



تحلیل دینامیکی پوسته بتن مسلح مخروطی شکل ناقص

فرزاد نباتی^۱، فریدون رضایی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات ساوه، nabati.farzad@gmail.com

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

چکیده

پوسته‌های مخروطی شکل ناقص بتن مسلح مانند برج‌های آبگیر، دودکش‌ها، سیلواها، به دلیل هزینه گزاف ساخت و اهمیت بالای عملکردی بدون انقطاع، لازم است تا با دقت بالاتری در مقابل زلزله طراحی شوند. در این پژوهش، در ابتدا به بررسی مطالعات مقدماتی صورت گرفته بر روی پوسته‌های مخروطی شکل و سیر کلی مباحث صورت گرفته بر روی این‌گونه از سازه‌ها خواهیم پرداخت و در نهایت با انتخاب شتاب‌نگاشت‌های متناسب با مکان ساخت نمونه‌ای از این قبیل سازه‌ها به تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه فوق‌الذکر خواهیم پرداخت. در نهایت با مقایسه جابه‌جایی‌های صورت گرفته در سازه و محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده از سوی استاندارد ۲۸۰۰ ایران نشان خواهیم داد که تحلیل و طراحی سازه در محدوده الزامات این آیین‌نامه قرار دارد.

کلمات کلیدی: پوسته مخروطی ناقص، بتن مسلح، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

مقدمه

بررسی‌های ابتدایی در زمینه ارتعاش پوسته‌ها به دهه ۳۰ میلادی بازمی‌گردد که در آن سال‌ها لیس^۱ [۱] به بررسی‌های ابتدایی این پدیده پرداخت، اما کاربرد روی پوسته‌های مخروطی به دلیل پیچیدگی‌های ریاضیاتی، شامل خصوصیات هندسی و دینامیکی به نسبت پوسته‌های استوانه‌ای از پیشرفت کمتری برخوردار شد. در سال ۱۹۶۰ گلد برگ^۲ [۲] به مطالعه مودها و فرکانس‌های مربوط به یک پوسته مخروطی شکل پرداخت. ایشان در مطالعه خود مدعی ایجاد روشی بر پایه انتگرال‌گیری عددی شد که با استفاده از آن قادر بود تا نه تنها به مطالعه ارتعاشی پوسته‌ها بپردازد بلکه می‌توانست تنش‌ها و تغییر شکل‌های پوسته بر اثر بارهای استاتیکی و هارمونیک را نیز بدست آورد. در دهه ۷۰ میلادی و استفاده از روش اجزای محدود محققانی مانند یوآدا به بررسی ارتعاش مخروط‌های ناقص با ضخامت ثابت پرداختند، در سال ۱۹۷۵ پژوهشگری به نام روس^۳ [۳] با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی ماتریس‌های جرم و سختی پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی را محاسبه نمود. در سال ۱۹۸۷ تامبیراتنام و تویندران^۴ [۴] به طراحی بهینه پوسته‌ها برای ارتعاش آزاد آن‌ها با توجه به کمترین فرکانس ممکن برای مودهای متقارن پرداختند. در این مطالعه شعاع داخلی پایه و شیب پوسته داخلی ثابت نگه‌داشته شده است درحالی‌که شیب پوسته خارجی بدون ایجاد ناپیوستگی به صورت تکه‌های ثابت در نظر گرفته شده است. سیواداس و گانسان^۵ [۵] در سال ۱۹۸۹ در ابتدا به بررسی ارتعاش آزاد سیلندرهای استوانه‌ای کنسولی با ضخامت متغیر پرداختند. آن‌ها در کار بررسی سیلندرهای استوانه‌ای از روش اجزای محدود نیمه‌تحلیلی استفاده نمودند و تغییرات ضخامت را به صورت خطی و سهمی وار متصور شدند. در ادامه سیواداس و گانسان [۶] در سال ۱۹۸۹ به بررسی ارتعاش آزاد مخروط‌های کنسولی با ضخامت متغیر با ضخامت متغیر پرداختند. در این حالت نیز مانند حالت پیشین برای حل کردن روابط

دینامیک سازه و بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی سازه از تقریب‌های اولیه لاو استفاده نمودند. این دو همچنین [۷] در سال ۱۹۸۹ به مطالعه ارتعاش در پوسته‌های اوتوتروپیک با ضخامت متغیر پرداختند. در این بررسی مخروط‌های با شرایط مرزی دوسرگیردار و دو سر مفصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۱ بوچانان و وانگ [۸] به بررسی اشکال مودی و فرکانس‌های مخروط‌های ضخیم پرداختند. در این پژوهش تأثیر شرایط مرزی متفاوت مانند دو سر آزاد، دوسرگیردار و یکسر گیردار-یک سر آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. آنان در این بررسی از روش اجزای محدود برای بررسی ارتعاش پوسته‌های مخروطی استفاده نموده‌اند و از معادلات سه‌بعدی کرنش-جابجایی برای رابطه‌بندی المان محدود در سیستم مختصات مخروطی بهره‌برده‌اند.

انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

با توجه به ماهیت دینامیکی زلزله و تغییر مداوم اندازه و جهت نیروهای ایجادشده در ارتفاع سازه، پدیده تشدید حاصل از نزدیکی فرکانس سازه و فرکانس بارگذاری حاصل از بار دینامیکی اعمای برسازه در این بخش ارائه توضیحاتی در مورد نحوه انتخاب رکوردهای مناسب جهت انجام تجلیل دینامیکی تاریخچه زمانی متناسب با بندهای ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۹] خواهیم پرداخت. سپس با توجه به توضیحات ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ مبنی بر مقیاس کردن رکوردهای انتخابی برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، رکوردهای انتخاب‌شده را به مقیاس درخواستی آورده. در مرحله بعد با اعمال این رکوردها به پایه سازه به تحلیل سازه خواهیم پرداخت و نتایج حاصل از این تحلیل را ارائه می‌نماییم.

شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله باشند. برای نیل به این هدف هفت زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی زلزله‌های مختلف ثبت شده که دارای ویژگی‌های زیر باشند انتخاب گشته‌اند:

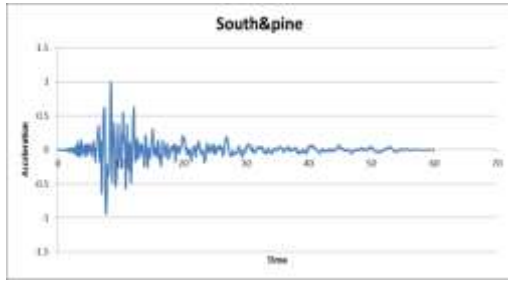
شتاب‌نگاشت‌ها متعلق به زلزله‌هایی باشند که شرایط زلزله طرح را ارضا کنند و در آن‌ها آثار: بزرگا، فاصله از گسل، سازوکار چشمه لرزه زا در نظر گرفته شده باشد.

ساختگاه‌های شتاب‌نگاشت‌ها باید به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکنیکی، لرزه‌شناسی و بخصوص مشخصات لایه‌های خاک با زمین محل ساختمان تا حد امکان، مشابهت داشته باشند.

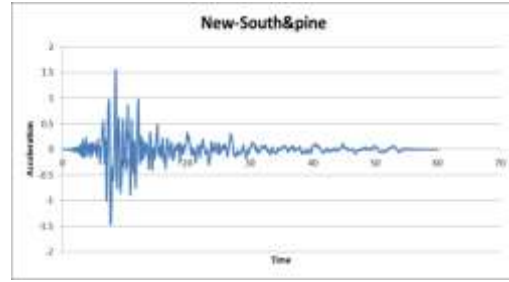
مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب‌نگاشت‌ها حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هرکدام بیشتر است، باشد. مدت زمان حرکت شدید شتاب‌نگاشت‌ها را می‌توان از روش‌های معتبر مانند روش توزیع جمع‌آوری تعیین کرد.

بر همین اساس شتاب نگاشت‌های انتخابی که از پایگاه داده مربوط به سال ۲۰۱۰ سایت PEER [۱۰] و متناسب با طیف استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای منطقه‌ای با نوع خاک ۳ گردآوری شده‌اند در جدول زیر و با ذکر جزئیات مرتبط با استاندارد ۲۸۰۰ ایران ارائه شده‌اند.

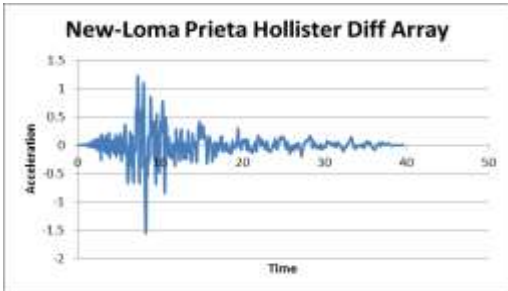
بر اساس موارد ذکر شده در ذیل بند ۲-۴-۱-۲-۴ استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم، پس از انتخاب زوج شتاب‌نگاشت‌های متناسب با این استاندارد، باید این شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس روش معرفی شده در این استاندارد به مقیاس درآورده شوند. شکل رکوردهای شتاب انتخاب شده قبل و بعد از اعمال این ضریب در اشکال زیر نشان داده شده‌اند. عدد مربوط به ضریب مقیاس رکوردهای شتاب انتخاب شده برابر با ۱/۵۷ خواهد بود، که اعمال این ضریب در حداکثر شتاب‌های رکوردهای موجود در اشکال زیر به طور واضح نشان داده شده است. پس از انتخاب و مقیاس سازی رکوردهای شتاب متناسب با منطقه‌ای که این سازه در آن قرار دارد این شتاب‌ها در قالب نیروهای دینامیکی تحریک کننده که از طرف زمین بر سازه وارد می‌شوند به پایه سازه اعمال خواهند شد.



شکل ۱: شتاب زلزله Loma Prieta قبل از مقیاس کردن



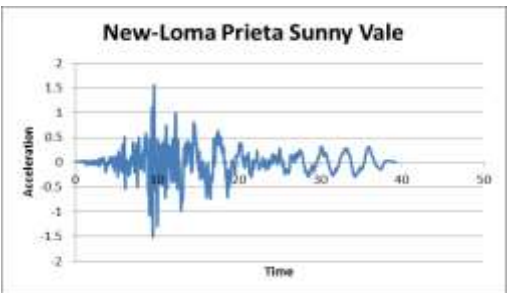
شکل ۲: شتاب زلزله Loma Prieta پس از مقیاس کردن



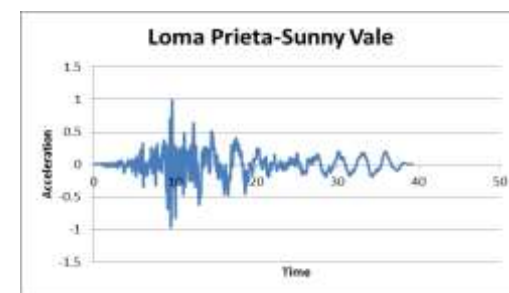
شکل ۳: شتاب زلزله Loma Prieta قبل از مقیاس کردن



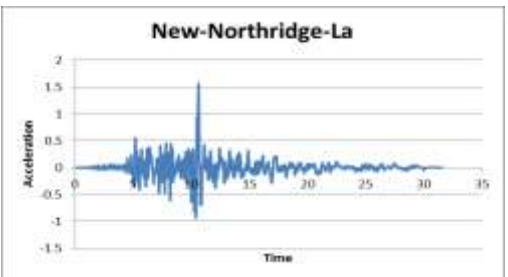
شکل ۴: شتاب زلزله Loma Prieta پس از مقیاس کردن



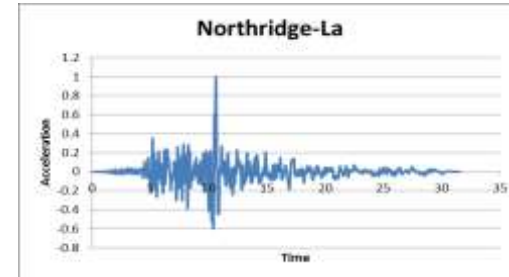
شکل ۵: شتاب زلزله Loma Prieta قبل از مقیاس کردن



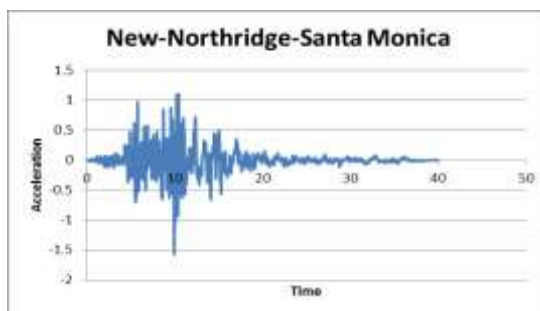
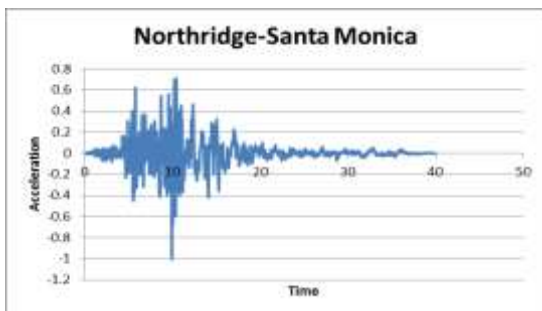
شکل ۶: شتاب زلزله Loma Prieta پس از مقیاس کردن



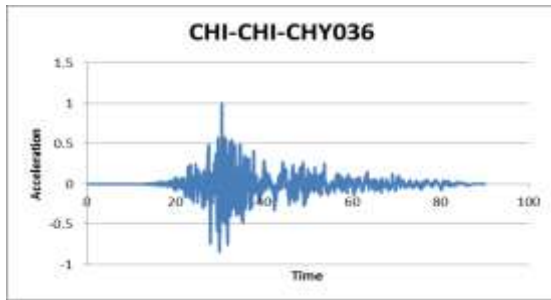
شکل ۷: شتاب زلزله Northridge قبل از مقیاس کردن



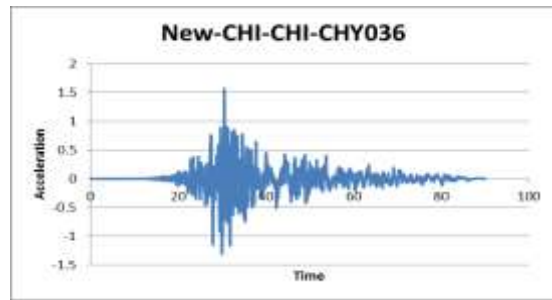
شکل ۸: شتاب زلزله Northridge پس از مقیاس کردن



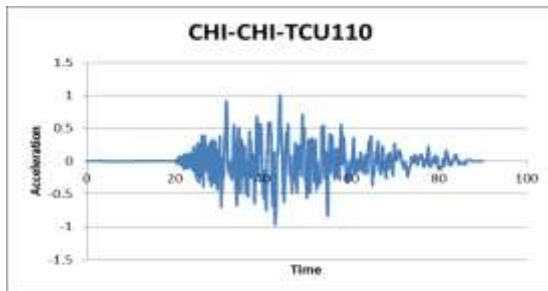
شکل ۹: شتاب زلزله Northridge قبل از مقیاس کردن



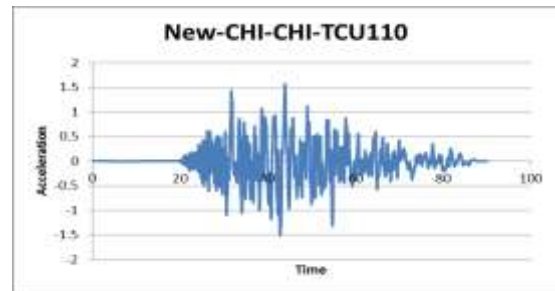
شکل ۱۰: شتاب زلزله Northridge پس از مقیاس کردن



شکل ۱۱: شتاب زلزله CHI-CHI قبل از مقیاس کردن



شکل ۱۲: شتاب زلزله CHI-CHI پس از مقیاس کردن



شکل ۱۳: شتاب زلزله CHI-CHI قبل از مقیاس کردن

شکل ۱۴: شتاب زلزله CHI-CHI پس از مقیاس کردن

جدول ۱- رکوردهای انتخاب شده جهت تحلیل دینامیکی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

ردیف	نام زلزله	عمق زلزله (m)	زمان مؤثر (sec)	بزرگا	فاصله (m)	نوع گسل	سرعت موج برشی (m/s)
۱	Chi-Chi Taiwan, CHY036	۶/۸	۲۶/۴	۷/۶۲	۱۶/۱	معکوس	۲۳۳/۱
۲	Chi-Chi Taiwan, TCU110	۶/۸	۳۴/۶۲	۷/۶۲	۱۱/۱	معکوس	۲۱۲/۷
۳	Northridge-01, Santa Monica	۲۱	۱۰/۷۴	۶/۶۹	۱۷/۳	معکوس	۳۳۶/۲
۴	Northridge-01, LA Saturn St	۲۱	۱۱/۵۳	۶/۶۹	۲۱/۲	معکوس	۳۰۸/۷
۵	Loma Prieta, Hollister South&Pine	۱۷/۵	۱۶/۴	۶/۹۳	۲۷/۷	معکوس	۳۷۰/۸
۶	Loma Prieta, Hollister Diff Array	۱۷/۵	۱۲/۵۱	۶/۹۳	۲۴/۵	معکوس	۲۱۵/۵
۷	Loma Prieta, Sunny Vale	۱۷/۵	۲۵/۲۸	۶/۹۳	۲۳/۹	معکوس	۲۶۷/۷

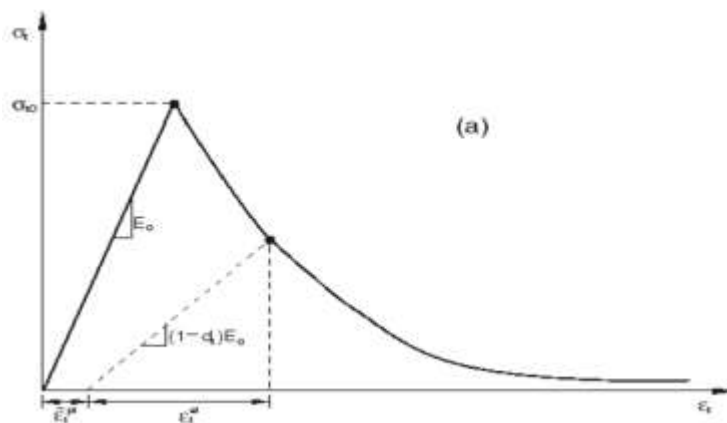
مشخصات هندسی سازه مورد بررسی

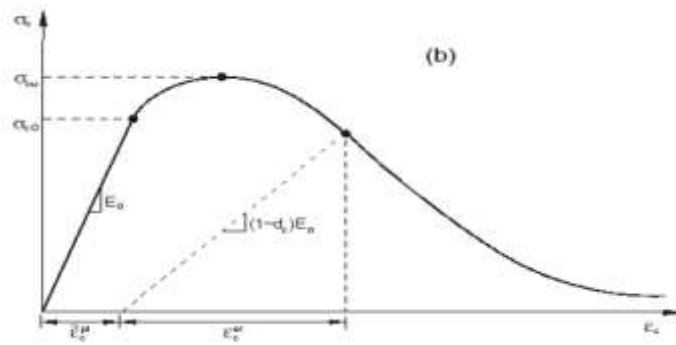
سازه بررسی شده در این تحقیق، مخروطی ناقص به ارتفاع ۵۰ متر است که در پایه دارای ضخامتی برابر با ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد که این ضخامت در بالای سازه به ۳۰ سانتی‌متر کاهش پیدا خواهد کرد. این سازه برای منطقه بندرعباس واقع در جنوب کشور با خاک نوع ۳ مورد بررسی قرار گرفته است که تمامی شتاب‌نگاشت‌هایی که در بالا مورد بحث قرار گرفته‌اند نیز متناسب با این منطقه و طیف استاندارد ۲۸۰۰ که خود نیز متناسب با این منطقه بوده است می‌باشند. برای مدل‌سازی و تحلیل این مخروط از نرم‌افزار Abaqus نسخه ۱۰.۱ [۱۱] استفاده شده است، که در شکل زیر نمونه‌ای از مدل ساخته شده در این نرم‌افزار به نمایش در آمده است.



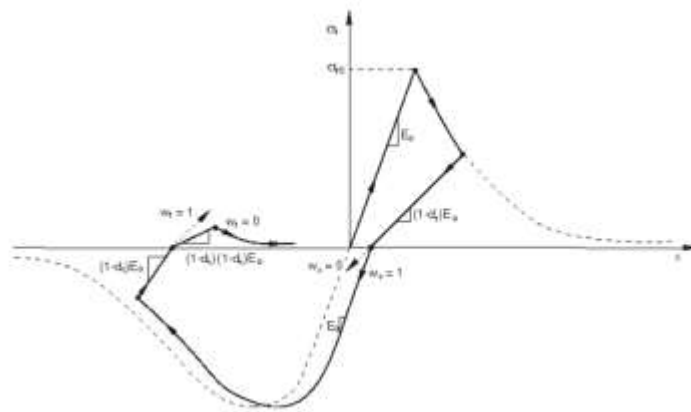
شکل ۱۵: مدل هندسی سازه

به جهت بررسی دقیق‌تر پوسته بتنی مسلح از نظریه مدل آسیب دیده بتنی موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است که در آن بتن در دو حالت بارگذاری کششی و فشاری از خود واکنش نشان می‌دهد. بدین طریق که بتن در فاز کششی تا میزان حداکثر مربوط به مقاومت کششی را به صورت خطی از خود واکنش نشان می‌دهد و پس ترک خوردگی با یک افت مقاومت از خود تغییر شکل نشان خواهد داد. در فاز فشاری نیز بتن تا مرحله حداکثر فشاری از خود واکنشی متناسب با سختی اولیه نشان می‌دهد و پس از این مرحله با تغییر سختی حاصل از ایجاد خورد شونده‌گی در بتن و افت سختی همچنان از خود تغییر شکل نشان می‌دهد. نمودارهای مرتبط با واکنش‌های بتن در مراحل مختلف بارگذاری در زیر آورده شده‌اند.





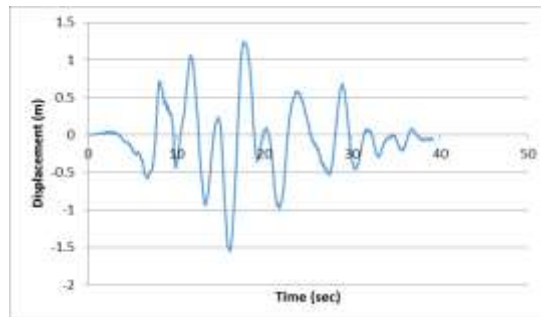
۲-۳ نمودار تنش-کرنش بتن در کشش (a) و فشار (b)



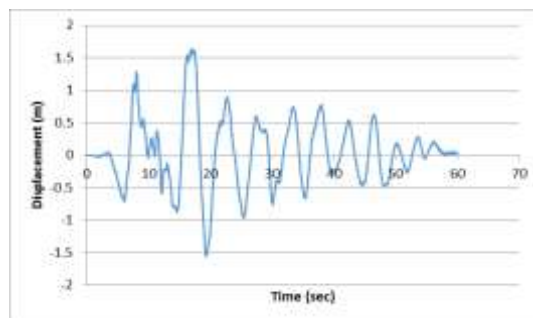
۳-۳ نمودار تنش-کرنش بتن در کشش-فشار و کشش

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی پوسته بتن مسلح

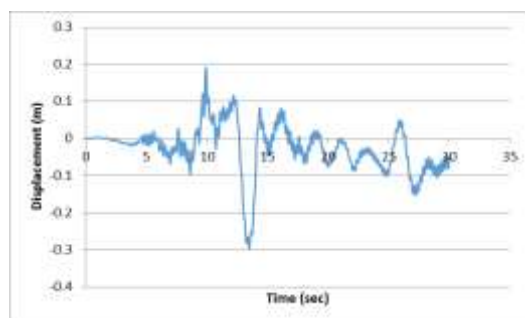
پس از به دست آوردن ضریب مقیاس برای رکورد های زلزله، بر اساس مطالب عنوان شده در آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و اعمال این شتاب نگاشت های مقیاس شده به عنوان نیروی وارد بر پایه سازه، در ادامه تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی انجام می شوند و نتایج تحلیل ها به قرار زیر عنوان می گردند. در نرم افزار آباکوس، تغییر مکان های نوک مخروط به عنوان خروجی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند.



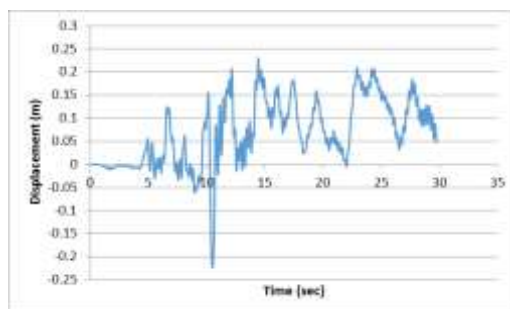
شکل ۱۶: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Loma Prieta, Sunny Vale



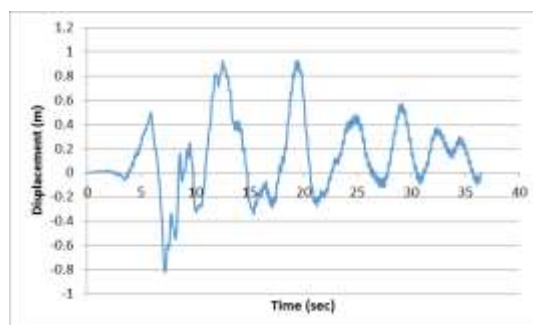
شکل ۱۷: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Loma Prieta, Hollister South&Pine



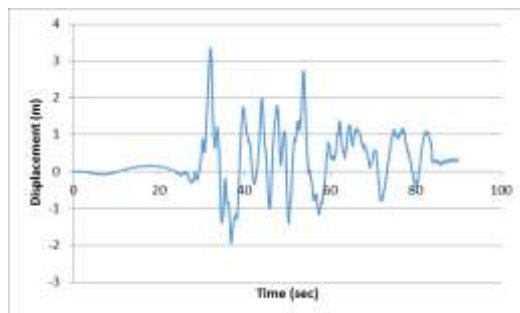
شکل ۱۸: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Northridge-01, Santa Monica



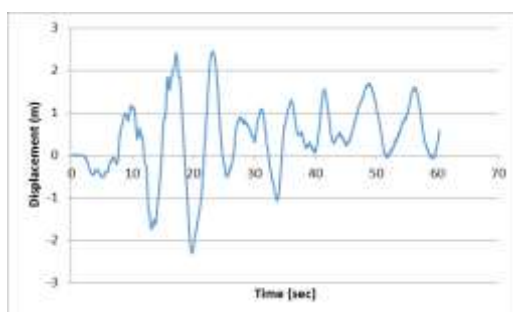
شکل ۱۹: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Northridge-01, LA Saturn St



شکل ۲۰: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Loma Prieta, Hollister Diff Array



شکل ۲۱: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Chi-Chi Taiwan, TCU110



شکل ۲۲: تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله Chi-Chi Taiwan, CHY036

همان‌طور که در اشکال مربوط به تغییر شکل نوک مخروط مشاهده می‌شود، جابه‌جایی حداکثر مربوط به زلزله Chi-Chi Taiwan, TCU110 است که این مقدار حداکثر برابر با $3/35$ متر می‌باشد، حداقل میزان جابه‌جایی نیز متعلق به زلزله Northridge-01, LA Saturn St که برابر با $0/23$ متر می‌باشد.

بر اساس بند ۲-۴-۱-۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش سوم مقدار متوسط بازتاب‌های به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی هفت رکورد انتخاب‌شده به‌عنوان بازتاب نهایی سازه تلقی خواهد شد، در اینجا با استفاده از ترکیب جذر مجموع مربعات بازتاب نهایی سازه محاسبه‌شده است که مقداری برابر با $4/7$ متر خواهد داشت. بر همین اساس جابه‌جایی نسبی سازه برابر با $0/094$ خواهد بود. در صورت استفاده از رابطه ۲-۱۴ بیان‌شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مقدار تغییر مکان جانبی نسبی واقعی طرح برای سازه‌های بازمان تناوب کمتر از $0/7$ ثانیه باید کوچک‌تر از $0/025$ ارتفاع سازه باشد که این عدد برای یک سازه ۵۰ متری برابر با $1/25$ خواهد بود و میزان تغییر مکان جانبی نسبی واقعی طرح برابر با $0/23$ خواهد شد که این عدد مناسبی است.

پس می‌توان نتیجه گرفت که میزان جابه‌جایی نسبی واقعی طرح در میزان خوبی قرار دارد.

جدول ۲ - میزان تغییر مکان نوک مخروط برای زلزله‌های انتخاب شده

ردیف	نام زلزله	حداکثر تغییر مکان نوک مخروط (متر)
۱	Chi-Chi Taiwan, CHY036	۲/۴۵
۲	Chi-Chi Taiwan, TCU110	۳/۳۵
۳	Northridge-01, Santa Monica	۰/۲۹
۴	Northridge-01, LA Saturn St	۰/۲۳
۵	Loma Prieta, Hollister South&Pine	۱/۶۲
۶	Loma Prieta, Hollister Diff Array	۰/۹۲
۷	Loma Prieta, Sunny Vale	۱/۲۴

نتیجه گیری

با توجه به ماهیت دینامیکی اثر نیروی زلزله بر روی ساختمان‌ها و نیاز به طراحی دقیق‌تر سازه‌هایی از قبیل دودکش‌ها، سیلوها و برج‌های خنک‌کننده نیروگاهی و نیاز به عملکرد بدون انقطاع آن‌ها در بررسی بر آن شدیم تا با انتخاب شتاب‌نگاشت‌های متناسب با منطقه مورد بررسی یک مخروط بتنی مسلح و سعی در مدل‌سازی دقیق‌تر مصالح بتنی با استفاده از تئوری آسیب بتنی به مطالعه دقیق‌تر یک نمونه از این دست سازه‌ها بپردازیم. در این بررسی شتاب‌نگاشت‌های انتخابی با مراجعه به پایگاه داده PEER مربوط به سال ۲۰۱۰ که متناسب با طیف پاسخ در نظر گرفته شده در استاندارد ۲۸۰۰ و متناسب با نوع خاک منطقه که در این بررسی از نوع ۳ در نظر گرفته شده است، در جدول شماره ۱ جمع‌آوری شده‌اند. پس از برآورد ضریب مقیاس این شتاب‌نگاشت‌ها که بر طبق توضیحات استاندارد ۲۸۰۰ این عدد برابر ۱/۵۷ می‌باشد، این عدد به شتاب‌نگاشت‌های مذکور اعمال گشته و پس از آن این شتاب‌ها به عنوان نیروهای تحریک سازه، به پایه آن اعمال شده‌اند. تغییر شکل نوک سازه به عنوان یکی از پاسخ‌های سازه به بارهای دینامیکی در طول روند تحلیل ثبت گردیده است و میزان حداکثر این تغییر شکل‌ها در جدول شماره ۲ گردآوری شده‌اند که جابه‌جایی حداکثر مربوط به زلزله Chi-Chi Taiwan, TCU110 است که این مقدار حداکثر برابر با ۳/۳۵ متر می‌باشد، حداقل میزان جابه‌جایی نیز متعلق به زلزله Northridge-01, LA Saturn St که برابر با ۰/۲۳ متر می‌باشد. این میزان از جابه‌جایی با مطالب ذکر شده در استاندارد ۲۸۰۰ کنترل گردیده است و در محدوده نتایج مطلوب قرار دارد.

مراجع

- [1]-Leissa A.W. 1973. *Vibration of Shells*. NASA SP-288.
- [2]-Goldberg J.E, Bagdanoff. 1960. On the calculation of the axisymmetric modes and frequencies of conical shells. *Journal of the Acoustical Society of America* 32: 738-742.
- [3]-Ross C.T.F. 1975. Finite elements for the vibration of cones and cylinders. *International journal for numerical methods in engineering* 9:833-845.
- [4]-Thambiratnam D.P, Thevendran V. 1989. Optimum design of conical shells for free vibration. *Computers and Structures* 29: 133-140.

- [5]-Ganesan N,Sivadas K.R. 1990. Free vibration of cantilever circular cylindrical shells with variable thickness. *Computers and Structures* 34: 669-677.
- [6]- Ganesan N,Sivadas K.R. 1990. Free vibration of cantilever conical cylindrical shells with variable thickness. *Computers and Structures* 36: 559-566.
- [7]- Ganesan N,Sivadas K.R. 1990. Vibration analysis of orthotropic shells with variable thickness. *Computers and Structures* 35: 239-248.
- [8]-Buchanan G.R, Wong F.T-I. 2001. Frequencies and mode shapes for thick truncated hollow cones. *International journal of mechanical sciences* 43: 2815-2832.
- [9]- آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ویرایش سوم.
- [10]-PEER Ground Motion Data-Base. 2010. http://www.http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.
- [11]-Simulia Abaqus/CAE 6.10.1 User's Manual.