

ارزیابی منحنی شکنندگی لرزه ای پوشش نیروگاه هسته‌ای با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه

بهرنگ اسمی^۱، ایرج محمودزاده کنی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران زلزله، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد گروه عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پوشش نیروگاه انرژی اتمی به منظور حفاظت سلامت انسان‌ها و همچنین محیط زیست در برابر نشت مواد رادیواکتیو بسیار مهم می‌باشد. به همین علت، آسیب به این پوشش می‌تواند منجر به حوادث غیرقابل جبرانی شود. از این رو ارزیابی ایمنی احتمالاتی لرزه‌ای پوشش بتنی نیروگاه در برابر حوادث خارجی از جمله زلزله امری ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور پوشش نیروگاه‌های اتمی با دیوارهای برشی بتن آرمه برای مقاومت در برابر بارهای جانبی می‌باشد، در دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای توصیه می‌شود برای طراحی ایمن، از ضریب جذب انرژی غیرالاستیک به عنوان معیار طراحی در برابر زلزله استفاده شود. در این مقاله قصد داریم به آنالیز پوشش نیروگاه تحت اثر زلزله با محاسبه منحنی شکنندگی بپردازیم. برای محاسبه منحنی با استفاده از آنالیز دینامیکی افزایشی محاسبه شده است. در این نوع پوشش‌ها با توجه به سختی زیاد این سازه و کوچک بودن بودن پرپود آن، اثر اندرکنش خاک و سازه پارامتر تعیین کننده‌ای در پاسخ سازه دارد، بدین منظور برای مقایسه اثر آن، با محاسبه منحنی شکنندگی بر روی خاک حدود عملکردی مختلف را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: پوشش نیروگاه، اندرکنش خاک و سازه، آنالیز دینامیکی افزایشی.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین وظایف آژانس بین المللی انرژی اتمی تدوین استانداردهای لازم به منظور تامین حفاظت انسانها و همچنین محیط زیست در برابر خطرات و حوادث خارجی است. بدین منظور لزوم انجام دقیق ارزیابی ایمنی لرزه‌ای نیروگاه هسته‌ای به ضروری به نظر می‌رسد. برای انجام ارزیابی لرزه‌ای موفق می‌بایست هدف انجام ارزیابی مشخص شود، بسته به هدف از ارزیابی، روش‌های متفاوتی برای انجام آن وجود دارد. اگر ارزیابی نیروگاه هسته به صورت کلی و یا متناوب صورت پذیرد و برای تمام نیروگاه هسته‌ای در یک گروه باشد روش زلزله سطح بررسی مناسب می‌باشد، ولی اگر ارزیابی و بررسی بر روی قسمت خاصی از نیروگاه مد نظر باشد استفاده از جداول شکنندگی مناسب‌تر می‌باشد. به طور کلی برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای تاسیسات هسته‌ای با توجه به تعاریف فوق دو روش پیشنهاد می‌شود: ۱- روش ارزیابی حد لرزه‌ای که در آن سطح زلزله براساس روش زلزله سطح بررسی تعیین می‌شود. - روش ارزیابی ایمنی احتمالاتی لرزه‌ای SPSA که در آن خطر زلزله به صورت پیوسته برای حدود مختلف زلزله براساس جداول مختلف شکنندگی لرزه‌ای تعیین می‌شود. هدف از انجام ارزیابی ایمنی احتمالاتی لرزه‌ای بررسی میزان آسیب‌پذیری نیروگاه در برابر زلزله به منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری آن و همچنین افزایش سطح ایمنی آن در صورت لزوم می‌باشد. انجام ارزیابی ایمنی احتمالاتی لرزه‌ای شامل مراحل زیر می‌باشد:

ارزیابی خطر لرزه‌ای، ارزیابی پاسخ لرزه‌ای، ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای، قابلیت اطمینان سیستم.

ما در این مقاله قصد داریم به محاسبه منحنی شکنندگی براساس پوشش خارجی نیروگاه اتمی با استفاده از روش آنالیز دینامیکی افزایشی با استفاده از حدود عملکردی ضریب جذب انرژی غیرالاستیک براساس مکانیزم شکست که حدود آن براساس پیشنهاد ASCE/SEI 43-05 انتخاب شده‌است بپردازیم.

ظرفیت جذب انرژی غیرالاستیک (F_{μ}): اگرچه ظرفیت جذب انرژی غیرالاستیک برای اکثر سیستم‌های سازه‌ای تا حدودی محافظه کارانه است ولی با توجه به اینکه سازه‌های نیروگاه هسته‌ای دارای سختی زیاد و پیوند کوچک، اغلب دارای شکل‌پذیری کمی می‌باشند. اغلب این سازه‌ها از دیوارهای برشی بتنی مسلح با نسبت طول به عرض کم ساخته شده‌اند، این نوع از سازه‌ها دارای مقاومت الاستیک زیاد، شکل‌پذیری کم و دارای رفتار برشی هستند. این نوع رفتار باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی غیرالاستیک سازه می‌شود (پولای^۱، ۱۹۹۲).

تا کنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است، تاثیر ظرفیت شکل‌پذیری سازه، نوع خاک و همچنین پیوند سازه بر ظرفیت جذب انرژی غیرالاستیک (پولای، ۱۹۹۲). مطالعات نشان می‌دهد که سازه‌هایی با پیوند کمتر از ۰.۵S استفاده از روش‌های تقریبی خطای زیادی را در تغییر مکان غیر الاستیک سازه نشان می‌دهد (سانگ^۲، ۲۰۰۰). همچنین ایبرا در مطالعات خود به بررسی پارامتریک برای تخمین ظرفیت ضریب جذب انرژی غیر الاستیک در سازه‌های با پیوند کوچک و با شکل‌پذیری کم پرداخت و تاثیر عوامل چون پیوند سازه، شکل‌پذیری و زوال مقاومت را بررسی کرد (لوئیس^۳، ۲۰۰۶). یکی از بهترین روش‌های موجود برای پیش‌بینی رفتار سازه در محدوده خطی و غیرخطی به دلیل عدم قطعیت‌های فراوان، روش دینامیکی افزایشی است. در این روش رکوردهای انتخابی برای آنالیز در مقادیر مختلف مقیاس می‌شوند تا بتوانند رفتار سازه را از حد الاستیک تا فروپاشی را پوشش دهند (کرنل^۴، ۲۰۰۲). روش دینامیکی افزایشی IDA برای بدست آوردن محاسبه منحنی شکنندگی دقیق‌ترین روش می‌باشد زیرا: استفاده از آنالیز تاریخچه زمانی، انتخاب رکوردهایی متناسب با مشخصات محل سازه، برآورد پاسخ سازه در ازای هر میزان از مقیاس رکورد انتخابی و همچنین محاسبه راحت منحنی شکنندگی برای هر یک از حدود عملکرد مد نظر (ماندال و همکاران^۵، ۲۰۱۶). آژانس بین المللی انرژی اتمی پیشنهاد می‌دهد که برای محاسبه بهتر منحنی شکنندگی از تحلیل غیرخطی استفاده شود.

¹ Paulay

² Song

³ Luis

⁴ Cornell

⁵ Mandal et al.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در تحلیل و آنالیز سازه‌ها اثر اندرکنش خاک سازه می‌باشد، در پوشش نیروگاه هسته‌ای، دیوار برشی بتن آرمه با توجه نسبت کم (ارتفاع/طول) با توجه به سختی زیاد و پریود کوچک آن اثر اندرکنش خاک سازه تاثیر قابل توجهی در پاسخ سازه دارد. پاسخ غیرخطی سازه تحت زلزله با شرایط مختلف می‌تواند تاثیر زیادی بر پاسخ سازه داشته باشد (مایلوناکیس^۱، ۲۰۰۰). مطالعات نشان می‌دهد خواص خاک می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر روی نیروی برشی در پوشش نیروگاه ایجاد کند (اوانس^۲، ۱۹۸۷). همچنین در تحقیقات اخیر اثر اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های سنگین هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفت و اثر لایه‌بندی خاک و سنگ را بر روی پاسخ لرزه‌ای مقایسه کرد (جرمیک و همکاران^۳، ۲۰۱۳) و تاثیر اندرکنش را در میزان برش پایه، میزان شکل‌پذیری و دریفت را در دیوار برشی داخلی یک راکتور را بررسی کرد (بهامیک^۴، ۲۰۱۳). امروزه روشهای متعددی برای مدلسازی خاک و آثار آن در پاسخ سازه قرار گرفته بر روی آن وجود دارد. از جمله کارآمدترین این روشها میتوان به مدل غیرخطی تیر وینکلر اشاره نمود. سادگی در مدلسازی و نیز ارائه مدل رفتاری منطبق بر نتایج آزمایشگاهی و عملی، از جمله محاسن این روش در مدلسازی مسائل اندرکنش خاک و سازه است (ریچودهری^۵، ۲۰۰۹). همچنین مشاهده شد که مدل وینکلر به مراتب رفتار بهتری نسبت به مدل آمپدانس خطی ارائه میدهد. ما در این مقاله قصد داریم به محاسبه منحنی شکنندگی سازه با استفاده از روش دینامیکی افزایشی با استفاده از حدود عملکردی ضریب جذب انرژی غیرالاستیک که حدود آن براساس پیشنهاد ASCE/SEI 43-05 بپردازیم و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه، ضریب جذب انرژی و دریفت را به عنوان دو حد عملکرد مورد نظر بر عملکرد لرزه‌ای آن مقایسه کنیم.

۲- مدل سازی عددی

مدل ساختمان راکتور اغلب به صورت یک استوانه با سقف گنبدی شکل طراحی می‌شود و معمولاً با یک پوسته خارجی ثانویه فولادی یا بتنی محافظت می‌گردد. پوشش مورد مطالعه در این تحقیق شامل یک دیوار بتنی استوانه‌ای در قسمت پایین و یک گنبد بتنی مطابق شکل ۱- به یکدیگر متصل شده‌است. مدل‌سازی به روش اجزا محدود سازه دقیق‌ترین روش برای محاسبه و آنالیز سازه می‌باشد، اما این روش با توجه به نوع و تعداد المان‌ها، برای محاسبه پاسخ سازه مدت زمان زیادی نیاز است، با توجه به این شرایط مدل تیر و جرم متمرکز با توجه به دقت و زمان محاسبه کوتاه روش مناسبی برای آنالیز سازه نسبت به مدل سه-بعدی است. در مدل تیر و جرم متمرکز سازه به صورت چند تیر سری تقسیم می‌شود که هر قسمت شامل دو گره می‌باشد، سختی هر تیر متناسب با هر سختی تیر معادل همان قسمت و جرم به صورت متناسب به گره‌های بالا و پایین اختصاص داده می‌شود. برای مدل‌سازی عددی و آنالیز از نرم‌افزار اجزا محدود *opensees* استفاده شده‌است. مدل‌سازی به صورت دو بعدی که در هر قسمت با استفاده از المان دو بعدی *NonLinearBeamColumn* مدل شده‌است. برای مدل‌سازی سازه معادل به صورت مدل تیر و جرم متمرکز، از ۳۰ گره در طول سازه و همچنین از ۸۰ *integration points* استفاده شده‌است. برای بتن از مدل *Concrete01* و برای فولاد از مدل *Steel01* استفاده شده‌است (مازونی^۶، ۲۰۰۶). با توجه به وجود آرماتور عرضی، اثر آن به صورت محصور شدگی در بتن لحاظ شده‌است. مشخصات بتن بدون در نظر گرفتن اثر محصور شده‌گی داری مقاومت ۲۱ مگاپاسکال و در حالت محصور شدگی داری مقاومت ۲۳.۹ مگاپاسکال و فولاد دارای مقاومت ۱۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

¹ Mylonakis

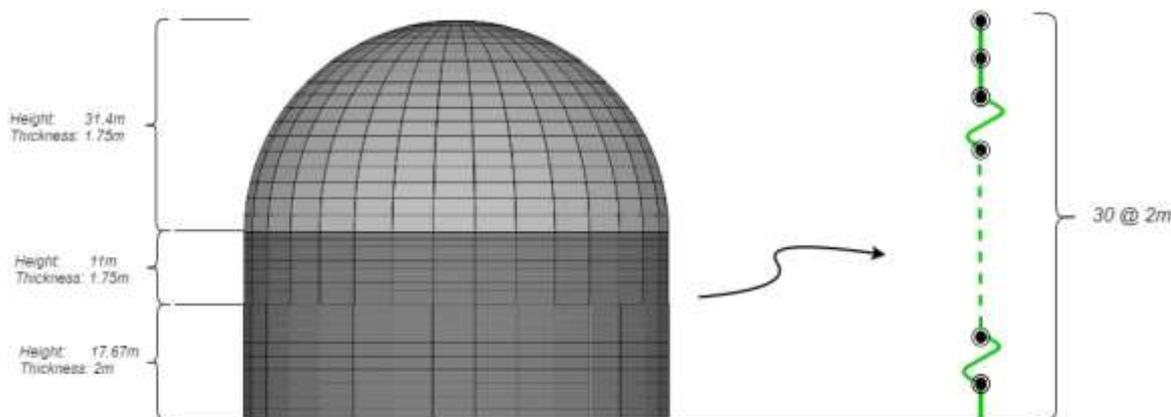
² Evans

³ Jeremić et al.

⁴ Bhaumik

⁵ Raychowdhury

⁶ Mazzoni



شکل ۱- شکل راکتور و شکل مدل تیر و جرم متمرکز

هر المان به صورت مقطع معادل که شکل هندسی مقطع به آن اختصاص داده شده است. با توجه اینکه در روش مدل تیر و جرم متمرکز با توجه به اینکه می‌بایست سختی معادل برشی و خمشی به المان اختصاص داده شود المان NonLinearBeamColumn با توجه به اینکه با استفاده از FiberSection مدل شده است فقط توانایی انتقال نیرو را در المان به صورت طولی دارد، با توجه به اینکه سختی برشی و خمشی در یک المان به صورت موازی هستند.

$$K_{eq} = \frac{K_b \cdot K_s}{K_b + K_s}$$

با توجه به اینکه رفتار سازه برشی است در صورت در نظر نگرفتن سختی برشی می‌تواند منجر به خطای زیادی در محاسبات شود. تعریف رفتار برشی برای BeamColumn می‌تواند به قسمت sectionAggregator، fibre section را اضافه کرد. برای تعریف رفتار برشی سازه نیاز به مدول برشی و مساحت موثر برشی مقطع است، برای اختصاص مساحت برشی موثر ضرایبی برای محاسبه آن بر حسب مساحت مقطع بر حسب شکل و ابعاد پیشنهاد شده است که برای مقاطع مختلف اعدادی بین ۰.۶ تا ۰.۸ پیشنهاد شده است (کالمنز^۱، ۱۹۸۹). با توجه تاثیر مساحت برشی موثر سازه، بروی عملکرد آن و نوع پوشش بتنی نیروگاه همچنین ابعاد و ضخامت آن تا کنون مطالعه در این زمینه انجام نشده است. در مدل اجزا محدود سه بعدی در نرم افزار SAP پریود مود اول ۰/۱۸۸ می‌باشد، برای درک اهمیت رفتار برشی سازه در صورت در نظر گرفتن رفتار برشی سازه پریود اول آن ۰.۰۹۲ است. بدین منظور برای تعیین ضریب مساحت موثر برشی مناسب، سازه را با مدل اجزا محدود سه بعدی مدل شده در نرم افزار SAP مقایسه می‌کنم که با توجه به نظر گرفتن ضریب برشی ۰.۶ برای بتن پریود مد اول ۰.۱۶۱ می‌باشد. همچنین پریود سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش ۰.۲۸ می‌باشد.

برای ارزیابی اثر اندرکنش خاک سازه، سازه فرض در نظر گرفتن SSI مدل شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر SSI، خاک با استفاده از مدل غیر خطی beam-on-nonlinear-Winkler- foundation (BNWF) مدل شده است (ریچودهری، ۲۰۰۹) این به وسیله یکسری فنر q-Z عمودی و که در پایه ستون توزیع شده است، به منظور بدست آوردن مقاومت عمودی و چرخشی پای ستون استفاده شده است. همچنین دو فنر در راستای افقی، p-X و t-X به ترتیب به منظور محاسبه مقاومت پیسو و اصطکاک لایه‌ای در نظر گرفته شده است که فنرهای معادل آن براساس مطالعات Boulanger et al محاسبه شده-

¹ Columns

است (بولانجر و همکاران^۱، ۱۹۹۹). رفتار فنر $q-z$ به وسیله بار نهایی فشاری و کاهش مقاومت به وسیله بار کششی تعریف شده است؛ که برای تعریف منحنی رفتار فنرهای $q-z$ از مدل مصالح QzSimple2 استفاده شده است (ریچودهری، ۲۰۰۹). در بخش الاستیک، بار لحظه‌ای q متناسب با جابجایی لحظه‌ای به صورت خطی فرض شده است.

$$q = k_{in}z$$

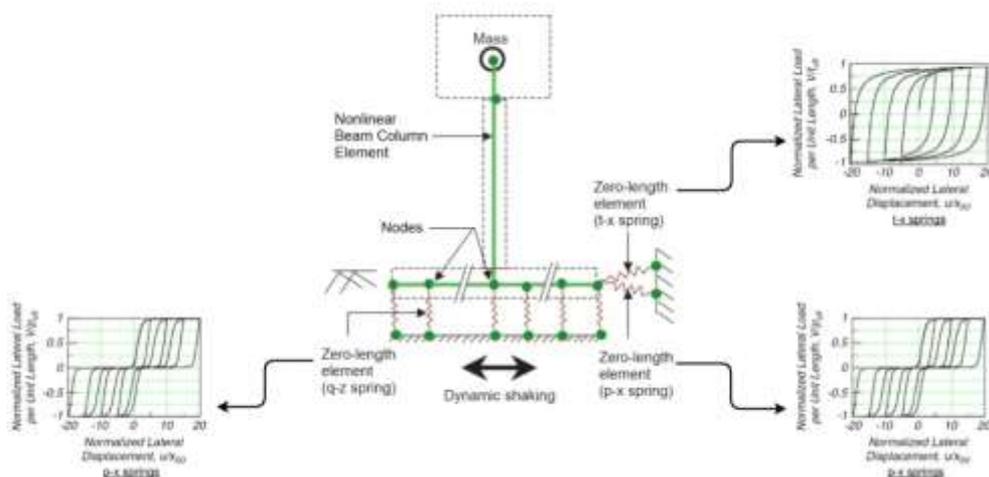
که در آن k_{in} سختی اولیه الاستیک است. محدوده ناحیه الاستیک مطابق رابطه زیر تعریف شده است.

$$q_0 = C_r q_{ult}$$

که در آن q_0 بار در نقطه تسلیم، C_r پارامتر کنترلی محدود بخش الاستیک و q_{ult} بار نهایی می‌باشد. در محدوده غیر خطی منحنی رفتار به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$q = q_{ult} - (q_{ult} - q_0) \left[\frac{cz_{50}}{cz_{50} + |z^p + z_0^p|} \right]^n$$

که در آن z_{50} متناظر جابجایی ۵۰٪ ظرفیت نهایت است، z_0^p جابجایی در نقطه تسلیم، z^p جابجایی هر نقطه در ناحیه پس از تسلیم و c و n پارامترهای ساختاری کنترل شکل از بخش پس از تسلیم منحنی رفتار پس از تسلیم می‌باشد. معادلات حاکم بر روابط $p-x$ و $t-x$ مشابه روابط $q-z$ هستند با تغییر در ضرایب ثابت n ، c و C_r .



شکل ۲- شکل مدل وینکلر و نحوه عملکرد فنرها

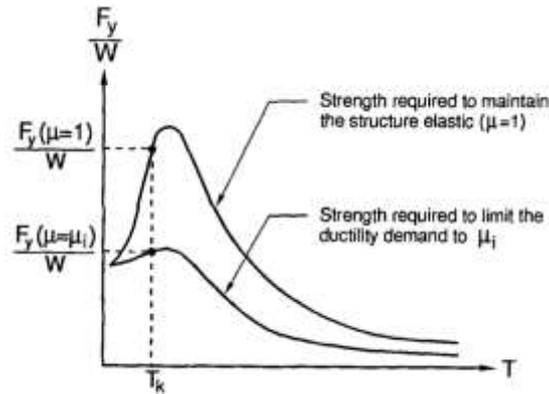
۲-۱- تعریف ضریب جذب انرژی غیرالاستیک^۲

هدف غنی‌سازی شغل حداکثرسازی علاقه و چالش‌های شغلی است. این امر با فراهم کردن شغلی با مشخصات زیر محقق بسیاری از آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای تاسیسات هسته‌ای، ضریب جذب انرژی غیرالاستیک را به عنوان حدود عملکردی در سطوح مختلف پیشنهاد می‌دهند. به طور کلی ضریب جذب انرژی غیرارتجاعی یا ضریب کاهش مقاومت R_{II} به صورت میزان مقاومت الاستیک جانبی سازه به مقاومت غیرالاستیک جانبی سازه تعریف می‌شود (لوئیس، ۲۰۰۶).

¹ Boulanger et al.

² Inelastic Absorption Energy

$$R_{\mu} = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(\mu = u_i)}$$



شکل ۳- طیف پاسخ شکل پذیری خطی و غیر خطی

که در آن $F_y(\mu = 1)$ مقاومت تسلیم جانبی که سازه در حالت الاستیک باقی بماند و $F_y(\mu = u_i)$ میزان مقاومت تسلیم جانبی که سازه در آن میزان نسبت شکل‌پذیری $\mu = u_i$ و یا کمتر قرار می‌گیرد. به طور کلی تحت یک بارگذاری با افزایش جابجایی غیرالاستیک میزان مقاومت تسلیم جانبی کاهش پیدا می‌کند (وامواتیسکوس، ۲۰۱۰). در ASCE/SEI 43-05 چندین سطح عملکرد مختلف برای تعیین رفتار سازه تعریف شده‌است؛ که ما در این مطالعه قصد داریم حدود عملکرد C - (جابجایی دایم محدود یا آسیب حداقل) که معادل $R_{\mu} = 1.5$ و حدود عملکرد A - (اعوجاج دایمی بزرگ یا short of collapse) که معادل $R_{\mu} = 1.5$ می‌باشد را بررسی کنیم. میزان ضریب جذب انرژی غیرالاستیک را از رابطه‌ی پیشنهادی ناسر^۱ محاسبه می‌کنیم. رابطه‌ی ناسر یک رابطه خطی دو بخشی است که براساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{\mu} = (C(\mu - 1) + 1)^{1/c}$$

$$C(T, \alpha) = \frac{T^a}{T^a + 1} + \frac{b}{T}$$

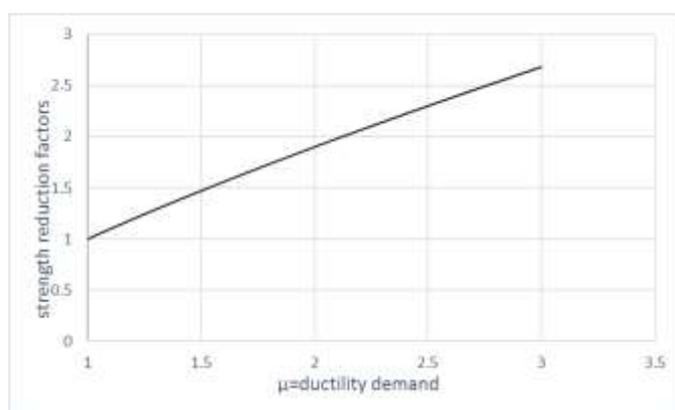
که در رابط بالا α نسبت سختی غیرخطی به سختی الاستیک است. مقادیر ضرایب a, b از جداول زیر بدست می‌آید

¹ Nassar

جدول ۱- ضرایب رابطه Nassar

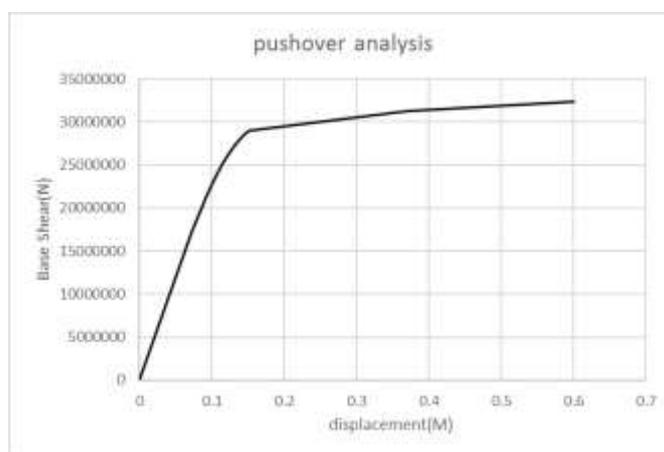
α	a	b
0	1	0.42
0.02	1	0.37
0.1	0.8	0.29

با توجه به رابطه Nassar و پیروید ۰.۲۸ و با فرض $\alpha=0.02$ برای سازه در شرایط مختلف نمودار ضریب جذب انرژی غیرالاستیک بر حسب شکل پذیری سازه مطابق شکل زیر می باشد.



شکل ۴- منحنی رابطه Nassar برای ضریب جذب انرژی بر حسب شکل پذیری

به منظور محاسبه ظرفیت الاستیک سازه، آنالیز پوش آور استاتیکی بر اساس دستورالعمل FEMA 356 انجام شد. آنالیز پوش- آور برای حالت تکیه گاه ثابت و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه محاسبه شده است. در شکل میزان تغییر مکان الان بام سازه بر حسب برش پایه سازه نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است میزان تغییر شکل الاستیک سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه ۱۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۴- منحنی پوش آور سازه

۳- آنالیز دینامیکی افزایشی

به منظور آنالیز لرزه‌ای رفتار پوشش نیروگاه با استفاده از روش IDA مجموعه‌ای از تجزیه تحلیل‌های غیر خطی بر روی مدل تعریف شده، انجام شد. مجموعه‌ای از ۲۰ رکورد زلزله ثبت شده برای انجام تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انتخاب شد. یک دسته 20 تایی از شتاب نگاشت‌های مطابق جدول ۲ جهت انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی پوشش مورد مطالعه انتخاب شد. این اطلاعات مربوط به شتاب نگاشت‌ها از بانک اطلاعاتی PEER-NGA انتخاب شد. رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل‌های دینامیکی به شکلی انتخاب شدند که طیف خطی حاصل از آنها انطباق مناسبی بر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران، نوع III داشته باشند. برای این منظور، دسته‌ای از رکوردهای زلزله که سرعت موج برشی آن‌ها در عمق ۳۰ متری از سطح زمین، بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه و همچنین در فاصله بین ۲۰ تا ۶۰ کیلومتر قرار داشتند انتخاب شد و اثر مربوط به زلزله‌های نزدیک گسل به چشم نمی‌خورد. منحنی IDA رابطه‌ی بین میزان شدت لرزه‌ای برحسب میزان خسارت می‌باشد. برای صنایع هسته‌ی شتاب زمین نسبت به سایر پارامترها مناسب‌تر است، زیرا برای انجام ارزیابی ایمنی احتمالاتی لرزه‌ای نیروگاه هسته‌ای نیاز به ارزیابی شکندگی لرزه‌ای اجزا می‌باشد، به منظور مقایسه شکندگی لرزه‌ای اجزا نیروگاه در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای، PGA پارامتر مناسب‌تری به عنوان IM می‌باشد (ماندال و همکاران، ۲۰۱۶). معیار شدت خسارت (DM)، پاسخ سازه را به علت بارگذاری لرزه‌ای بیان می‌کند. به عبارت دیگر معیار شدت خسارت، کمیتی قابل مشاهده است که از خروجی آنالیز دینامیکی غیرخطی استخراج و نتیجه می‌شود (وامواتیسکوس^۱، ۲۰۱۰). برای تعیین معیار شدت خسارت با توجه به دستور عمل‌های ضوابط طراحی لرزه‌ای برای سازه‌های، سیستم و قطعات در تاسیسات هسته‌ای از جمله ASCE/SEI 43-05 برای سازه‌های عملکرد بررشی، ضریب جذب انرژی غیرالاستیک به عنوان حدود عملکردی این مطالعه انتخاب شد. به منظور محاسبه شکل‌پذیری مناظر با این حدود عملکردی، جابجایی به عنوان DM در این مطالعه انتخاب شد. ASCE/SEI 43-05 مقادیر زیر را برای حدود عملکردی ضریب جذب انرژی غیرالاستیک دیوارهای برش کنترل

با نسبت $\frac{h_w}{l_w} \leq 2$ پیشنهاد داد:

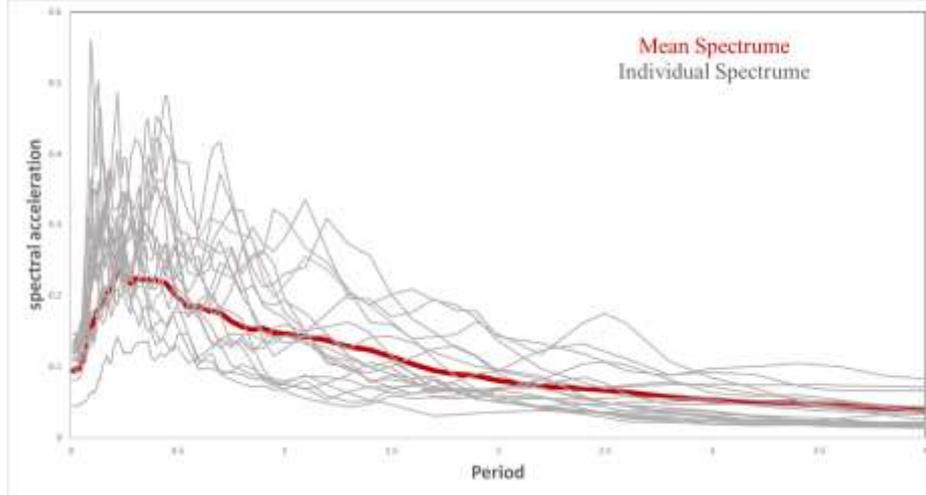
LS-C=1.5 و LS-A=2

همچنین این دستورالعمل برای LS-C و LS-A به ترتیب دریفت ۰.۰۰۷۵ و ۰.۰۰۴ را پیشنهاد داده‌است.

¹ Vamvatsikos

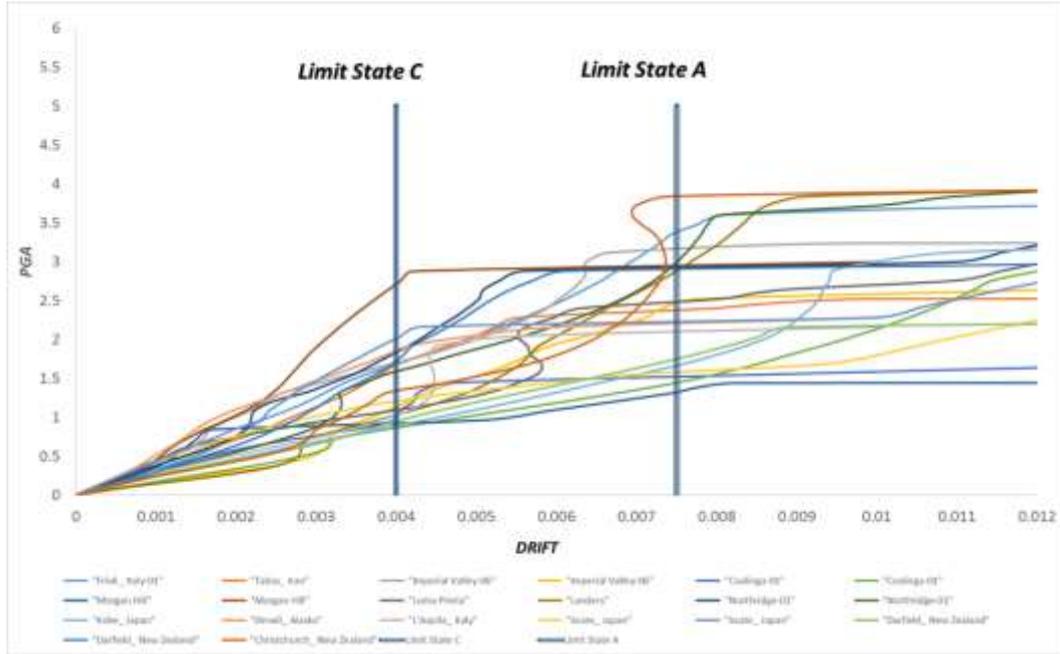
جدول ۲- مشخصات رکوردهای انتخابی

Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Vs30 (m/sec)	Rrup (km)	5-95% Duration (sec)
"Friuli_ Italy-01"	1976	"Codroipo"	6.5	249.28	33.4	19
"Tabas_ Iran"	1978	"Boshrooyeh"	7.35	324.57	28.79	19.5
"Imperial Valley-06"	1979	"Calipatria Fire Station"	6.53	205.78	24.6	25.9
"Imperial Valley-06"	1979	"Niland Fire Station"	6.53	212	36.92	26.4
"Coalinga-01"	1983	"Parkfield - Cholame 1E"	6.36	326.64	43.68	29
"Coalinga-01"	1983	"Parkfield - Cholame 3W"	6.36	230.57	45.7	23.5
"Morgan Hill"	1984	"Agnews State Hospital"	6.19	239.69	24.49	40.9
"Morgan Hill"	1984	"Hollister City Hall"	6.19	198.77	30.76	21.4
"Loma Prieta"	1989	"Salinas - John & Work"	6.93	279.56	32.78	21.5
"Landers"	1992	"Palm Springs Airport"	7.28	312.47	36.15	38.9
"Northridge-01"	1994	"Bell Gardens - Jaboneria"	6.69	267.13	44.1	19.8
"Northridge-01"	1994	"Carson - Catskill Ave"	6.69	305.14	50.38	21
"Kobe_ Japan"	1995	"OSAJ"	6.9	256	21.35	74.6
"Denali_ Alaska"	2002	"R109 (temp)"	7.9	341.56	43	23.1
"L'Aquila_ Italy"	2009	"Avezzano"	6.3	199	26.86	19
"Iwate_ Japan"	2008	"AKTH17"	6.9	288.82	48.14	45.9
"Iwate_ Japan"	2008	"YMT002"	6.9	365.59	38.91	47.9
"Darfield_ New Zealand"	2010	"DORC"	7	280.26	32.91	27.9
"Darfield_ New Zealand"	2010	"MAYC"	7	342.7	35.23	25.5
"Christchurch_ New Zealand"	2011	"ASHS"	6.2	295.74	30.46	15.8



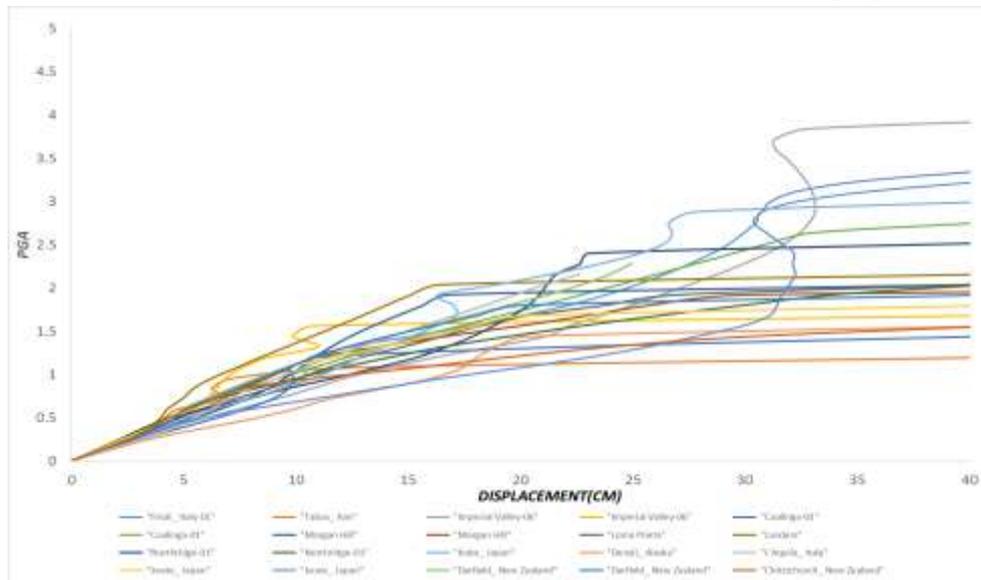
شکل ۵- طیف پاسخ زلزله‌های انتخابی و میانگین

در شکل زیر منحنی IDA بر حسب دریافت بین گره‌های تعریف شده در سازه رسم شده است.

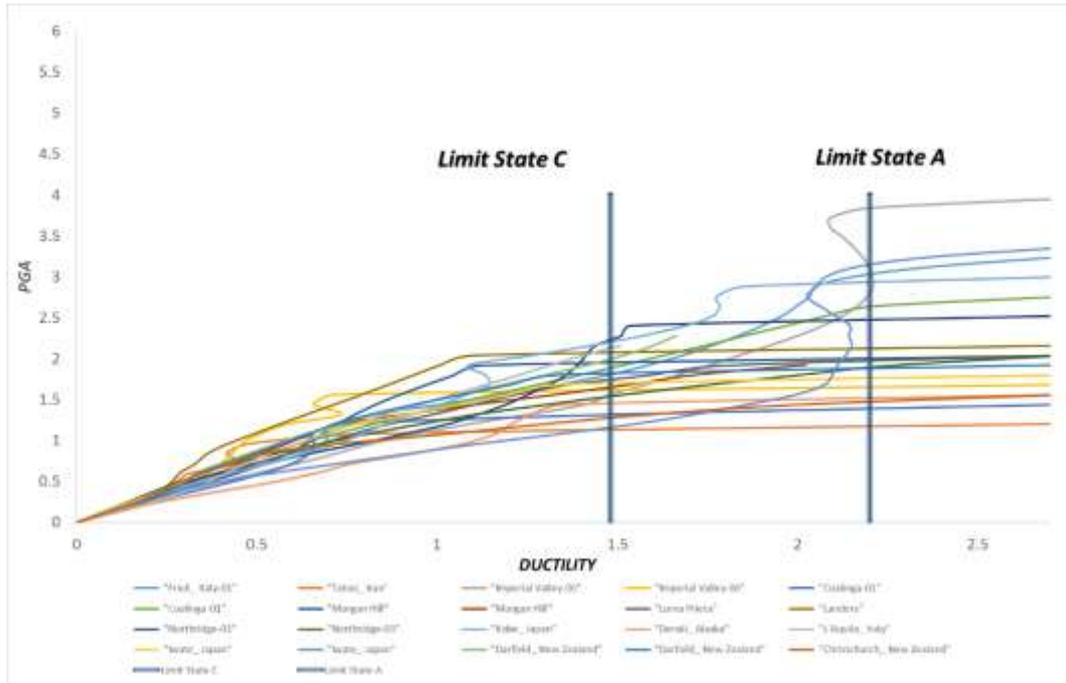


شکل ۶-منحنی IDA در یفت بین گره‌ها بر حسب PGA

همچنین برای محاسبه ظریب جذب انرژی غیرالاستیک، نمودار IDA شتاب بر حسب جابجایی رسم شده است و با توجه نمودار پوش‌آور منحنی شکل‌پذیری سازه رسم و مقادیر حدود عملکردی (ضریب جذب انرژی غیرالاستیک) با توجه به رابطه Nassar محاسبه می‌شود. در منحنی‌های IDA فوق مشاهده می‌شود که در سطوح پایین زلزله رفتار سازه الاستیک است و به تدریج سازه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود تا سازه به سمت ناپایداری پیش رود.



شکل ۶-نمودار IDA جابجای سقف گنبد بر حسب شتاب



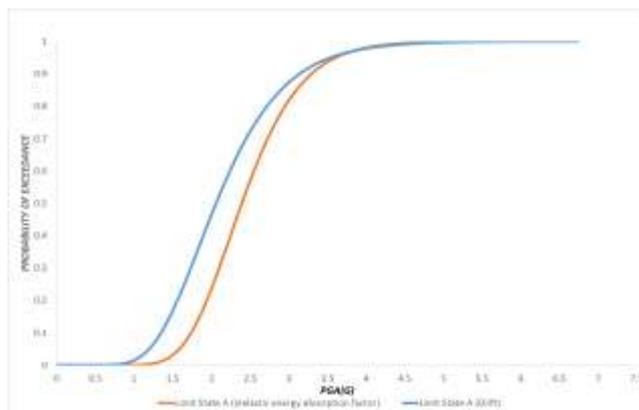
شکل ۷- نمودار IDA شکل پذیری پوشش نیروگاه

۴- آنالیز منحنی شکنندگی و نتیجه گیری

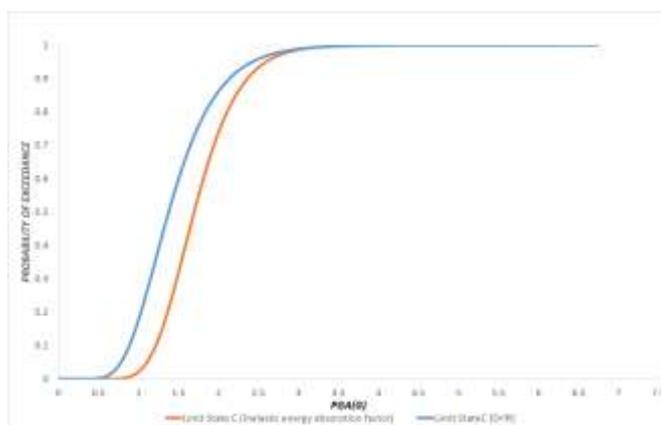
فرآیند تولید منحنی شکنندگی با استفاده از روشی آنالیز دینامیکی افزایشی به این صورت است که در ابتدا آنالیز دینامیکی افزایشی برای دسته رکوردهای مورد نظر انجام شده و سپس با توجه به این منحنی ها ظرفیت سازه تحت حدود عملکردی مورد نظر بدست می آید و ظرفیت سازه بر اساس حدود مشخص شده به صورت احتمال تجمعی مشخص می شود. در نهایت با برآزش نقاط احتمال تجمعی حاصله به توزیع تجمعی لوگ نرمالی، منحنی شکنندگی حاصل می شود. رابطه مورد نظر برای تولید منحنی شکنندگی به صورت رابطه زیر می باشد.

$$P(\text{collapse}||IM) = \varphi\left(\frac{\ln(IM) - \ln(\mu)}{\sigma}\right)$$

که در رابطه فوق IM معیار اندازه شدت زمین لرزه و بالا μ و σ به ترتیب میانه و انحراف استاندارد ظرفیت فروریزش سازه برآزش داده شده با تابع چگالی احتمال لوگ نرمال می باشد. برای مقایسه دو حد عملکردی منحنی شکنندگی هر یک از حدود عملکرد را به طور مجزا رسم می کنیم مطابق شکل زیر:



شکل ۸- منحنی شکنندگی برای حد عملکرد A



شکل ۹- منحنی شکنندگی برای حد عملکرد C

در این مقاله آنالیز دینامیک افزایشی را برای پوشش بتنی راکتور اتمی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه انجام شد و سپس با استفاده از نتایج آن، منحنی شکنندگی برای هر یک از حدود عملکردی A و C مطابق دستورالعمل ASCE/SEI 43-05 به طور مجزا با یکدیگر مقایسه شد.

- در مقایسه منحنی شکنندگی در دو حد عملکرد دریافت و ضریب جذب انرژی غیرالاستیک نشان داده شد که الزامات دریافت به حد عملکردی محدود کننده تعیین کننده نمی باشد.
- در این مطالعه در بررسی عملکرد A در احتمال رخداد ۵۰٪ در منحنی، حد عملکرد دریافت $g_{0.38}$ بیشتر از حد عملکرد ضریب جذب انرژی و در عملکرد C در احتمال رخداد ۵۰٪ در منحنی، حد عملکرد دریافت $g_{0.32}$ بیشتر از حد عملکرد ضریب جذب انرژی می باشد.
- برای حد عملکرد A در شتاب $2g$ احتمال رخداد این حد برحسب حد عملکرد دریافت ۲۱٪ بیشتر از ضریب جذب انرژی می باشد.
- ضریب جذب انرژی که برخی آیین نامه ها توصیه شده است می تواند نتایج غیر محافظه کارانه ای بدنبال داشته باشد.

منابع

- 1- ACI 318M-02 and Commentary ACI 318RM-02, "Building Code Requirements for Structural Concrete", American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, 2002.
- 2- Ang, B.G., Priestley, M.J.N., Paulay, T., "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete
- 3- ASCE 4-98. (1998). Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures and Commentary, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- 4- Bhaumik, Lopamudra, and Prishati Raychowdhury. "Seismic response analysis of a nuclear reactor structure considering nonlinear soil-structure interaction." Nuclear Engineering and Design 265 (2013): 1078-1090.
- 5- Boulanger RW, Curras CJ, Kutter BL, Wilson DW, Abghari A. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. ASCE J Geotech Geoenviron Eng 1999;125:750-9.
- 6- Columns", ACI Structural Journal, ACI, V. 86, No. 1, Jan.-Feb., pp. 45-59, 1989.
- 7- Eurocode 2 - Design of Concrete Structures: ENV1992-1-1: Part 1.1: General rules and rules for buildings, CEN, 1992.
- 8- Evans, J.J.B., Keogh, P.M., 1987. The Influence of nonlinearity and foundation behaviour on containment integrity. Nuclear Engineering and Design 104,357-364.
- 9- IAEA. Evaluation of seismic safety for existing nuclear installations. Tech. Rep. NS-G-2.13. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency; 2009.
- 10- IAEA. Seismic evaluation of existing nuclear power plants. Tech. Rep. Safety Report Series No. 28; 2003.
- 11- IBARRA, Luis, and Asadul CHOWDHURY. "Inelastic Absorption Energy Factors for Short Period Deteriorating SDOF Systems." 1st ECEES, Geneva, Switzerland, September (2006): 3-8.
- 12- Jeremić, B., et al. "Seismic behavior of NPP structures subjected to realistic 3D, inclined seismic motions, in variable layered soil/rock, on surface or embedded foundations." Nuclear Engineering and Design 265 (2013): 85-94.
- 13- Mandal, Tushar K., Siddhartha Ghosh, and Nikil N. Pujari. "Seismic fragility analysis of a typical Indian PHWR containment: comparison of fragility models." Structural Safety 58 (2016): 11-19.
- 14- Mazzoni S, McKenna F, Fenves GL. Opensees command language manual. Berkeley: The Regents of the University of California; 2006.
- 15- Miranda, E. and Bertero, V. (1994), Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design, Earthquake Spectra, 10, n° 2, 1004, 357-379.
- 16- Mylonakis, G., Gazetas, G., 2000. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental? Journal of Earthquake Engineering 4 (3),277-301.
- 17- Nassar, A.A. and Krawinkler, H., 1991. Seismic demands for SDOF and MDOF systems (No.95). John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University. Vancouver
- 18- Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992), Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, New York.
- 19- Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992), Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, New York.

- 20- PEER; Ground Motion Database, in, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- 21- Raychowdhury P, Hutchinson TC. Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthq Eng Struct Dyn* 2009; 38:679–98.
- 22- Raychowdhury, P., Hutchinson, T.C., 2009. Performance evaluation of a nonlinear Winkler based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 38 (5), 679–698.
- 23- Raychowdhury, Prishati; Nonlinear Winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures, in, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO, 2008.
- 24- Song, J. and Pincheira, J. (2000), Spectral Displacement Demands of Stiffness and Strength Degrading Systems, *Earthquake Spectra*, 16, 4, 817–851, Nov. 2000.
- 25- Tang, Yuchuan; Zhang, Jian; "Probabilistic seismic demand analysis of a slender RC shear wall considering soil–structure interaction effects"; *Engineering Structures*, 33; 2011, 218-229.
- 26- Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A., 2002a, "Incremental Dynamic Analysis," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 31-3, pp. 491–514.
- 27- Vamvatsikos, Dimitrios, and C. Allin Cornell, "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31.3, 491-514, 2002.

Seismic Fragility Analysis of a Nuclear Containment with soil structure interaction

Behrang Esmi¹, Iraj Mahmoodzadeh Kani²

MA Student in Civil Engineering, Earthquake Orientation, Tehran University, Tehran, Iran

Professor, Department of Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Abstract

In order to protect human health and also the environment, nuclear containment is of grave importance to this extent, damage to this containment can lead to disastrous accidents, because of this, seismic probabilistic safety assessment of the containment with regard to external accidents such as earthquakes, seems inevitable. It is because of this that shear concrete reinforcements are utilized in nuclear containments; in seismic design guidelines such as asce43-05, it is advised to use the inelastic absorption energy factor as the safety criteria. In this research we intend to analyze the nuclear containment under seismic loading, evaluating the fragility curve, using incremental dynamic analysis. In these containments, due to the high stiffness of the structure and period shortness, the interaction of the soil and structure is a determinative parameter in the structure response; to compare this response with fixed base structures, the limit state is compared via evaluating the fragility curve of the structure on soil.

Keywords: Nuclear Containment, Soil Structure Interaction, Incremental Dynamic Analysis
