸۰۰ سال پیش، نمونه هایی از این برجها می باشند که از زلزله های متعدد جان سالم بدر برده اند.

گروه دیگری از ابنیه آجری بلند بناهای منفرد با هندسه متقارن می باشند. این بناها، ساختمانهایی هستند که عمدتاً به عنوان آرامگاه افراد مهم اجتماعی، سیاسی یا مذهبی ساخته شده اند. پلان این ساختمانها دایروی یا چند ضلعی منظم می باشد. آنها دارای بازه های به نسبت کوچک بوده و به این جهت دارای نسبت دیوار به بازه بالا می باشند. مصالح عمده در ساخت این بناها، آجر پخته می باشد، هر چند که در نمونه هایی از سنگ نیز استفاده شده است. شکل سقفهای مدور این ابنیه به صورت نیمه کروی (گنبدی) و یا مخروطی شکل می باشد. از نمونه های مهم این ابنیه می توان به گنبدهای آجری و سنگی مربوط به دوره های سلجوقی، ایلخانیان و تیموریان اشاره نمود که در سرتاسر ایران پراکنده هستند. رفتار لرزه ای این نوع بناها در بررسی زمین لرزه های تاریخی بسیار مطلوب بوده است. تعداد زیادی از این سازه ها قرن ها زمین لرزه های مخرب را تحمل کرده و با حداقل خسارت برجای مانده اند. این ابنیه اکثر ضوابط یک سازه مقاوم در برابر زلزله را دارا بوده و به این دلیل رفتار مناسبی از خود در زمین لرزه ها نشان داده اند. تقارن کامل، سادگی پلان، در و پنجره های کوچک که به دیوارها قابلیت مقاومت درون صفحه را در همه جهت ها به نحو مطلوب می دهد و استفاده از مصالح مناسب مانند آجر پخته و ملات مناسب از جمله موارد مثبت این بناها از نقطه نظر مقاومت لرزه ای می باشند. اشاره های متعددی به سالم ماندن این تیپ بناها در زلزله های مخرب شده است. از جمله بنای ۵۵ متری هزار ساله گنبد کاووس را می توان نام برد که از زلزله های متعدد مخربی که در منطقه گرگان اتفاق افتادند بدون آسیب جان سالم بدر برده است. در این رابطه دو زلزله خاص قابل اشاره است، یکی زلزله سال ۱۴۳۶ میلادی با بزرگای تخمین زده شده $M=5.3$ و دیگری زلزله سال ۱۴۷۰ میلادی با بزرگای تخمین زده شده $M=6.5$ در استان مازندران تعداد زیادی از بناهای مشابه ولی کوچکتر مربوط به دوره سلجوقی، به دفعات تحت تأثیر زلزله های قوی قرار گرفتند و تخریب نشدند. آخرین زلزله از این دست، زلزله سال ۱۹۳۵ کسوت را می توان نام برد که با بزرگای $M=6.3$ در فاصله ده کیلومتری از گنبد لاجین اتفاق افتاد. این گنبد قدیمی که در سال ۱۰۲۲ میلادی (نزدیک به هزار سال قبل) ساخته شده در این زلزله کوچکترین خسارتی ندید [1].

ماهری [2] با استفاده از شواهد تاریخی یک مقیاس مناسب شدت برای ابنیه تاریخی ایران ارائه نموده است. این مقیاس براساس رفتار مشاهده شده انواع بناهای مورد نظر در زلزله های تاریخی و جدید بدست آمده است. در حدود یکصد زلزله تاریخی و جدید که برای آنها تخمینی از بزرگای امواج سطحی، موجود بوده است برای این منظور در نظر گرفته شده است. دسته ای از این ابنیه همان برجهای بلند و لاغر می باشند که محدوده های شدت تخریب و سلامت آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این نمودار دایره های سیاه بیانگر تخریب و یا آسیب دیدگی کلی بنا بوده و دایره های خالی بیانگر سالم ماندن بنا در زلزله می باشند.



گنبد کاووس



برج خسروگرد

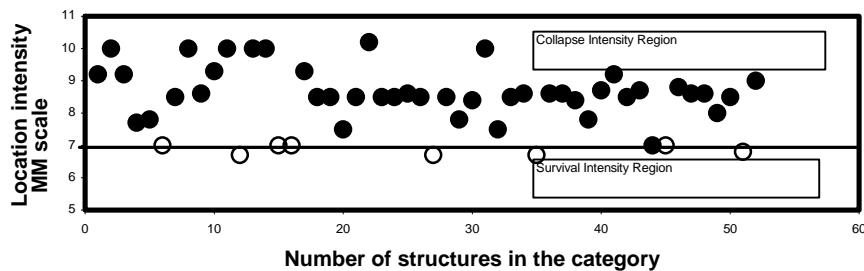


مناره علی- اصفهان

شکل ۱- نمونه هایی از برجهای تاریخی آجری ایران

تأثیر هندسه، خصوصیات مصالح و وضعیت خاک بر پیروید ارتعاش برج

نظر به اینکه آسیب پذیری برج ها نسبت به زلزله در فاصله های مختلف بستگی زیاد به خصوصیات دینامیکی برج بخصوص فرکانس طبیعی غالب آن داشته، در اینجا به بررسی تأثیر عوامل موثر بر این ویژگی های دینامیکی می پردازیم. از عوامل موثر اصلی بر رفتار دینامیکی یک برج، هندسه برج بصورت نسبت ارتفاع به قطر و نسبت قطر به ضخامت را می توان نام برد. این نسبتها تأثیر مشخص خود را بر سختی و جرم برج و در نتیجه بر فرکانسهای طبیعی غالب آن خواهند گذاشت.



شکل ۲- محدوده های شدت "تخریب" و "سلامت" برای ساختمان های بلند شامل مناره ها برجهای بلند و سردرها [2]

خصوصیات مصالح از پارامترهای موثر دیگر بر رفتار دینامیکی برج می باشند. این پارامترها، به ویژه دانسیته و مدول الاستیک مصالح، هر چند که نسبت به هندسه برج از اهمیت ثانویه ای برخوردار می باشند، ولی می توانند همچنان تاثیر به سزایی در وضعیت آسیب پذیری برج داشته باشند. پارامتر بسیار مهم دیگری که خصوصیات دینامیکی یک برج را تحت تاثیر قرار می دهد، شرایط تکیه گاهی و یا به عبارت دیگر وضعیت خاک زیر برج می باشد. در یک سری آنالیزهای پارامتریک تاثیر چهار پارامتر فوق الذکر بر رفتار دینامیکی برجهای آجری مورد بررسی قرار گرفتند. برای آنالیز دینامیکی و تعیین فرکانسها و مدهای طبیعی غالب برجها از برنامه ANSYS استفاده گردید. مصالح برج با استفاده از المان Solid95 مدل گردیده و برای خاک زیر پی از المانهای فنر معادل استفاده گردید.

در ابتدا برای راست آزمایی مدل‌های عناصر محدود مورد استفاده، آنالیز اولیه ای بر روی برج سنت برناردینو (St. Bernardino tower) به عمل آمد. Liaw و Chopra [3] و ماهری و همکاران [4] در گذشته این برج را آنالیز دینامیکی نموده و نتایج ارائه شده در جدول شماره (۱) را بدست آوردند. این برج با همان شرایط و خصوصیات در نظر گرفته شده در منبع [3] و با استفاده از برنامه ANSYS مدل شده و نتایج برای مدهای اول تا سوم جهت مقایسه در جدول (۱) آورده شده اند. بدست آوردن جواب یکسان برای مود اول و جوابهای نزدیک به یکدیگر برای مدهای دوم و سوم بیانگر صحت و دقت مدل بکار رفته می باشد.

جدول ۱- مقایسه فرکانسهای ارتعاش برج سنت برناردینو (Hz)

Ref. [3]			ANSYS (This study)		
$f1$	$f2$	$f3$	$f1$	$f2$	$f3$
۲,۴۱	۱۲,۱۵	۲۷,۲۲	۲,۴۱	۱۲,۲۴	۲۷,۹۴

برای بررسی متغیر هندسه، سه نوع هندسه حدی در نظر گرفته شد. برج حقیقی خرم آباد به ارتفاع $L=25.0m$ ، قطر متوسط $D=5.6m$ و ضخامت $t=0.7m$ بعنوان حد متوسط (مورد تیپ) و دو برج فرضی دیگر یکی به ارتفاع $L=10.0m$ ، قطر $D=5.0m$ و ضخامت $t=1.0m$ و دیگری به ارتفاع $L=35.0m$ ، قطر متوسط $D=5.0m$ و ضخامت $t=1.0.7m$ بعنوان حدود کوتاه و بلند در نظر گرفته شدند. برای ویژگی های مصالح، دانسیته آجر کار با چهار عدد متغیر $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ ، $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ ، $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ ، $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$ بررسی شده و مدول الاستیک آجر کار با متغیرهای $E = 1.0E9 \text{ N/m}^2$ ، $E = 2.0E9 \text{ N/m}^2$ ، $E = 4.0E9 \text{ N/m}^2$ ، $E = 5.0E9 \text{ N/m}^2$ تحلیل شدند. برای وضعیت خاک زیر برج نیز چهار نوع خاک تعریف شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران تحت انواع I، II، III، IV بعنوان متغیر در نظر گرفته شدند. در این مجموعه آنالیزهای پارامتریک، هندسه برج خرم آباد، دانسیته $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ ، مدول الاستیک $E = 2.0E9 \text{ N/m}^2$ و خاک تیپ III بعنوان پارامترهای تیپ در نظر گرفته شدند.

در این تحقیق جهت مدل سازی خاک زیر برج از فنر معادل استفاده شده است. سختی معادل فنرها نیز از رابطه توصیه شده در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانها [5] استفاده شده است. این رابطه بصورت زیر تعریف شده است:

$$K = \frac{6.83G}{1-\nu} \quad (1)$$

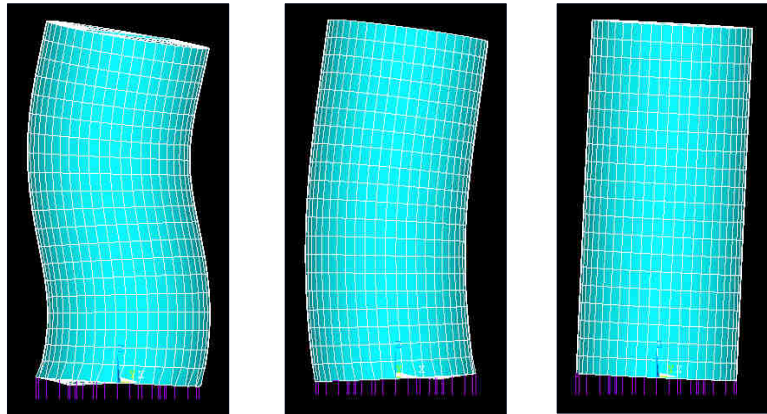
در رابطه فوق: K سختی معادل واحد عرض پی، ν ضریب پواسون و G با استفاده از G_0 که از رابطه زیر بدست می آید محاسبه می شود:

$$G_0 = \frac{\gamma V_s^2}{g} \quad (2)$$

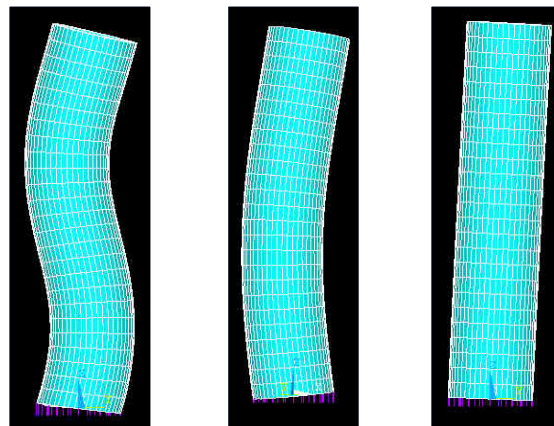
که γ وزن مخصوص خاک (در این تحقیق برابر با 2.1 ton/m^3) و V_s سرعت موج برشی در خاک بوده که با توجه به خاکهای چهارگانه در نظر گرفته شده قابل محاسبه می باشد.



جمعا ۳۰ تحلیل برای ۳ برج یادشده با متغیرهای تعریف شده انجام گردیده و فرکانسهای طبیعی و مودهای ارتعاش اصلی برجهای در هر تحلیل بدست آمد. شکلهای ۳ و ۴ سه مود ارتعاش اصلی به ترتیب برج کوتاه و برج متوسط را با پارامترهای تیپ نشان میدهند. مودهای محیطی همراه با این مودهای جانبی همه از نوع $m=1$ یا بدون تغییرات می باشد.



شکل ۳- مودهای اصلی ارتعاش برج تیپ کوتاه



شکل ۴- مودهای اصلی ارتعاش برج تیپ متوسط

نتایج حاصل از این آنالیزهای پارامتریک بصورت پیوندهای دو مود اصلی برج T1 و T2 در جدول شماره ۲ آورده شده اند. این نتایج همچنین در نمودارهای شماره ۵ تا ۷ نیز نشان داده شده اند.

در نمودار ۵ تاثیر تغییرات دانسیته آجرکار بر روی پیوند مود اول برجهای قابل مشاهده است. این تغییرات خطی می باشند. از سوی دیگر تاثیر تغییرات برای برجهای کوتاه و چاق به نظر بسیار محدود می آید ولی هر چه به ارتفاع برج اضافه می گردد، تاثیر دانسیته آجر کار مشهودتر می گردد. دلیل اصلی این امر آنست که برجهای کوتاه دارای سختی بالایی بوده و پیوند ارتعاش بیشتر متأثر از سختی بوده و تغییرات دانسیته و جرم، تاثیر محدودتری بر پیوند ارتعاش می گذارند، در صورتیکه با افزایش ارتفاع برج و کاهش سختی آن تغییرات دانسیته یا جرم خود را بیشتر نشان می دهند.

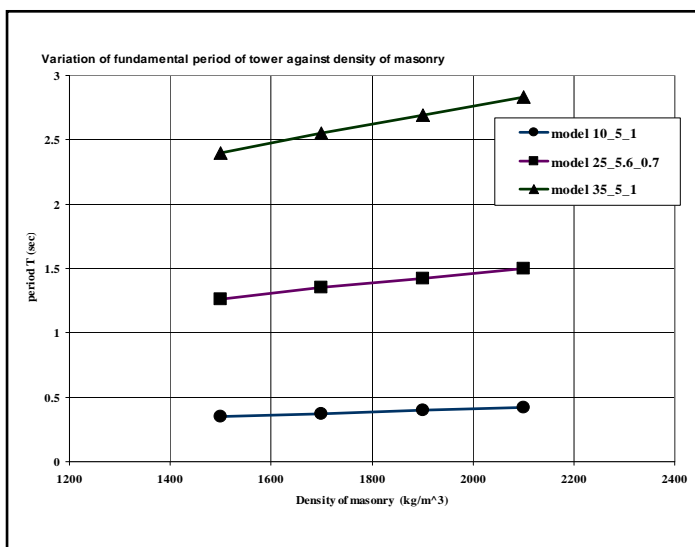
نمودار ۶، تاثیر تغییرات مدول الاستیک آجرکار را بر فرکانس غالب برج نشان می دهد. مشاهده می گردد که مشابه تاثیر دانسیته آجرکار، تغییر در مدول الاستیک آجرکار برای برجهای کوتاه و چاق تاثیر چندانی در پیوند ارتعاش آنها نگذاشته ولی با افزایش ارتفاع برج و کاهش تاثیر هندسه بر سختی، تاثیر مدول الاستیک بیشتر می گردد. این تاثیر بخصوص در مدولهای کمتر بیشتر خود را نشان می دهد.

تاثیر وضعیت خاک زیر برج بر پیوند اصلی برج در نمودار ۷ قابل بررسی است. در مقایسه با خصوصیات مصالح برج، تاثیر وضعیت خاک زیر پی بر مقدار پیوند ارتعاش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این تاثیر برای خاکهای سخت در هر حال محدود ولی برای خاکهای نرم بسیار قابل توجه می باشد. به گونه ای که تغییر شدیدی در پیوند ارتعاش برج در خاک نوع IV در مقایسه با خاکهای دیگر روی می دهد.

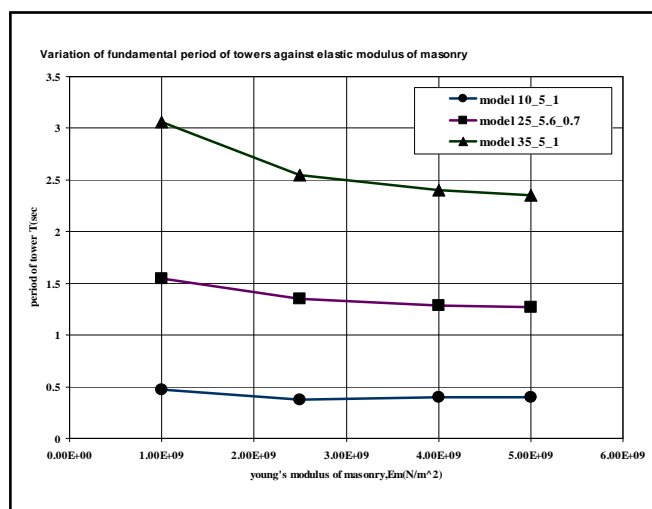


جدول ۲ - پریودهای ارتعاش برجهای مورد تحلیل

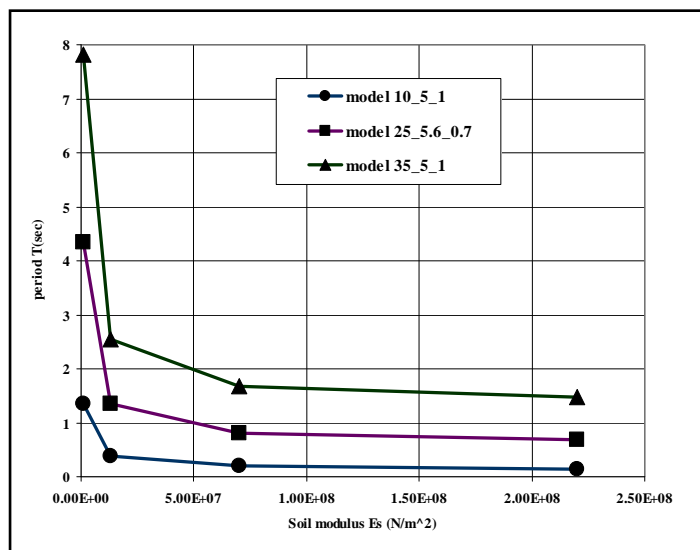
Density (kg/m ³)	E (N/m ²)	Soil Type	Short Tower		Medium Tower	
			T1	T2	T1	T2
۱۵۰۰	2.0E9	III	۰,۳۵	۰,۰۳۵	۱,۲۶	۰,۱۲۸
۱۷۰۰	2.0E9	III	۰,۳۸	۰,۰۴۰	۱,۳۵	۰,۱۳۷
۱۹۰۰	2.0E9	III	۰,۴۰	۰,۰۴۰	۱,۴۲	۰,۱۴۴
۲۱۰۰	2.0E9	III	۰,۴۲	۰,۰۴۰	۱,۵۰	۰,۱۵۲
۱۷۰۰	1.0E9	III	۰,۴۷	۰,۰۷۰	۱,۵۵	۰,۲۱۰
۱۷۰۰	4.0E9	III	۰,۴۰	۰,۰۳۰	۱,۲۹	۰,۱۰۹
۱۷۰۰	5.0E9	III	۰,۳۹	۰,۰۲۰	۱,۲۷	۰,۰۹۸
۱۷۰۰	2.0E9	I	۰,۱۵	۰,۰۲۹	۰,۶۹	۰,۱۲۴
۱۷۰۰	2.0E9	II	۰,۲۰	۰,۰۲۹	۰,۸۱	۰,۱۲۹
۱۷۰۰	2.0E9	IV	۱,۳۵	۰,۰۳	۴,۳۵	۰,۱۴۰



شکل ۵ - تاثیر دانسیته آجرکار بر پریود ارتعاش اصلی برج ها



شکل ۶ - تاثیر مدول الاستیک آجرکار بر پریود ارتعاش اصلی برج ها



شکل ۷ - تاثیر نوع خاک بر پریود ارتعاش اصلی برج ها

تعیین آسیب پذیری بر اساس بزرگای زلزله و فاصله از مرکز

پارامترهای اصلی حرکت زمین که بر رفتار لرزه ای یک سازه تاثیر می گذارند شامل شدت حرکت یا شتاب حرکت زمین و محتویات فرکانسی حرکت و یا محدوده فرکانسهای قوی زلزله می باشد. مورد اول ناشی از ماهیت نیروی موثر زلزله بر سازه که یک نیروی اینرسی و در نتیجه وابسته به شتاب حرکت است می باشد و مورد دوم به تشدید دینامیکی ناشی از نزدیکی فرکانس قوی حرکت زمین به فرکانس مود و یا مودهای غالب سازه مربوط می گردد.

اندازه شتاب حرکت زمین خود متاثر از بزرگای زلزله و عمق کانونی می باشد. محققین متعددی سعی در برقراری روابطی تجربی و تقریبی بین شدت (I_0) و بزرگای زلزله (M) نموده اند. از این مجموعه رابطه ارائه شده توسط امبریز [1] بیشتر مورد توجه و استفاده می باشد. امبریز این رابطه را به اینگونه مشخص می نماید:

$$M = 0.77(I_0) - 0.07 \quad (3)$$

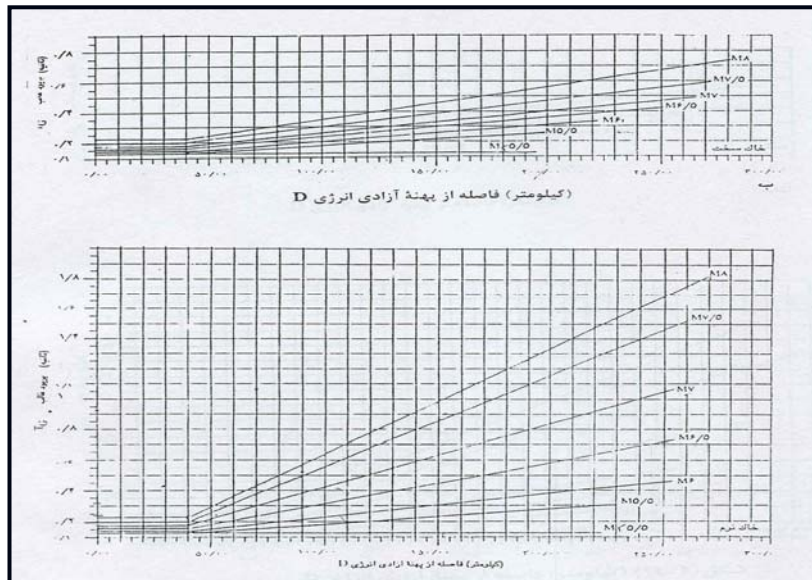
از طرف دیگر، نظر به اینکه با حرکت امواج زلزله بر روی سطح، کاهیدگی هم در اندازه شتاب و هم در فرکانس حرکت زمین روی می دهد، از این دو مورد کاهیدگی در فرکانس حرکت می تواند اثر سوئی بر رفتار لرزه ای برجهای با فرکانس پایین در فاصله های دور از مرکز زلزله نماید. لذا دو مورد فوق، یکی بزرگای زلزله و دیگری فاصله برج مورد نظر از مرکز زلزله می توانند تاثیر به سزایی بر درجه آسیب پذیری این گونه برجها داشته باشند. برای تعیین پریود غالب حرکت زمین در فاصله های متفاوت از مرکز زلزله روابط کاهیدگی متعددی ارائه گردیده است. در اینجا با توجه به موضوع مورد بررسی از روابط کاهیدگی ارائه شده توسط زارع برای ایران مرکزی استفاده شده است [6]. زارع با ارائه روابط کاهیدگی مناسبی برای خاکهای سخت و نرم، پریود غالب حرکت زمین را بر اساس فاصله از مرکز زلزله بصورت نمودارهای شکل ۵ ارائه نموده است. پریود غالب زمین پریودی است که بر اساس طیفهای پاسخ شتاب (Acceleration Response Spectra) در هر مکان، از زمین آزاد بر روی انواع خاکهای مختلف و همچنین در محلها و طبقات ساختمانها، بدست آمده باشد. معمولا پریود معادل با اولین نقطه اوج بر روی طیف شتاب را به عنوان پریود غالب در نظر می گیرند. در این تحقیق از نمودارهای شکل ۸ برای مشخص کردن پریود غالب حرکت زمین در فاصله های مختلف استفاده شده است.

برای تعیین آسیب پذیری لرزه ای برجها نسبت به فاصله آنها از مرکز زمین لرزه و برای زلزله های با بزرگای متفاوت، پریود غالب زمین در نمودارهای شکل ۸ و مشابه آنها برابر پریود ارتعاش مود اول برج مورد نظر (وضعیت تشدید دینامیکی) قرار داده شده و به ازای هر بزرگای زلزله یک فاصله استخراج گردید. این فاصله به عنوان فاصله بحرانی یا فاصله ای که بیشترین آسیب پذیری برج در آن اتفاق خواهد افتاد در نظر گرفته شد. نتایج حاصل برای برج کوتاه با خصوصیات مصالح تپ واقع بر چهار نوع مختلف خاک در جدول شماره ۳ آورده شده است. نتایج مندرج در این جدول بیانگر نکات جالبی می باشد. همانگونه که مشخص است، زمانیکه چنین برجی بر روی خاک نرم واقع باشد آسیب پذیری آن نسبت به زلزله های قوی کمتر از آسیب پذیری آن نسبت به زلزله های متوسط می باشد. این مسئله با توجه به اینکه پریود غالب حرکت زمین بر روی چنین خاکی بسیار بیشتر از پریود مود اول ارتعاش برج می باشد، قابل توجیه است. بیشترین آسیب پذیری این برج واقع بر روی خاک نرم است که در فاصله ای بین ۵۰ تا ۶۰ کیلومتری از مرکز یک زلزله متوسط ($M=6.0$, $M=5.5$) قرار داشته باشد.

بر خلاف خاک نرم، در صورتیکه برج بر روی خاک تپ II و یا III قرار داشته باشد، آسیب پذیری حداکثر آن در زلزله های بزرگ در فواصلی نزدیکتر به مرکز زلزله (کمتر از ۷۰ کیلومتر) و در زلزله های متوسط در فواصلی دورتر از مرکز زلزله (بیش از ۱۰۰ کیلومتر) می باشد. از سوی دیگر وضعیت



آسیب پذیری برج بر روی خاک سخت (تیپ IV) کاملاً متفاوت از خاکهای دیگر می باشد. در این وضعیت برج تنها نسبت به زلزله های قوی آسیب پذیر بوده و آن هم در فواصل نسبتاً دور نسبت به مرکز زلزله.



شکل ۸ - نمودارهای کاهیدگی برای ایران مرکزی [6]

وضعیت آسیب پذیری برجهای متوسط نسبت به فاصله آنها از مرکز زمین لرزه و بزرگای آن نیز کاملاً با وضعیت بیان شده برای برجهای کوتاه فرق می کند. جدول شماره ۴ وضعیت آسیب پذیری برج متوسط واقع بر خاکهای مختلف را نشان می دهد. برای این برجها، حداکثر آسیب پذیری بر روی خاکهای تیپ I، II، و III، در زلزله های قوی و در فواصل نسبتاً دور (بیش از ۲۰۰ کیلومتر) روی می دهد.

جدول ۳ - فاصله بیشترین آسیب پذیری (تشدید دینامیکی) برج کوتاه از مرکز زلزله (کیلومتر)

Soil Type	Period of Tower	Magnitude (M)						
		۸,۰	۷,۵	۷,۰	۶,۵	۶,۰	۵,۵	<5.5
I	۰,۱۵	-	-	-	-	۵۰	۶۰	-
II	۰,۲۰	-	<40	۵۵	۷۰	۱۰۰	۱۳۰	-
III	۰,۳۸	۶۰	۷۰	۹۰	۱۲۵	۲۰۰	۳۰۰	-
IV	۱,۳۵	۲۰۰	۲۳۰	-	-	-	-	-

جدول ۴ - فاصله بیشترین آسیب پذیری (تشدید دینامیکی) برج متوسط از مرکز زلزله (کیلومتر)

Soil Type	Period of Tower	Magnitude (M)						
		۸,۰	۷,۵	۷,۰	۶,۵	۶,۰	۵,۵	<5.5
I	۰,۱۵	265	-	-	-	-	-	-
II	۰,۲۰	۳۱۰	-	-	-	-	-	-
III	۰,۳۸	۲۰۵	۲۳۵	-	-	-	-	-
IV	۱,۳۵	-	-	-	-	-	-	-

نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر پارامترهای خصوصیات مصالح، هندسه و نوع خاک زیر پی بر رفتار دینامیکی برجهای آجری و وضعیت آسیب پذیری این برجها با توجه به موقعیت آنها نسبت به مرکز زلزله مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه گیریهای اصلی این تحقیق به شرح زیر می باشد.

- تاثیر دانسیته مصالح آجر کار بر روی پیرو ارتعاش برج خطی می باشد. این تاثیر برای برجهای کوتاه و قطور محدود ولی برای برجهای بلند قابل توجه می باشد.



- ۲- تاثیر مدول الاستیک آجر کار، در محدوده های حقیقی، بر روی پریود ارتعاش برج محدود می باشد.
- ۳- تاثیر نوع خاک بر روی پریود ارتعاش برج قابل توجه می باشد. این تاثیر برای خاکهای سخت محدودتر ولی برای خاکهای نرم بسیار زیاد می باشد.
- ۴- برجهای کوتاه و چاق واقع بر خاکهای تیپ II و III به زلزله های قوی در فاصله های نزدیک آسیب پذیری شدیدی دارند. این برجها آسیب پذیری محدودی بر روی خاک تیپ IV نسبت به زلزله های قوی در فاصله های دور از خود نشان می دهند. آنها همچنین آسیب پذیری محدودی بر روی خاک تیپ I به زلزله های متوسط در فاصله های نزدیک دارند.
- ۵- برجهای متوسط و بلند و باریک آسیب پذیری محدودی بر روی خاکهای تیپ I، II و III به زلزله های قوی در فاصله های دور از خود نشان می دهند. این برجها در صورتیکه بر روی خاک تیپ IV قرار داشته باشند اصلا آسیب پذیر نمی باشند.

منابع

- [1] Ambraseys, N. N., Melville, C. P. (1982) "A history of Persian earthquakes," Cambridge University Press, London.
- [2] Maheri, M. R. (2004) "Seismic vulnerability of post Islamic monumental structures in Iran, a review of historical sources", *ASCE Journal of Architectural Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 160-166.
- [3] Niaw, C. Chopra, A.K., (1973) "Earthquake response of asymmetric tower structures surrounded by water", EERC Report No. 73-25.
- [4] Maheri, M. R., Taylor, C. A, Blakeborough A., (1986) "Comparative numerical studies of hydrodynamic effects in dam structures", Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, pp 6.8.25-6.8.32.

[5] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانها (۱۳۸۶) ، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

[6] زارع. م رابطه های مناسب برای بیشینه بزرگا و بیشینه شتاب افقی بر اساس زمین لرزه های ایران (۱۳۷۳) ، پژوهشنامه موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران